



## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

*Учредитель и издатель — Общественная академия «Контенант»  
Издается с 2002 г.*

## СОДЕРЖАНИЕ

**Сеник Б.Н.**

Конференция "Технологии алмазной прецизионной обработки".

Краткий обзор ..... 3

**ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

**Новиков Н.В., Филатов Ю.Д.**

Современные пути развития теории формообразования  
прецизионных оптических поверхностей ..... 5

**Глухов Ю. А., Подобрянский А. В.**

Анализ рынка алмазного инструмента для обработки неметаллических материалов с целью определения сегмента алмазного производства ГУП "НПО "Оптика" и централизованного обеспечения предприятий отрасли покупным инструментом

**Гусев В. В., Калафатова Л. П., Олейник С. Ю.**

Исследование формирования волнистости поверхности при алмазном шлифовании тонкостенных сложнопрофильных оболочек вращения из ситаллов ..... 14

**Филатов А.Ю., Сидорко В.И.**

Исследование закономерностей образования налета на обрабатываемой поверхности при полировании оптического стекла ..... 29

**Петасюк Г.А., Шамраева В.С., Петасюк О.У.**

Исследование взаимосвязи количества режущих кромок и угла их заострения с абразивной способностью алмазных микропорошков ..... 35

**Петров С.Н.**

Алмазная обработка сферических биметаллических зеркал на автоматизированном оборудовании фирмы «OptoTech», Германия ..... 40

**Рогов В.В.**

Физико-химические процессы формирования прецизионных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем из сапфира ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) при трибохимическом полировании ..... 44

3

5

14

29

35

40

44

48



## СОДЕРЖАНИЕ (продолжение)

### Девин Л.Н., Рычев С.В.

Применяемые алмазные монокристаллические резцы для обработки металлоптических поверхностей .....

56

### Арутюнян В.В., Шевцов С.Е.

Формообразование оптических поверхностей методом алмазного микроточения на материалах, применяемых в ИК диапазоне спектра .....

60

### Поперенко Л.В.

Рефлектометрические поляризационные методы контроля оптических поверхностей .....

64

### Герасимов С.А., Дмитриева Н.М., Косарева Т.А.

Исследование процесса механической обработки лейкосапфира

84

### НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ОПТИЧЕСКИХ НАУК

#### Марков А.В., Григорьева О.В., Жуков Д.В., Бровкина О.В.

Разработка алгоритмов эффективной тематической обработки данных гиперспектральных систем для идентификации объектов ландшафта .....

90

### ИСТОРИЧЕСКИЕ ОЧЕРКИ

#### Фатхудинов Р.Х.

Оптики Красногорска - Лауреаты Ленинской премии .....

100

# **ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

---

**30 -31 мая 2013 года**

**на базе ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» была  
проведена Международная научно-практическая конференция  
«Технологии алмазной прецизионной обработки» с участием ученых  
и специалистов России, Украины, Белоруссии**

---

## **ИТОГИ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ "ТЕХНОЛОГИИ АЛМАЗНОЙ ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ"**

**СЕНИК Б.Н.** - доктор технических наук, Президент Общественной академии «Контентант»

**ОАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»**

E-mail: [contentant@zenitts.ru](mailto:contentant@zenitts.ru)

30-31 мая 2013 г. состоялась научно-практическая конференция "Технологии алмазной прецизионной обработки", организованная общественной академией "Контентант" и ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева". Инициатива проведения конференции принадлежит Институту сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев и ОАО "НПО "Оптика", г. Москва, и была поддержана ведущими оптическими предприятиями Российской Федерации, в том числе предприятиями, входящими в состав ОАО "Швабе", Республики Беларусь и Украины.

В конференции приняли участие 29 организаций, предприятий и университетов, 125 участников, из них 10 докторов наук и 8 кандидатов наук. Пленарное заседание открыл член Президиума общественной академии "Контентант", Первый заместитель Министра оборонной промышленности Советского Союза Корницкий И.П., внесший огромный вклад в развитие оптического станкостроения, в организацию промышленного производства синтетических алмазов и алмазных инструментов и, в конечном итоге, в организацию производства оптических и оптико-электронных приборов и комплексов как гражданского, так и специального назначения с максимально высокой производительностью труда.

С содержательным докладом "Применение алмазного инструмента для обработки неметаллических материалов" выступил кандидат технических наук Подобрянский А.В. (ОАО "НПО "Оптика", г. Москва. В докладе отражается состояние мирового рынка алмазных инструментов, динамика номенклатурного изменения по выпуску как самих алмазных синтетических порошков, так и изготовление алмазного инструмента различного назначения. Наряду с ведущими мировыми фирмами-производителями вышеуказанного инструмента в Российской Федерации функционируют предприятия, специализирующиеся на изготовлении алмазного инструмента для обработки деталей из оптических и металлических материалов. ОАО "НПО "Оптика" располагает производственными мощностями по выпуску алмазных элементов для грубого и тонкого алмазного шлифования оптических элементов и заинтересовано в выполнении заказов профильных оптических предприятий.

Важным направлением в развитии современных технологий изготовления прецизионных элементов для оптико-электронных приборов и комплексов является создание теоретических моделей формообразования и исследование закономерностей образования макро и микропрофиля обработанных поверхностей. На этом

вопросе подробно остановился Филатов Ю.Д., доктор физико-математических наук, профессор, сотрудник Института сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Одним из ярких проявлений активности российских фирм на рынке изготавителей алмазного инструмента является успешная работа предприятия ООО "РусАтлант", г. Москва. Технический директор, доктор технических наук, профессор Балыков А.В. в своём содержательном докладе рассказал о создании в рамках предприятия "РусАтлант" новых технологий изготовления алмазного инструмента. Создана уникальная серийная запатентованная технология изготовления алмазно-абразивного высокопроизводительного и износостойкого инструмента нового поколения "МонАлит", имеющего оптимальное соотношение "цена-ресурс". Это стало возможным в результате теоретического и экспериментального изучения процессов, одновременно протекающих на контакте алмазного инструмента и материала детали. В настоящее время инструменты "МонАлит" поставляются на многие предприятия, в частности на "ЛЗОС" г. Лыткарино, ОАО "НИИ НПО им. М.Ф. Стрельмака", "Полюс" г. Москва, "РПЗ" г. Раменское, "Электроприбор" г. Тамбов, "Темп-Авиа" г. Арзамас и др.

Важным аспектом в комплексной технологии прецизионной алмазной обработки оптических и механических элементов является создание прецизионного технологического оборудования с числовым программным управлением, соответствующим всем требованиям потребителей. В докладе "Автоматизированное заготовительное оборудование для оптических цехов" сотрудником РУП "Оптическое станкостроение и вакуумная техника", г. Минск, Республика Беларусь кандидатом технических наук Дорошкевичем А.Г. подробно рассказано о разработанной гамме оптического оборудования, адаптированного под требования оптических предприятий, работающих в условиях рыночной экономики.

Интересным и содержательным был доклад Гречишникова В.А., заслуженного деятеля науки РФ, профессора, доктора технических наук, заведующего кафедрой "Инструментальная техника и компьютерное моделирование" Московского государственного технологического университета "Станкин". Владимир Андреевич представил конструкции концевых фрез, оснащённых универсальными режущими элементами из СТМ для обработки пазов, уступов, расточки отверстий для обработки наружных и внутренних мелкоразмерных резьб и другие виды алмазных инструментов. Очень подробно изложены закономерности влияния расположения инструмента относительно обрабатываемой детали, условий резания на длительность эксплуатации инструмента и точностные параметры изготовленных деталей. Широкая гамма алмазного инструмента, разработанная на кафедре, руководимой Гречишниковым В.А. МГТУ "Станкин" определяет высокий уровень разработок алмазного инструмента для нужд предприятий и организаций-изготовителей механических деталей.

В докладе "Технология заточки и исследование качества прецизионных резцов из СТМ" Захаревича Е.М., руководителя ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва представлена информация о научно-производственном направлении по разработке сверхточных станков и технологии обработки прецизионных деталей машин и приборов различного назначения.

Все представленные секционные доклады были не менее содержательны и отражали многие направления развития технологий прецизионной обработки оптических и механических элементов. Всего заслушано 32 доклада участников конференции, представляющих ведущие предприятия и организации, университеты Российской Федерации, Республики Беларусь и Украины, которые отражали основные направления деятельности и проблемные вопросы, которые имеют место в их повседневной работе.

На заключительном заседании 31 мая 2013 г. участники конференции отметили:

- 1) высокий научно-технический уровень и практическую ценность представленных докладов;
- 2) слаженную организацию конференции, проводимой на дискуссионных площадках ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева";
- 3) необходимость более тесной работы предприятий и организаций, связанных с прецизионной обработкой оптических и механических элементов с ведущими производителями алмазного инструмента и технологического оборудования;
- 4) необходимость более углублённого исследования закономерностей резания оптических и механических материалов и на их основе создание теоретических моделей формообразования оптических поверхностей и автоматизированного технологического оборудования, обеспечивающего предельные точностные параметры обработки;
- 5) активное участие в конференции молодых специалистов.

В заключении хочу выразить слова благодарности руководству ОАО "Красногорский завод им. С.А. Зверева" за всестороннюю помощь в проведении конференции, а также всем участникам и организациям, принявшим участие в этом несомненно важном и знаковом мероприятии.

# СОВРЕМЕННЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

НОВИКОВ Н.В. - академик НАН Украины, директор ИСМ НАН Украины, ФИЛАТОВ Ю.Д. - доктор технических наук, профессор, зав. лаб. ИСМ НАН Украины

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины

E-mail: almaz@ism.kiev.ua, filatov@ism.kiev.ua

*На основе кластерной модели и физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама обрабатываемого материала описаны закономерности съема обрабатываемого материала и формирования микрорельефа обработанной поверхности. На основе квантово-механической теории рассеяния частиц шлама и частиц износа в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали в процессе полирования рассчитана координатная зависимость высоты микропрофиля обработанной поверхности детали от радиуса круговых зон. Показано соответствие экспериментальной и теоретической кривых микронеровностей профиля полированной поверхности детали из кварца.*

**Ключевые слова:** полирование, частицы шлама, рассеяние частиц, микропрофиль

Оптические детали из стекла, оптических и полупроводниковых кристаллов, оптической керамики и других неметаллических материалов в современном производстве изготавливаются методами алмазно-абразивной обработки. Операции тонкого алмазного (ТАШ) и супертонкого (СТАШ) алмазного шлифования оптических поверхностей (ОП) осуществляются при помощи функционально ориентированных алмазных инструментов со специальной характеристикой и конструкцией рабочего слоя. Заключительная операция полирования, в общем случае, осуществляется в один или два перехода: полирование при помощи инструмента со связанным полиро-

вальным порошком типа Аквапол и химико-механическое полирование (СМП) при помощи нанопорошков в свободном состоянии.

По мнению проф. Цеснека Л.С. проблема формообразования прецизионных оптических поверхностей подразумевает решение, по крайней мере, трех основных задач [1]: изучение механизма съема обрабатываемого материала (интенсивность изнашивания), исследование механизма образования макропрофиля (точность формообразования) и микропрофиля (шероховатость) обработанных поверхностей.

Результаты исследований механизма съема обрабатываемого материала в процессе алмазно-абразивной обработки оптических поверхностей за последние десятилетия позволили объяснить целый ряд теоретических и экспериментальных закономерностей процесса их прецизионного формообразования. При исследовании контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали в процессе полирования ОП решен целый ряд вопросов. Изучен механизм диспергирования частиц шлама и их распределение по размерам, исследованы закономерности формообразования прецизионных поверхностей, разработаны методы управления точностью их формы за счет оптимизации кинематических и режимных параметров процесса и выбора функционально-ориентированных конструкций и характеристик рабочего слоя инструмента, разработаны методики расчета интенсивности съема обрабатываемого материала и компьютерного моделирования микро- и макрорельефа взаимодействующих поверхностей детали и инструмента.

В настоящее время изучено влияние технологических и конструктивных параметров, физико-химических свойств детали, инструмента и смазывающе-охлаждающей технологической среды на эффективность и качество обработки ОП при полировании. Проблема повышения точности формообразования прецизионных поверхностей при финишной обработке за счет управления кинематическими и режимными параметрами процесса обработки и выбора функционально-ориентированных конструкции и характеристики рабочего слоя инструмента традиционно решалась на основе экспериментально-расчетных методов применительно к конкретным деталям. Существовавшие методики расчета интенсивности съема обрабатываемого материала при шлифовании и полировании, как правило, базировались на уравнении Престона (Preston, 1927 г.) и применялись при допущениях и приближениях, правомерных лишь для определенных условий обработки.

Основополагающим моментом в развитии теории формообразования ОП на сегодняшний день является разработка кластерной модели износа взаимопротирающихся поверхностей обрабатываемой детали и полировального инстру-

мента [2-5] и физико-статистической модели образования и удаления частиц обрабатываемого материала (шлама) и частиц износа инструмента в процессе финишной алмазно-абразивной обработки неметаллических материалов [6-7]. Благодаря этим моделям без использования уравнения Престона реализуется возможность расчета интенсивности съема обрабатываемого материала при полировании ОП в зависимости от времени обработки и радиуса круговых зон, то есть определения формы обработанной поверхности и ее эволюции в процессе обработки.

При механической обработке (точение, фрезерование, сверление, шлифование, полирование) твердых тел обязательно происходит съем обрабатываемого материала (убыль массы).

Феноменологический подход позволяет сформулировать основные законы явлений переноса в виде, представленном в табл. 1. Стандартная запись явления переноса следующая: Поток = (коэффициент)  $\times$  (движущая сила). Поток физической величины  $A$  при этом определяется равенством: Поток  $A$  равен результирующему количеству  $A$ , переносимому через единицу площади в единицу времени.

При рассмотрении неравновесных процессов,

*Таблица 1. Феноменологические законы переноса*

Процесс	Поток	Градиент	Коэффициент переноса	Закон
Диффузия	Частицы	$\frac{dn}{dz}$	Коэффициент диффузии $D$	$J_n = -D \text{grad}(n)$
Тепло-проводность	Энергия	$\frac{dw}{dz}$	Коэффициент теплопроводности $\lambda$	$J_u = -\lambda \text{grad}(T)$
Вязкость	Импульс	$m \frac{dv}{dz}$	Коэффициент вязкости $\eta_T$	$J_p = -\eta_T \text{grad}(v)$
Электро-проводность	Заряд	$\frac{d\phi}{dz}$	Проводимость $\sigma$	$J_q = -\sigma \text{grad}(\phi)$
Износ (съем) материала	Масса	$\frac{dP}{dz}$	Коэффициент износа $X$	$J_m = -X \text{grad}(P)$

$n$  - число частиц в единице объема,  $w$  - средняя тепловая энергия единицы объема,  $m$  - масса частицы,  $T$  - температура,  $z$  - координата,  $V$  - скорость,  $\rho$  - импульс,  $\phi$  - электростатический потенциал,  $q$  - электрический заряд.

обычно, вводят понятие о локальном равновесии, согласно которому при неравновесном состоянии системы в целом, ее отдельные микроскопические части находятся в квазиравновесном состоянии, которое характеризуется медленным изменением термодинамических параметров, как в пространстве, так и во времени. Состояние элементарного объема в момент времени  $\tau$  в точке с координатами  $\vec{r}$  описывается локальной энтропией  $s = s[U, \vec{r}, \tau]$ , которая выражается основным уравнением неравновесной термодинамики Гиббса (рис. 1) [6]:

$$Tds = dU + pdv - \sum_i \mu_i dc_i.$$

При этом энтропия неравновесной системы и скорость производства энтропии определяются

уравнениями:  $S_n = \int_V \rho s dV$  и  $\sigma_s = \sum_i J_i X_i$ , (где

$X_i = \frac{\partial(\rho s)}{\partial a_i}$  - термодинамические силы;  $J_i = \frac{\partial a_i}{\partial \tau}$  - термодинамические потоки.

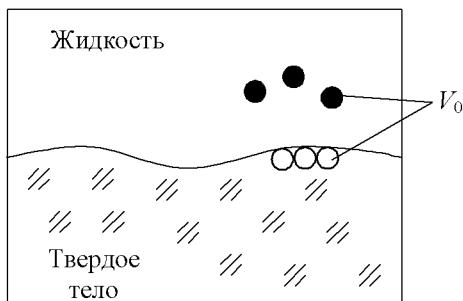


Рисунок 1.  
Элементарный объем системы

Термодинамические силы и потоки связаны между собой линейным законом  $J_i = \sum_k L_{ik} X_k$ , в котором кинетические коэффициенты  $L_{ik}$  в области линейности неравновесных процессов удовлетворяют соотношениям взаимности Онсагера  $L_{ik} = L_{ki}$  [6].

Кинетические коэффициенты  $L_{ik}$  при  $i = k$  определяют прямые явления переноса (табл. 1), а при  $i \neq k$  - сопряженные. К сопряженным процессам относятся такие, при которых градиент одной термодинамической силы обуславливает возникновение нескольких термодинамичес-

ких потоков или термодинамический поток определяется несколькими градиентами термодинамических сил. Процесс съема материала с обрабатываемой поверхности при взаимодействии с инструментом можно рассматривать по аналогии с известными процессами, такими как термодиффузия, термоэлектрические явления, термомеханический и механокалорический эффекты. Съем материала с обрабатываемой поверхности твердого тела происходит в результате деформации его поверхности и сопровождается отрывом частиц шлама (потеря массы), генерацией и распространением в контактирующих телах тепла (теплопроводность), трибоэлектрическими (эмиссия электронов), трибооптическими (триболюминесценция), механохимическими (разрыв химических связей, образование свободных радикалов и дефектов структуры) и другими явлениями [6].

При анализе термодинамических сил, которые при необратимых процессах выражаются через градиенты температуры  $T$  (теплопроводность

$X = -\frac{\nabla T}{T}$ ), электрического потенциала  $\varphi_e$  (электропроводность  $X = -\nabla \varphi_e$ ) и электрохимического потенциала  $\mu$  (диффузия, поток частиц

$X = -T \cdot \nabla \left( \frac{\mu}{T} \right)$ ), можно считать, что при съеме материала с обрабатываемой поверхности соответствующие термодинамические силы пропорциональны градиенту напряжений  $T_n$ :  $X = -\alpha \nabla T_n$  или градиенту давления  $P$ :  $X = \alpha \nabla P$ . Исходя из принципа Кюри, согласно которому термодинамическая сила не может вызвать потоки, имеющие другую тензорную размерность, целесообразно рассматривать свертку тензоров напряжений ( $T_n = \sum_{j=k}^n T_{n,k}^j$ ) и давления ( $P = \sum_{j=k}^n P_k^j$ ).

С учетом вышеуказанного для термодинамического описания процесса съема материала с обрабатываемой поверхности на основе феноменологических уравнений соответственно для потоков энергии  $\vec{J}_1$ , частиц  $\vec{J}_2$ , заряда  $\vec{J}_3$  и импульса  $\vec{J}_4$  в общем виде (с учетом определения потоков и сил) можно записать:

$$\begin{aligned}\vec{J}_1 &= -\frac{1}{T} L_{11} \nabla T - \alpha L_{12} \nabla T_n - TL_{13} \nabla \left( \frac{\mu}{T} \right) - L_{14} \nabla \varphi, \\ \vec{J}_2 &= -\frac{1}{T} L_{21} \nabla T - \alpha L_{22} \nabla T_n - TL_{23} \nabla \left( \frac{\mu}{T} \right) - L_{24} \nabla \varphi, \\ \vec{J}_3 &= -\frac{1}{T} L_{31} \nabla T - \alpha L_{32} \nabla T_n - TL_{33} \nabla \left( \frac{\mu}{T} \right) - L_{34} \nabla \varphi, \\ \vec{J}_4 &= -\frac{1}{T} L_{41} \nabla T - \alpha L_{42} \nabla T_n - TL_{43} \nabla \left( \frac{\mu}{T} \right) - L_{44} \nabla \varphi,\end{aligned}\quad (1)$$

Из анализа системы уравнений (1) следует, что при  $\nabla T = 0$ ;  $\nabla \varphi = 0$ ;  $\nabla \mu = 0$ , энергия переноса выражается уравнением  $U^* = \lambda T / \xi$  (в Дж/кг), в котором  $\xi = \rho \eta$  - коэффициент массового износа ( $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ ),  $\eta$  - коэффициент объемного износа ( $\text{м}^2/\text{с}$ ),  $\rho$  - плотность обрабатываемого материала ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности ( $\text{Вт}/(\text{мК})$ ),  $T$  - температура ( $K$ ).

Мощность  $N$ , затрачиваемая на удаление обрабатываемого материала (поток энергии), и производительность съема  $Q$  ( $\text{кг}/\text{с}$ ) (поток массы) определяются формулами:

$$N = - \left[ \lambda \nabla T + \frac{\xi}{\rho_1} \nabla P \right] S, \quad Q = - \left[ \frac{\xi \cdot \nabla T}{T} + \frac{\xi}{\rho_1} \frac{\nabla P}{U^*} \right] S,$$

где  $S$  - площадь обрабатываемой поверхности.

Объем удаленного при механической обработке материала определяется как сумма всех частиц шлама с учетом их концентрации

$$V(\tau) = \sum_i V_{0i} c_i(z, \tau) \Big|_{z=z_0}$$

(где:  $V_{0i}$  и  $c_i(z, \tau)$  - объем и концентрация  $i$ -х частиц шлама,  $z_0$  - координата, определяемая законом движения границы раздела инструмент - обрабатываемая поверхность).

Концентрация частиц шлама может быть определена на основе обобщенной модели изнашивания поверхности твердого тела в процессе трения (механообработки), которая состоит в следующем.

1. Кластерная модель износа - поверхность твердого состоит из кластеров, которые при взаимодействии с поверхностью контроллера превращаются в частицы износа.

2. Элементарные акты образования частиц износа представляют собой марковскую цепь.

3. Плотность вероятности образования частиц износа (шлама) удовлетворяет уравнению Фоккера-Планка

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} (Af_w) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} (Bf_w),$$

где:  $A(z, t) = k_1(z, t)$ , и  $B(z, t) = k_2(z, t)$  - кинетические коэффициенты,  $f_w$  - вероятность образования частиц износа.

4. При изменении деформированного состояния поверхности твердого тела кластеры переходят из связанного состояния в свободное (образование частицы износа). Закон движения поверхности перехода (границы раздела инструмент - обрабатываемая деталь, рис. 2):  $z = \alpha^* \sqrt{t}$  ( $\alpha^*$  - некоторая постоянная).

5. Масса  $\rho dS \Delta Z$  удаляется с поверхности, а выделяемая энергия расходуется на образование

поверхности частиц износа  $W_d = \sigma_p \sum_i^n S_i$  ( $n$  - число частиц износа,  $S$  - площадь поверхности  $i$ -ой частицы,  $\sigma_p$  - поверхностная энергия).

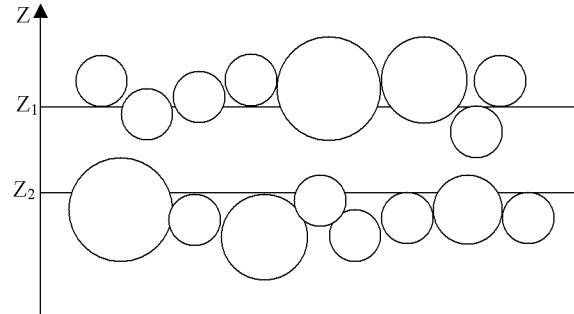


Рисунок 2.  
Схема поверхности перехода

6. Из решения задачи Стефана при начальных и граничных условиях:

$c_{i1}(t=0) = 0$ ,  $c_{i2}(z=0) = n_{0i}$  следует уравнение для концентрации частиц износа:

$$c_i(z, t) = n_{0i} - \frac{n_{0i}}{\operatorname{erf}(\frac{\alpha}{2\sqrt{\eta_i \cdot t}})} \cdot \operatorname{erf}(\frac{z}{2\sqrt{\eta_i \cdot t}}),$$

где  $c_{i1}$  и  $c_{i2}$  - концентрации кластеров в свобод-

ном и связанном состоянии,  $n_{0i}$  - концентрация  $i$ -х частиц на поверхности,  $\eta_i$  - коэффициенты объемного износа  $i$ -х частиц.

Коэффициенты  $\eta_i$  зависят от размеров частиц износа  $d_i$  и времени контакта  $\tau_c$  в соответствии с формулой  $\eta_i = d_i^2 / 4 \beta_i^2 \tau_c$  и определяются корнями  $\beta_i$  трансцендентных уравнений:

$$\frac{\exp[-\beta_i^2]}{\sqrt{\pi} \operatorname{erf}[\beta_i]} = \frac{L_t \sqrt{S_k}}{n_{0i} S_i} \sqrt{\vartheta},$$

где  $L_t$  - длина пути трения элемента поверхности детали по рабочей поверхности инструмента,  $S_k$  - площадь контакта инструмента и детали;

$$\vartheta = \frac{\lambda T L_t}{p_a u S_k} - \text{безразмерный параметр.}$$

Функциональная связь между производительностью съема обрабатываемого материала  $Q$  и параметрами модели изнашивания

$$(L_t, \lambda, T, p_a, u, n_{0i}, S_i)$$

илюстрируется схемой, приведенной на рис. 3.

Производительность съема обрабатываемого материала при полировании неметаллических материалов с ростом безразмерного параметра  $\vartheta$  уменьшается (рис. 4). Зависимость производительности полирования неметаллических материалов (НМ) от параметра  $\vartheta$  можно аппроксимировать экспоненциальной функцией:  $Q(\vartheta) = Q_0 \exp(-\gamma \vartheta)$  (где  $Q_0 = 0,55$  мкм/мин,  $\gamma = 1,13$ , погрешность не более 30 %).

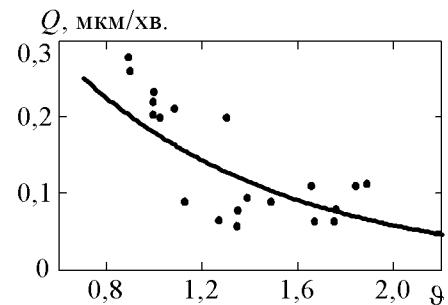


Рисунок 4.  
Зависимость производительности полирования неметаллических материалов от безразмерного параметра

Параметр  $\vartheta$  (коэффициент переноса) показывает, какая часть механической работы  $W_m$ , затраченной на диспергирование обрабатываемого материала, затрачивается на удаление частиц шлама с обрабатываемой поверхности, а его отношение к коэффициенту трения  $k$  определяется

уравнением  $\frac{\theta}{k} = \frac{U_\Sigma^*}{W_m}$  ( $U_\Sigma^*$  - полная энергия переноса).

Процессы финишной обработки НМ в рамках модели изнашивания твердых тел при трении характеризуются показателями, приведенными в табл. 2-3.

При исследовании закономерностей взаимодействия частиц шлама в зоне контакта инструмента и обрабатываемой поверхности на основе физико-статистической модели образования и удаления частиц шлама в процессе шлифования и классической теории рассеяния частиц изучены особенности механизма формирования микроре-

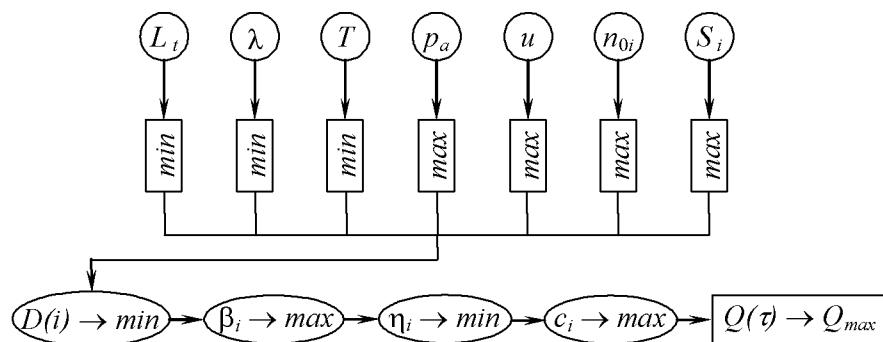


Рисунок 3.  
Функциональная связь между производительностью съема обрабатываемого материала и параметрами модели

Таблица 2.

Параметры массопереноса при финишной алмазно-абразивной обработке неметаллических материалов

Операция	Коэффициент массового износа $\xi$ , кг/(м·с)	Энергия переноса $U^* \cdot 10^{-9}$ , Дж/кг
ТАШ	$4,10 \cdot 10^{-5}$	0,01
СТАШ	$7,25 \cdot 10^{-6}$	1,34
Полирование	$3,60 \cdot 10^{-8}$	10,10

льефа обрабатываемой поверхности при шлифовании [7-9]. Установлено, что в результате хрупкого разрушения поверхностного слоя в точках пересечения царапин, наносимых отдельными алмазными зернами, формируется поверхность с равновесной шероховатостью и образуются частицы шлама. Затем микрорельеф поверхности изменяется вследствие износа наибольших выступов шероховатой поверхности за счет эрозионного действия потока частиц шлама, а шероховатость поверхности, особенно в центральной зоне, может значительно уменьшиться (по параметру  $R_a$  до 1,5 раза).

Исходя из кластерной модели износа [2-5], показано, что при полировании  $\text{SiO}_2$  накопление энергии в критическом объеме обрабатываемого материала - кластере происходит до тех пор, пока его энергия  $E_{cl}$  не превысит энергию связи

$E_b$ , т.е. материал может отделиться в виде частицы шлама только при  $E_{cl} > E_b$ . Распределение частиц шлама по размерам описывается распределением Пуассона с параметром  $v = E_b/E_{cl}$ , а вероятность образования частиц шлама пропорциональна  $\exp(-v)$ . На рис. 5 представлена зависимость производительности полирования неметаллических материалов: оптического стекла (○), природных (■ - амазонит, обсидиан, яшма, гранит, габбро) и синтетических (□ - керамический гранит Kentaur (Чехия), Mirage (Италия) и Pamesa Ceramica (Испания)) кремнеземодержащих материалов от энергии связи. Экспериментальные результаты и данные Командури [10] (●) и Гильмана [11] (◆) представлены в относительных единицах (по отношению к оптическому стеклу марки К8 и ВК7). Эта зависимость, приведенная в полулогарифмическом масштабе, аппроксимирована линейной функцией (погрешность - 15%), что подтверждает активационный характер процесса съема обрабатываемого материала и экспоненциальную зависимость производительности полирования от энергии связи.

В результате исследования шероховатости поверхностей деталей из неметаллических материалов после полирования инструментом со связанными полировальными порошками диоксида церия и оксида алюминия было установлено, что экспериментальные значения параметра шероховатости  $R_a$  линейно зависят от расчетных ве-

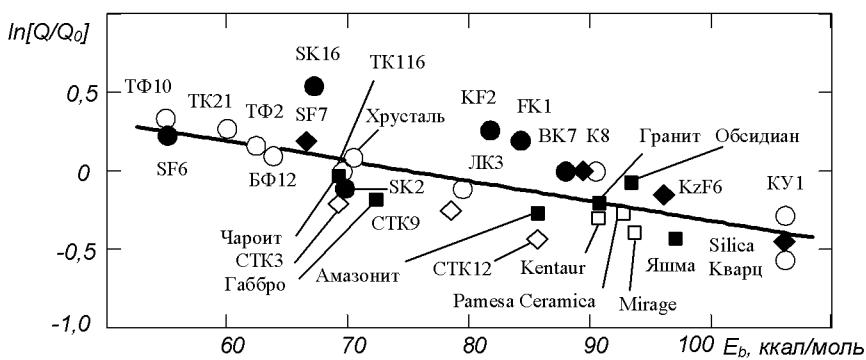


Рисунок 5.  
Зависимость производительности полирования неметаллических материалов от их энергии связи

Таблица 3.  
Таблица 3. Коэффициент объемного износа, интенсивность съема

Операция	Коэффициент объемного износа $\eta$ , $\text{м}^2/\text{с}$	Интенсивность износа (съема) материала (ГОСТ 27674-88) $I$	Шероховатость $R_a$ , мкм
ТАШ	$5,38 \cdot 10^{-9}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$	0,68
СТАШ	$3,76 \cdot 10^{-9}$	$4,38 \cdot 10^{-6}$	0,16
Полирова- ние	$1,37 \cdot 10^{-11}$	$4,80 \cdot 10^{-9}$	0,01
Алмазное микроточе- ние (AM)	$3,60 \cdot 10^{-11}$	$4,50 \cdot 10^{-9}$	0,01

личин наиболее вероятного размера  $a_v$  частиц шлама, что обусловлено прямо пропорциональной зависимостью шероховатости от числа молекулярных фрагментов. Кроме того, установлено, что чем меньше отличаются частоты собственных колебаний молекулярных фрагментов  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$ , то есть чем ближе к единице величина их отношения  $\beta = \omega_{01}/\omega_{02}$ , тем выше значение  $R_a$ . На рис. 6 приведена зависимость параметра шероховатости  $R_a$  от отношения частот собственных колебаний фрагментов на поверхностях инструмента и обрабатываемого материала ( $\circ$  - экспериментальные значения,  $\bullet$  - значения параметра шероховатости поверхности кварцевого стекла марки КУ, рассчитанные по формуле  $R_a = 0,06a_v$ ).

Анализируя полученную зависимость, мож-

но заключить, что при уменьшении разности частот собственных колебаний фрагментов на поверхностях инструмента и обрабатываемого материала шероховатость полированной поверхности резко возрастает. Это подтверждает резонансный характер взаимодействия инструмента и обрабатываемого материала при полировании неметаллических материалов.

При исследовании закономерностей взаимодействия частиц шлама и частиц износа инструмента в процессе полирования на основе физико-статистической модели и квантовой теории рассеяния наночастиц изучены закономерности формирования микропрофиля полированной поверхности [12-14].

Функция микропрофиля поверхности определяется вероятностью попадания частицы износа в точку обрабатываемой поверхности детали с координатой  $\rho$ , которая определяется полным сечением рассеяния  $\Sigma_{opt}(\rho)$ , отнесенным к площади ее диаметрального сечения ( $\pi d_2^2/4$ ) и телесному углу  $\Delta\vartheta^2$ , помноженным на величину наиболее вероятного размера частиц шлама  $a_v$ , в

$$Z_1(\rho) = \frac{\Sigma_{opt}(\rho)a_v}{\frac{\pi}{4}d_2^2[\Delta\vartheta(\rho)]^2}.$$

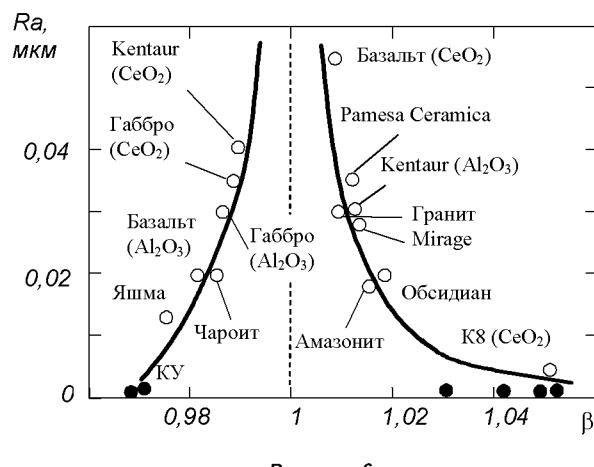


Рисунок 6.

Зависимость параметра шероховатости  $R_a$  от отношения частот собственных колебаний фрагментов на поверхностях инструмента и детали

Функция макропрофиля обрабатываемой поверхности  $Z_2(\rho)$  описывает ее геометрическую форму и определяется режимными и кинематическими параметрами процесса полирования.

Для данных условий формообразования плоской поверхности характерной является выпуклая форма, полученная при помощи оптической измерительной системы "ALICONA", анализ которой позволил аппроксимировать ее частью окружности с радиусом кривизны  $R_0 = 16,2$  м. Профиль обработанной поверхности детали из кварца  $Z_t(\rho)$ , который описывается наложением функций микро- и макропрофиля  $Z_1(\rho)$  и  $Z_2(\rho)$ , в направлении от края детали к центру представлен на рис. 7.

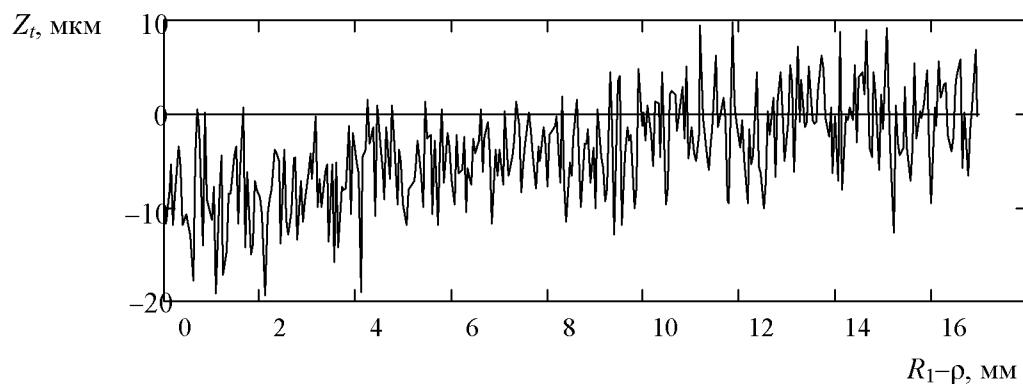
На рис. 8 для сравнения приведены результаты сканирования участка полированной поверхности (вдоль диаметрального сечения в направлении от края детали к центру). Профиль поверхности был зарегистрирован при помощи оптического профилометра с точечным конфокальным лазерным датчиком Stil® с вертикальным разрешением до 10 нм и диаметром пятна 8  $\mu\text{м}$ . Сравнивая теоретическую  $Z_t$  (рис. 7) и экспериментальную (рис. 8) кривые микроне-

ровностей профиля обработанной поверхности, можно отметить их хорошее соответствие, подтверждающее правомерность результатов, полученных на основе квантово-механических расчетов.

Дальнейшее развитие теории формообразования прецизионных оптических поверхностей, по-видимому, будет осуществляться путем ее распространения на более широкую гамму обрабатываемых материалов, обобщения на все переходы шлифования и полирования, а также рассмотрения и учета механо-химических и механоэлектрических явлений, которые непременно происходят в процессе финишной обработки.

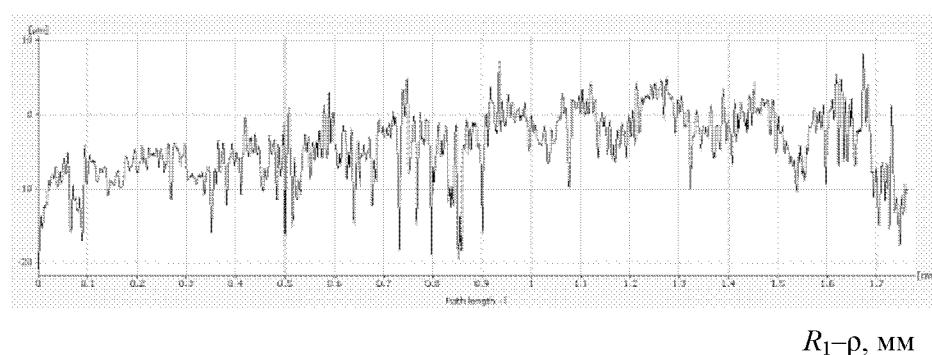
#### Список литературы:

1. Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей. - М.: Машиностроение. - 1979. - 264 с.
2. Филатов Ю.Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полиро-



*Рисунок 7.  
Расчетный профиль обработанной поверхности детали из кварца*

$Z_e$ , мкм



*Рисунок 8.  
Экспериментальная кривая микронеровностей профиля поверхности*

- вальным порошком // Сверхтв. материалы. - 2001. - № 3. - С. 36-49.
3. Rogov V.V., Filatov Y.D., Kottler W., Sobol V.P. New technology of precision polishing of glass optic // Optical Engineering. - V. 40, august 2001. - P. 1641-1645.
4. Филатов Ю.Д., Рогов В.В. Кластерная модель механизма усталостного износа SiO<sub>2</sub>-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия. Часть 1 // Сверхтв. материалы. - 1994. - № 3. - С. 40-43.
5. Филатов Ю.Д. Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтв. материалы, № 1, 2008.- С. 59-66.
6. Филатов Ю.Д., Сидорко В.И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Сверхтв. материалы. - 2005. - № 1. - С. 58-66.
7. Филатов Ю. Д. Теоретические основы финишной обработки высококачественных прецизионных оптических поверхностей // Сб. Международной Академии КОНТЕНАНТ. - декабрь 2009. - С. 19-30.
8. Novikov M., Sidorko V., Filatov Y. Diamond-abrasive finishing nonmetallic materials // Conference Proceedings of International Conference "Advanced Processing for Novel Functional Materials - APNFM 2008". - 23-25 January 2008. - P. 141-143.
9. Филатов А.Ю., Сидорко В.И., Филатов Ю.Д. Особенности формирования макро- и микрорельефа плоских поверхностей деталей из неметаллических материалов при алмазном шлифовании // Сверхтв. материалы, 2007, № 6. - С. 48 - 57.
10. Komanduri R., Lucca D.A., Tani Y. Technological Advances in Fine Abrasive Processes / Annals of the CIRP. - 1997. - No 46/2. - P. 545-596.
11. Gillman B.E and Jacobs S.D. Bound-abrasive polishers for optical glass // Appl. Opt. - V. 37, No. 16. - June 1998. - P. 3498-3505.
12. Влияние рассеяния частиц износа инструмента в контактной зоне на формирование микропрофиля обработанной поверхности при полировании кварца / Филатов Ю.Д., Филатов А.Ю., Сирота О.О., Ящук В.П., Монтеи Г., Хайзель У., Сторчак М. // Сверхтв. материалы, 2010, № 6. - С. 68-77.
13. Boundabrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials / Filatov Y.D., Filatov O.Y., Monteil G., Heisel U., Storchak M.G. // Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XI; and Advances in Thin Film Coatings VI, Proc. of SPIE, Vol. 7786, P. 778613-9 (2010).
14. Boundabrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials / Y.D. Filatov, O.Y. Filatov, G. Monteil, U. Heisel, M.G. Storchak // Optical Engineering. Vol. 50, Issue 6, P. 063401-063401-7 (2011).

# **АНАЛИЗ РЫНКА АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СЕГМЕНТА АЛМАЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА ГУП "НПО "ОПТИКА" И ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТРАСЛИ ПОКУПНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**

ГЛУХОВ Ю. А., ПОДОБРЯНСКИЙ А. В. - кандидат технических наук

Открытое акционерное общество "Научно-производственное объединение «Оптика», Москва

E-mail: glyual2002@mail.ru

*В статье рассматриваются тенденции на мировом рынке алмазных порошков и алмазного инструмента полной готовности различных типов, их стоимости.*

*Рассмотрено также: технология классификации алмазных минипорошков, фирмы поставщики алмазного инструмента для различных технологических операций изготавления оптических элементов.*

**Ключевые слова:** алмазные порошки, алмазные инструменты

## **1. ОБЩИЙ АНАЛИЗ РЫНКА**

### **1.1. Текущее состояние мирового рынка алмазного инструмента**

Рынок промышленного алмаза растет на 10 - 15% в год и синтетический алмаз занимает более 95% рынка промышленного алмаза.

Отдельные виды инструментов с искусственными алмазами до восьми раз дешевле аналогичных из природного материала. Преимущество синтетических минералов состоит еще и в том, что их можно выпускать с заданными характеристиками (например, с большей, чем у натуральных алмазов, прочностью, теплопроводностью, теплостойкостью и т.п.).

Китай становится крупнейшей страной - производителем синтетических алмазов в мире.

Выход Китая в 2010 году превышает 7 млрд карат. Это составляет более 90% мирового производства. Ежегодные темпы увеличения почти на 20% за последние 10 лет. Алмаз Китая экспортируется в 58 стран и регионов в 2009 году. Среднегодовой прирост экспорта составляет около 30% за последние 10 лет. Основные причины такого роста поддерживаются:

1) непрерывным усовершенствованием, внесенным в технологию синтеза алмазов (в результате качество становится все лучше)

2) конкурентоспособные цены (средняя цена составляет около \$ 0,05 за карат в 2009 году, что определяет необходимость для мировых пользователей обращаться к китайским алмазам). Алмазные производители в западных странах занимаются выращиванием более доходных продуктов, таких как алмазные пластины PCD и PCBN. [1]

### **1.2. Производство алмазных порошков и инструмента в России**

В настоящее время производство алмазных порошков в России имеет годовой объем около 80 млн карат и не является сбалансированным с потребностями внутреннего рынка. Основную долю (до 95 %) составляют высокоабразивные низкопрочные порошки марок AC2 - AC6, которые, в основном, используются для изготовления абразивного инструмента на органических связках. Такой инструмент пригоден лишь для определенных целей, например, заточки твер-

дого сплава и не является универсальным. В то же время Россия закупает по импорту практически все алмазные порошки марок AC32 - AC200 для изготовления отечественного инструмента закупаются по импорту. Да и сам инструмент на 90% - импортный. То же можно сказать о микропорошках для инструмента для ТАШ: поликристаллические микропорошки с режимов синтеза AC2 - AC20 не годятся, а требуемые монокристаллические микропорошки, которые раньше производил ПЗАИ, стали импортными.

Резкое падение объемов промышленного производства в РФ, начавшееся в 1991 г., привело к снижению потребности и, соответственно, снижению производства алмазного инструмента. Наиболее низкие объемы производства были в 1998 г. В 2002 г. производство алмазного инструмента к уровню 1990 г. составило 18,9 %.

В самой России изготавливается инструмент с общим содержанием алмаза 13,1 млн. карат (2000 год). Годовой темп роста в данной области производства составил 10%. Возникло много мелких фирм, изготавлиющих несложный алмазный инструмент по технологиям 50-х годов. О большом внимании индустриально развитых стран к сверхтвердым материалам, свидетельствует тот факт, что в настоящее время ведущие промышленно развитые страны (США, Япония, Германия, Англия, Италия, Франция) используют до 80% всех добываемых природных и производимых синтетических алмазов. При этом одной из основных областей применения СТМ является машиностроение, метало- и камнеобработка. В этих отраслях используется около 70% общего объема производства СТМ.

В качестве примера можно привести структуру потребления технических алмазов и алмазного материала в промышленности США:

Машиностроение .....	35
Буровой инструмент .....	18
Камнеобработка, стройиндустрия .....	27
Производство абразивов .....	15
Прочие .....	5
Структура производства алмазных порошков: низкопрочные порошки для шлифовального инструмента на органических и гальванических связках .....	15... 20

среднепрочные порошки для инструмента на металлических связках ..... 30...35  
высокопрочные и термостойкие порошки для инструмента на металлических связках ... 45...50

По выпускаемой номенклатуре промышленные синтетические алмазы можно разделить на следующие группы: режущие алмазы типа SDA (классификация "Де Бирс") для производства камнеобрабатывающего инструмента; шлифпорошки типа "металбонд" (AC32 - AC80); шлифпорошки типа "резинбонд" (AC2 - AC20); микро- и субмикропорошки; поликристаллы и композиты, в том числе двухслойные "алмаз - твердый сплав"; крупные монокристаллы алмазов (до 10 карат); моно- и поликристаллические алмазные и алмазоподобные пленки. [2]

Динамика цен на алмазные порошки имеет тенденцию к снижению за счет применения новых технологий, прежде всего в Китае.

За тридцать лет они снизились в долларовом выражении едва ли не в 50 раз (на самом деле если учесть, что за эти годы покупательная способность доллара значительно упала, то это уменьшение еще значительнее, и достигает 200 раз). Стоимость одного из самых ходовых алмазных порошков AC65 400/315 в 2000 г. составляла 0,43 \$/карат, сейчас 0,24 \$/карат

С объемами потребления связаны и объемы разработок по алмазному инструменту и технологии шлифования. Количество разработок по шлифованию связанным абразивом по странам представлено в табл. 1.

Объемы разработок можно оценить и по количеству ссылок в Интернете:

запрос в англоязычном поисковике на сверхактуальные темы "Nanogrinding of optical Glass" или "Damage-Free Processing of Silicon Carbide Optics" даст от 1 тыс до 1 млн ссылок, среди которых не будет ни одной отечественной разработки.

### **1.3. Годовая потребность оптической промышленности в алмазном инструменте для обработки стекла**

Интерполируя годовую потребность одного предприятия на потребность около 15 предприятий с аналогичным по профилю и объему производством, можно оценить потребность отрасли в алмазном инструменте (табл. 2).

Таблица 1.

<b>Азия, тихоокеанский регион</b>		<b>Европа</b>		<b>Америка</b>	
Австралия	12	Греция	2	Бразилия	16
Гонконг	3	Голландия	2	Канада	6
Индия	4	Ирландия	2	США	58
Япония	49	Италия	3	<b>Всего</b>	<b>80</b>
Корея	5	Польша	4		
Малазия	1	Германия	79		
Китай	38	Россия	4		
Тайвань	1	Словения	3		
Сингапур	2	Испания	7		
<b>Всего</b>	<b>115</b>	Швеция	2		
		Швейцария	2		
		Турция	2		
		Украина	1		
		Австрия	1		
		Бельгия	2		
		Чехия	5		
		Великобритания	36		
		<b>Всего</b>	<b>157</b>		
				<b>Всего</b>	<b>352</b>

## 2. ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

### 2.1. Технология изготовления сборного инструмента

Фирмы, изготавливающие алмазный инструмент для обработки стекла и камня все чаще используют сборный инструмент взамен прессованного. Это относится к кругам 1A1, фасонным фрезам, пилам диаметром свыше 100 мм, сверлам диаметром свыше 25 мм. Это позволяет не прибегать к пресс-формам больших размеров, улучшает качество инструмента за счет лучшей пропрессовки связки, улучшает условия резания за счет прерывистости режущей кромки, обеспечивающей лучшие условия охлаждения. Применение сборных сверл позволяет уменьшить номенклатуру прессформ, изготавливать инструменты большого размера (до 500 мм и более), улучшает условия вымывания шлама из зоны резания. Применение сборного инструмента существенно снижает затраты на восстановление инструмента за счет перепайки алмазных эле-

ментов (брюсков, сегментов, колец) на старые корпуса.

Применение этой технологии стало возможным благодаря современным методам пайки, обеспечивающим прочность соединения выше, чем прочность материала корпуса и связки.

### 2.2. Изготовление инструментов полной готовности

Отечественные производители, как правило, поставляют не готовые к работе инструменты, а полуфабрикаты: кольца, коронки сверл, алмазные грибы и чашки, которые надо снабдить корпусом с соответствующими станку присоединительными размерами, закрепить на этом корпусе (припаять, приклейте), править (размеры, биение), балансировать. Весь этот набор операций требует соответствующего оборудования, трудоемок, чаще всего не выполним в условиях небольших оптических производств.

Конкурентным преимуществом зарубежных фирм - производителей инструмента является то, что они поставляют инструмент полностью

Таблица 2.

Вид инструмента	Операция	Потребность		Алмаз	Связка	Размеры, мм	Стоимость \$ USA		
		штук	карат				Представитель	Цена	Итого
Круги формы 2A2	Сферофрезерование	2400	22500,0	ACM AC65	M2 - 01	10 - 65	50x4x5	10,0	24000,0
Круги отрезные формы 1A1R ГОСТ 10110-87	Распилывание заготовок ОД	300	9000,0	AC32 250/200 400/315	M2 - 01	100 - 400	300x1,2	50,0	15000,0
Элементы сферические и конические для фасетирования	Ручное фасетирование	1000	45000,0	ACM 28/20 40/28	M2 - 01	10 - 140	30 x 5	20,0	200000,0
Элементы алмазные для тонкого шлифования	ТАШ плоскости и сферы	225000	22500,0	ACM 28/20, 20/14	M3-15-1 МНП-1	10 - 14	14x5	0,3	67500,0
Алмазные сферические шлифовальники	ТАШ сферы	2250	3500,0	ACM 28/20 14/10	M3-15-1 М3-15-4	12 - 46	20 x 5	8,0	18000,0
Круги алмазные фасонные для фрезерования	Фрез., фасонных поверхностей призм	300,0	2000,0	ACM 40/28	Гальван.	50,0	50 x 10	30,0	9000,0
Круги алмазные для станков LZ-80 и LZ-25	Центрирование	20	700,0	ACM 40/28	Гальван.	100 и 160	160 x 20	100,0	2000,0
Круги прессованные для центрировочных станков	Центрирование	200	40000,0	ACM 40/28	M2-01	100, 160x200	160 x 20	80,0	16000,0
Коронки для сверл	Сверление	1000	2000,0	AC65 80/63	M2-01	6 - 100	50 x 1,5 x 5	15,0	15000,0
Круги и планшайбы алмазные заливные для обработки плоскостей	Фрезерование и шлифование плоскостей	250	22000,0	AC65 250/200 ACM 28/20	M2 - 01	168 - 566			
Пластины для их нагревания		10000	22000,0				20x2x10	4,0	40000,0
	Итого, караг		167200,0						211500,0
В том числе пригодные для изготовления НПО		93000					USA		155500,0

Заливкой выделены позиции, которые могут изготавливаться "НПО "Оптика" в настоящее время

готовый к установке на станок и работе. Особенno это важно для современных прецизионных и скоростных станков, где требования к точности посадочных мест инструмента достигают 6-го квалитета, по балансировке - соответствуют или превышают требования 1-ого класса.

### **2.3. Технология классификации алмазных микропорошков**

Часть микропорошков по результатам микроскопического анализа или испытаний может иметь закрупнения, которые иногда можно удалить дополнительной классификацией. Для переработки тех количеств алмаза, которые необходимы для инструмента ТАШ в год - 26000 карат (см. табл. 3), при этом не весь алмаз потребует классификации, нет необходимости в промышленных технологиях классификации. Ряд заводов (ЛЗОС, АОМЭ) используют классификацию с сливными сифонами в емкостях до 0,5 литра. При этом в качестве рабочей жидкости применяются спиртоглицериновые растворы разной концентрации в зависимости от размера классифицируемого зерна. Таким образом классифицируются микропорошки от ACM 10/7 до ACM 28/20.

## **3. СТРУКТУРА ПРЕДЛОЖЕНИЯ НА РЫНКЕ АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА**

### **3.1. Производители алмазного инструмента**

Сегодня алмазное сырье для производства инструмента в основном поставляются по импорту (Дженерал Электрик, США, Элемент 6 Исландия). Для изготовления инструмента для обработки оптики импорт порошков составляет 100%. Шихтовые материалы для изготовления связок - металлические порошки, полимерные порошки, резины - отечественного производства. Фирма "Интехдиамант" поставляет готовые смеси порошков для современных связок.

В настоящее время в России имеется несколько достаточно крупных производств по изготовлению отдельных модификаций и позиций алмазного инструмента. Это, прежде всего, МПО по ВАИ, АО "Терекалмаз" (г. Терек, Республика Кабардино-Балкарская); ОАО "Алмазинструмент" (г. Рославль); АООТ Абразивный завод "Ильич" (г. Санкт-Петербург) и ОАО

"Веал" (г. Венев Тульской области).

В Москве и Московской области имеется несколько небольших узкоспециализированных производств. Это - ЗАО "Кристалл ЛТД", ЗАО "Кермет", ФГУП "НПО "Оптика", ГНПП "Темп", ЗАО "Грань-91", ТОО "Вя-тич" и др. Аналогичные или близкие по профилю и объемам продукции предприятия имеются в Новосибирске, Кемерове, Крымске, Чебоксарах, Перми. Каждое из них с большим или меньшим успехом пытается закрепиться на рынке по отдельным модификациям или типажу. Объемы производства у таких фирм незначительны, но в своей совокупности эти организации, особенно в "своих" регионах, могут частично занимать отдельные ниши на рынке инструмента.

Предприятия - поставщики инструмента и алмазных порошков значительно отличаются по ценам на предлагаемую продукцию. Иногда это связано с тем, что поставщики перепродают импортную продукцию, иногда - просто переходят. Английский принцип дороже - значит лучше, здесь не действует. Представление об уровне цен на инструмент дает табл. 3. Следует запрашивать или проверять характеристики инструмента, так как при разнице в цене в 2 - 3 раза ресурс инструмента может отличаться в 5-10 раз. А может и не отличаться ...

### **3.2. Стоимость инструмента по фирмам-поставщикам в \$ USA (см. табл. 3)**

### **3.3. Анализ дистрибуции на рынке алмазного инструмента**

В связи с нерентабельностью производства алмазного инструмента собственными силами, из-за малых объемов и большой номенклатуры оптические предприятия будут стремиться переходить на покупной инструмент.

Отмиранию собственного производства противодействует то, что предприятия, изготавливающие алмазный инструмент, не заинтересованы в выпуске многономенклатурной мелкосерийной продукции по заказам отдельных оптических производств, либо вынуждены перекладывать себестоимость оснастки на выпуск небольшой партии инструмента, что значительно удорожает его. Только централизованное снаб-

Таблица 3.

Инструмент	Сверла алмазные AC32 200/160			Круги сегментные			Круги АОК (1AIR) AC32 200/160 к50			Круги LA1 150Х10Х5			Круг 2A2 50Х4Х5			Элемент алмазный Ø14x5 Ø14x5 0,1 карата
	Ø100	Ø50	Ø12	Ø5	Ø800x5,6	Ø600x4 x7	Ø125x0,8	Ø200x1,2	Ø300x1,2	Ø400x2,2	AC32	125/100	125/100	AC32	125/100	
Фирма					AC65 800/630	AC65 400/315										
МПО ВАИ (Томилино)	3,5						7	10	10	25	40					
ПЗАИ (Полтава)	18,0	10,0	3,3	1,5			5	10				AC15	25,0	4,0		
Адамасс	33,0				299,0							AC6	25	AC6	30,0	
Интехдиамант	72,0					260,0	205,0 (2,21)*									
							Отеч. алмаз и корп.									
							528,0	310,0 (3,35)*				9	15	50	70	61,0
								Имп. алмаз и корп.								
Сплитстон						500,0										
Кермет						693,0						96	147			
Геотехнология									7	12	40	60				
Русатлант		40,0				8,0										
Грань																
ВНИИАЛМАЗ	15,0		8,0	250												
Челк - ЕНВА		45				230 (2,48)*						36,0	78,0	130,0		
Терекалмаз	20,29	8	4,5-		314,0	184,						12,5	36,1	27,39		
НПО «Оптика»																0,35

жение всех предприятий отрасли через фирму, изготавливающую алмазный инструмент (и) или занимающейся его дистрибуцией, позволит увеличить серийность, оптимизировать цены, определиться с составом поставщиков, делающих инструмент наилучшего качества, осуществить подготовку инструмента (сборку на корпусе, вскрытие и правку, балансировку и поставлять инструмент полностью готовый к установке на станок, создать минимальные складские запасы и за счет этого значительно сократить сроки выполнения заказов.

#### Посредники:

1. Принимают на себя риск хранения, снижая риски производителя.

2. Финансируют производителя, потому что платят за товар первыми и генерируют денежные потоки у производителя

3. Берут большие партии товаров и затрачивают средства на их дробление на мелкие части.

4. Упрощают бухгалтерию производителей, которым приходится заниматься с меньшим количеством клиентов; у производителя снижаются издержки, связанные с продажей своего товара.

5. Имеют опыт продаж, логистики и складирования,

6. Ведут обслуживание потребителей, решая эти задачи за производителя.

7. Хранят запасы продукции, что позволяет избежать ее возможной нехватки и сокращают сроки поставки потребителю. Благодаря этому посредники могут продавать товар по ценам производителя.

Статистика показывает, что в себестоимости готовой продукции доля стоимости алмазного инструмента составляет всего 1-3%. Она меньше затрат на полирующие порошки и сравнима с затратами на смолы.

### 3.4. Анализ сегментов рынка

#### 3.4.1. Инструмент для фрезерования ОД.

##### 3.4.1.1. Инструмент для сферофрезерования.

Сферофрезерование по методу "жестких осей" производится кольцевым алмазным инструментом формы 2A2 на металлических связках, например, M2 - 01, с использованием алмазных

порошков AC32 - AC65 зернистостью 200/160 - 50/40 и микропорошков ACM40/28. Диаметры инструментов 6 - 100 мм.

Потребность отрасли (см. табл. 4) примерно в 2400 единиц (22500 карат алмаза в инструменте) удовлетворяется в настоящее время преимущественно (90%) изготовлением инструмента собственными силами оптических предприятий.

На рынке представлен кольцевой инструмент производства ОАО "МПО по ВАИ" (Томилино), ЗАО "Завод Алмазного Инструмента" (Полтава), малые предприятия по выпуску алмазного инструмента.

##### 3.4.1.2. Инструмент для фрезерования плоскостей

Используются круги форм 2A2, 6A2, 6A2T как цельнопрессованные, так и сборные из алмазных пластин и сегментов. Годовая потребность отрасли около 250 кругов. Диаметры инструментов от 50 до 570 мм. Сборка кругов производится потребителями своими силами.

Алмазные пластины для сборки размерами 20 x 15 x 1,5, 40 x 20 x 2 на связках M2 - 01, M2 - 02 производят ФГУП "НПО "Оптика", ОАО "ЛЗОС" - для собственного потребления. Потребность в пластинах 10000 шт. в год (22000 карат). Используются алмазные порошки AC65 зернистостью от 400/315 до 80/63.

##### 3.4.1.3. Инструмент для фрезерования фасонных поверхностей.

Фрезерование фасонных и комбинированных поверхностей (скосы, пазы, скругления и т.д.) производится специальными кругами на гальванической связке с зернистостью алмаза 80/63 - 40/28. Круги изготавливаются по чертежам заказчика и, желательно, на им же изготовленных корпусах. Потребность отрасли - 300 кругов диаметром 50 - 100 мм с общим содержанием алмаза 2000 карат. Изготовители: ОАО "МПО по ВАИ" (Томилино) и другие предприятия, изготавливающие инструмент на гальванической связке.

##### 3.4.1.4. Инструмент для фрезерования WINTER [3] (см. табл. 4).

##### 3.4.2. Инструмент для распиливания стекла.

Для распиливания заготовок ОД используются отрезные алмазные круги формы 1A1R с

Таблица 4.

Диаметр инструмента D	мм	(0,55 – 0,75) D <sub>w</sub>	(0,52 – 0,60) D <sub>w</sub>	40 - 155	100 - 60
Размер зерна	FEPA	D25...D91...D191	D91...D181	D46...D151	D181...D213
Связка		BZ316 – BZ335 – BZ444 – BZ486	BZ335...BZ486	BZ5314	
Концентрация	C100	(C25)...C40...C50...C75...C90		C50...C75	C25...C35
Скорость резания	м/сек	20...30...(50)		20...30...(50)	15...25
Глубина резания	мм				
Скорость подачи	мм/мин	0,15...5 .в зависимости от n <sub>w</sub>			300
Скорость съема материала	см <sup>3</sup> /мин	Грубая 10...30...100 Финишная 5...10		10...50 5...10	40...120
Скорость заготовки	1/мин	60....240			
Срок службы	шт.			15000...28000	
Удельный расход	см <sup>3</sup> /ст	10000....25000	как 2F2		
Отечественный по ГОСТ 11706-80		5000 – 16000			
Финишная обработка R <sub>z</sub>	мкм	4... 15		6....15	
Стоимость инструмента K	DM/поверхн.	около 0,005		около 0,03	

непрерывной режущей кромкой. Диаметры кругов 50- 400 мм, алмаз АС65 - АС80 зернистостью 400/315 - 125/100. Связки металлические М2 - 01, М2 - 02. Инструмент поставляется ОАО "МПО по ВАИ" (Томилино), ЗАО "Завод Алмазного Инструмента" (Полтава), ООО "Геотехнология", (г. Люберцы), ООО "РИДЕР" (г. Тула) и другими. Годовая потребность отрасли около 300 кругов (9000 карат).

Кроме кругов с непрерывной режущей кромкой, для разделки крупногабаритных деталей и блочного стекла используются сегментные отрезные круги формы 1A1RSS. Диаметры применяемых отраслью кругов - 600 - 1200 мм, алмаз АС 65 - АС120, зернистость 630/500 - 400/315. Годовая потребность - около 30 штук.

Такие круги изготавливают: ООО Адамасс (Московская обл., г. Люберцы), Терекалмаз (г. Терек), ЗАО Сплитстоун (г. Москва) и многие другие.

В последнее время на сайтах зарубежных фирм - производителей оптики появились станки для распиливания стекла ленточными алмазными пилами и для распиливания проволокой с алмаз-

ным покрытием. Такие станки выпускаются в самых различных видах - от многопильных станков для разрезания кремниевых или сапфировых заготовок на сотни пластин диаметром до 300 мм с длиной алмазной проволоки в несколько км совершающей реверсную перемотку, до станков для распиливания кристаллов с закольцованной проволокой длиной 1,5 - 2 м. Многониточные станки могут распиливать до 4000 пластин в смену. Толщина пропила при таких способах - 0,2 - 0,5 мм, по сравнению с 2 - 4 мм для дисковых пил.

#### 3.4.3. Инструмент для центрирования.

На станках типа ЦС используются алмазные круги формы 1A1. Диаметры кругов 100,150, 200мм. Связка металлическая М2 - 01, алмаз АСМ 40/28. Инструмент покупной. Производители: ОАО "МПО по ВАИ" (Томилино), ЗАО "Завод Алмазного Инструмента" (Полтава), ООО "Геотехнология" (Люберцы) и другие. Годовая потребность отрасли - около 200 кругов (40000 карат).

Для имеющихся на оптических предприятиях станков LZ - 80 и LZ - 25 фирмы SatisLoh (ФРГ) можно рекомендовать лишь комбиниро-

ванные из нескольких кругов разной формы инструменты фирмы "WINTER" (ФРГ) по DIN 58742 [3]. Диаметры базового круга 100 и 160 мм. Алмаз - по рекомендациям фирмы (D46 и мельче). Можно использовать и фасонные круги на гальванической связке. Следует обратить внимание на точность изготовления оснастки, не всегда достижимую на наших предприятиях.

#### **3.4.4. Инструмент для сверления.**

Инструмент для сверления стекла поставляется либо полностью готовым к установке на станок - с хвостовиком под патрон или стандартным для сверлильных станков по стеклу, с правкой по размеру и биению, либо в виде коронок для соединения с корпусом и последующей доработкой. Инструменты изготавливаются с сплошной режущей кромкой или с напаянными сегментами. Алмазоносный слой изготавливается на основе металлических связок и алмазных порошков AC65 - AC120 зернистостью 400/315 - 80/63. Инструмент сходного назначения импортный и отечественный широко применяется для сверления технического стекла и камня и широко представлен на рынке. Им можно воспользоваться и для сверления оптического стекла. Однако он ограничен по зернистости алмаза: обычно 160/125, 200/160. Если вам нужно что то другое и в малой партии - разместить заказ трудно, так как производство рассчитано на массовый выпуск. На крупных оптических предприятиях инструмент изготавливается своими силами. Попытки разместить заказ на изготовление на специализированных предприятиях не имели успеха ввиду большой номенклатуры по диаметрам, зернистости алмаза и малой серии. Возможно, что объединенная заявка для централизованной поставки всем предприятиям пройдет более успешно. Сокращению номенклатуры будет способствовать переход на сегментную конструкцию сверл. Для сверления стекла и камня сегментные сверла выпускаются диаметром от 25 до 400 мм.

Всего потребность отрасли в сверлах диаметром от 2 до 400 мм составляет около 1000 штук, объем алмаза - 2000 карат.

Качество инструмента оценивается по двум параметрам: ресурс работы инструмента в по-

гонных метрах сверления до полного износа и производительности, которая, чаще всего, оценивается в скорости подачи (мм/мин). По ГОСТ 26339-84 стойкость сверл по стеклу составляет 0,65 - 4,0 метра, в зависимости от диаметра. Это, вероятно, предел для сверл на связке М2 - 01, на которой со временем 2-ой мировой войны работают большинство производителей с разным качеством исполнения. Современные производства (например, фирма "DIAMOND" Италия) используют новые технологии, которые позволяют увеличить стойкость до 40 метров. Осевая подача при оптимальной скорости шпинделя: по ГОСТ 26339-84 - 5 - 15 мм/мин, у современных производителей - до 60 мм/мин.

Крупные предприятия по выпуску алмазного инструмента (МПО по ВАИ, ПАЗ) спеченные сверл не производят. Зато есть несколько малых предприятий, специализирующихся на изготовлении сверл (фирма "Рилком", НПП "ГЛАССЮНИТ", НПФ "НИБОРИТ", НИЦ "Вятич" и другие), которые по качеству не уступают импортным.

#### **3.4.5. Инструмент для ручного фасетирования.**

Инструмент для ручного фацетирования круглой оптики изготавливается методом горячего прессования в виде вогнутых сферических чашек и конусов. Диаметр чашек от 10 до 150 мм, конусов - от 10 до 50 мм. Алмазные порошки ACM40/28 - ACM14/10. Используется для большей износстойкости алмаз 100%-ной концентрации. Фацетирование деталей с прямолинейными фасками или фасонных производится на кругах алмазных плоских формы 6А2Т по ГОСТ17007 - 80 диаметром 100 - 300 мм. Годовая потребность около 1000 инструментов, расход алмаза 45000 карат. Изготовители: сферического и конусного инструмента - предприятия отрасли, круги формы 6А2Т - ОАО "МПО по ВАИ" (Томилино), ЗАО "Завод Алмазного Инструмента" (Полтава).

#### **3.4.6. Инструмент для тонкого алмазного шлифования.**

Для тонкого алмазного шлифования применяется инструмент различных конструкций в зави-

сности от формы обрабатываемой поверхности, геометрических размеров деталей (блоков деталей), применяемых технологий шлифования и оборудования.

#### **3.4.6.1. Тонкое алмазное шлифование плоских ОД по методу свободного притира.**

Производится на станках типа ШП или ПД с осцилляцией верхнего звена, на плоско-дово-дочных станках с автономной правкой инструмента, на двусторонних плоско-дово-дочных станках с планетарным движением деталей в сепараторах. Как правило, шлифование производится в 2 перехода.

Сборные круги диаметром 300 - 600 мм изготавливают оптические предприятия своими силами. Для этого на соответствующие планшайбы приклеивают алмазные элементы или алмазные пластины. Использование пластин в варианте наклейки "на ребро" оправдывалось повышением режущей способности инструмента за счет повышения давления шлифования при малом коэффициенте заполнения. С появлением алмазных элементов с низкой концентрацией, пористых, обладающих повышенной абразивной способностью, использование пластин - больше дань традиции, чем необходимость. Примеров использования пластинчатых элементов для ТАШ в зарубежной практике не установлено.

Тем не менее, пластинчатые элементы для ТАШ изготавливаются ФГУП "НПО "Оптика" на металлических связках М3 - 15 - 1, М3 - 15 - 2, М3 - 15 - 7 с алмазными порошками АСМ 40/28 ÷ 7/5 размерами 20 x 15 x 1,5 мм и 40 x 20 x 2 мм. Потребность отрасли в пластинчатых элементах для ТАШ составляет около 12000 в год (6500 карат алмаза).

Чаще для изготовления инструментов для ТАШ плоскостей используют алмазные элементы круглой формы. На 1-ом переходе - АСМ28/20 6 М3 - 15 - 2, на 2-ом - АСМ20/14 3 МПП - 1.

С учетом использования этого варианта на 2-х сторонних станках, годовая потребность в этих элементах составит около 20000 штук. (2000 карат алмаза). Такие или аналогичные элементы делают для отрасли - ФГУП "НПО "Оптика", для собственного потребления - ОАО

"ЛЗОС", ОАО "МЗ "Сапфир", некоторые другие предприятия отрасли.

Алмазные круги для тонкого шлифования плоскостей диаметром 100 - 250 мм со сплошной режущей поверхностью, изготавливаемые ФГУП "НПО "Оптика" на эластомерном связующем, с алмазными микропорошками в диапазоне АСМ50/40 ÷ АСМ10/7 обеспечивают получение обработанной поверхности с параметром шероховатости до Ra 0,05 мкм и обработку сверхтвердых материалов (сапфира, карбида кремния и т.п.)

#### **3.4.6.2. Тонкое алмазное шлифование сферических поверхностей методом свободного притира.**

Тонкое алмазное шлифование методом свободного притира производится на станках типа ШП или специализированных станках с осцилляцией верхнего звена сферическими шлифовальниками (АСШ) сборными или цельнопрессованными на металлических, металлополимерных или полимерных связках. Преимущества цельных шлифовальников - простота сборки инструмента и возможность проточки сферы, обеспечивающая отсутствие биения и минимальное время доводки.

Алмазные элементы и сферические шлифовальники изготавливают для отрасли ФГУП "НПО "Оптика", для собственного потребления - ОАО "ЛЗОС", ОАО "ВОМЭ", некоторые другие.

За рубежом элементы и инструменты для тонкого шлифования изготавливают много фирм. Наиболее известны фирма "WINTER" (ФРГ) [3], "Sanwa Seimitsu Kogyo Co. LTD" (Япония).

Потребность отрасли в алмазных элементах для ТАШ сферы составляет около 200000 шт. в год, (67500 карат), в цельном алмазном инструменте - 2250 шт. (3500 карат).

Сравнительные технические характеристики алмазных элементов для ТАШ приведены в табл. 5.

При достаточно близких технических характеристиках по показателям работоспособности - производительности и шероховатости обработанной поверхности, по износостойкости отечественный инструмент превосходит зарубежные ана-

Таблица 5.

Изготовитель, вид элемента	Размеры, мм		Зернистость алмаза, мкм	Связка	Концентрация	Характеристики		Цена, \$ USA
	Диаметр	Высота				Уд.расход алмаза карат/дм <sup>3</sup>	Глубина дефектов после финишного перехода, мкм	
«WINTER» элементы Кольцевые элементы	4 – 10 10x4,5x3	2; 3 3	3 – 15 10 - 15	Метал. Полимерная	23 - 45	0,5 – 5 в зависимости от перехода	3,0	5 – 6
«Sanwa Seimitsu Kogyo Co. LTD» Алмазные элементы	4 – 20	3,4,5	60/40 – 6/2	Метал. Полимерная	нет данных	нет данных	нет данных	4 – 5
ФГУП «НПО «Оптика» элементы Кольцевые элементы	6,8,10,14 16x12x7	3, 5 7	40/28-10/7 50/40-10/7	Метал. Эласто- мерная	1 – 25	0,3 – 1,2 * в зависимости от перехода	3,0 до 6 - локальные	0,7 – 1,2
						* при испытаниях по ТУ		

логи в 2 - 3 раза при несравненно меньшей цене.

#### 3.4.7. Инструмент для станков с ЧПУ и обрабатывающих центров.

В последнее время создано новое поколение прецизионного автоматизированного оптического оборудования для обработки сферы, асферики, поверхностей свободной формы.

Ведущие фирмы в области оптической технологии и станочного оборудования ("SatisLoh", "OptoTech", "Schneider" ФРГ) разработали и поставляют на мировой рынок специализированные оптические станки с ЧПУ и обрабатывающие центры, обеспечивающие операцию тонкого шлифования кольцевым алмазным инструментом и концентрацию нескольких переходов шлифования и операций.

В РФ в настоящее время аналогичное прецизионное оборудование не производится. Рядом

оптических предприятий (ФГУП "ПО "УОМЗ", ОАО "ВОМЗ", ФГУП "ЦКБ "Точприбор" и др.) такое оборудование закуплено за рубежом и эксплуатируется. Инструмент для обработки на таких станках поставляется фирмами - производителями оборудования ("SatisLoh", "OptoTech", "Schneider" ФРГ) в комплекте со станками.

Такой инструмент производится фирмами "WINTER" (ФРГ), "Sanwa Seimitsu Kogyo Co. LTD" (Япония). Японская фирма поставляет на рынки южноазиатских стран инструмент диаметром 6 - 60 мм на металлической связке с зернистостью алмаза 80/63 для шлифования в 1 переход. На российском рынке продукция фирмы не представлена.

В РФ аналогичный инструмент специализированными предприятиями не выпускаются. Раз-

работанный ранее ФГУП "НПО "Оптика" кольцевой инструмент для тонкого шлифования "в жестких осях" в течение 20 лет успешно эксплуатировался на станках АШ - 70К в составе поточно - автоматизированных линий ЛПА - 70 на ООО "Юпитер" (г. Валдай). Инструмент изготавливается на металлической связке М3 - 15 - 1 с использованием алмаза АСМ 14/10 и обеспечивает в один переход получение параметра шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  0,15 - 0,2 мкм. Кольцевой алмазный инструмент для супертонкого шлифования на основе оригинального эластомерного связующего, разработанный ФГУП "НПО "Оптика" обеспечивает уменьшение параметра шероховатости обработанной поверхности до  $R_a$  0,05 мкм, глубины разрушенного слоя в 2 раза.

Зарубежные фирмы - производители поставляют алмазный инструмент для конкретной модели станка полностью готовым к работе: в сбое с корпусом, с правкой в размер и по биению, отбалансированным.

Стоимость инструмента для станка ASM 100 фирмы "OptoTech" составляет (см. табл. 6).

Цена комплекта из 14 инструментов для сферофрезерования ОД, диаметром от 20 до 100 мм, поставляемого фирмой "SatisLoh" составляет 9646 EUR (424,4 тыс. руб.), средняя за шт. 689,0 EUR (30,3 тыс. руб.).

Цифры впечатляют, но... По данным каталога "WINTER" [3] стоимость инструмента на обработку 1 детали - 0,005 DM = 0,15 руб. Если пересчитать приведенные в том же каталоге данные по удельному расходу алмаза (10 - 25 дм<sup>3</sup> на 1 карат) на данные по обработке конкретной детали, то получится, что одним инструментом можно обработать от 25 до 100 тыс. поверхностей. При мин. времени цикла обработки детали с 2-х сторон 6 мин, при 100%-

ной загрузке станка в 2 смены за год можно обработать не более 40 тыс. деталей - 80 тыс. поверхностей. То есть требуется 1 - 2 инструмента. Поскольку заданные условия не реальны, а фирмы - изготовители асферики говорят, что они обрабатывают около 8000 деталей в год, на что потребуется 0,2 - 0,4 инструмента, т.е. срок службы инструмента составит 2,5 - 5 лет. 14 инструментов разного размера и зернистости, упомянутых выше, хватит на 35 - 70 лет. То есть речь идет не о дорогоизнене инструмента, а о омертвлении достаточно большой суммы на длительный срок. Покупайте несколько станков, чтобы инструменты не пролеживали, а работали. Только предварительно найдите заказы на 20 - 30 тыс. асферических деталей диаметром 6 - 70 мм при стоимости их соответственно 100 - 750 EUR. Именно столько стоят такие детали по каталогам фирм - производителей.

#### **3.4.8. Выводы и предложения по разделу 4.**

Предварительный анализ потребности оптических предприятий в алмазном инструменте для обработки ОД и возможностей обеспечения их по всей номенклатуре и в необходимых объемах позволяет сделать следующие выводы:

Реализация предлагаемых мероприятий позволяет полностью отказаться от изготовления алмазного инструмента оптическими предприятиями.

Алмазный инструмент для операций распиления заготовок, центрирования, фрезерования фасонных и комбинированных поверхностей придется приобретать на отечественных инструментальных предприятиях или по импорту, что делается и сейчас.

Потребность в инструменте для сферофрезерования, фрезерования плоскостей, ручного фасетирования предприятия до настоящего времени в значительной степени закрывают за счет собственного производства. В связи с падением объемов такое производство становится не рентабельным, и потребность придется закрывать за счет организации централизованного производства такого инструмента на ФГУП "НПО "Оптика". Инструмент для сверления стекла технологически сложен в изготовлении. Качественного инструмента, соответствующего ГО-

*Таблица 6.*

Диаметр, мм	Зернистость алмаза FEPA (ГОСТ)	Цена EUR/ тыс. руб.
50	M16 (ACM20/14)	388,0/ 17,1
	D64 (AC 63/50)	394,0/17,3
	D91 (AC 80/63)	490,0/ 21,6
80	M16 (ACM20/14)	526,5/23,1

СТу, предприятия для себя не делают. Можно воспользоваться широко представленным на рынке инструментом для сверления камня и технического стекла и организовать изготовление другой номенклатуры на базе одной из специализированных фирм. Однако, для сверления камня и технического стекла используются инструменты с зернистостью 200/160 - 400/315. Для обработки оптики нужны зернистости 40/28 - 400/315, что значительно расширяет номенклатуру инструмента. Необходимы сравнительные испытания инструментов различных изготовителей, в том числе ФГУП "НПО "Оптика", по результатам которых можно выбрать наилучших по цене и качеству поставщиков.

Алмазные элементы для ТАШ сферы и плоскости и цельные сферические шлифовальники освоены в производстве ФГУП "НПО "Оптика". От производства, очень небольшого, на оптических предприятиях можно отказаться, дополнив производство ФГУП "НПО "Оптика" соответствующей номенклатурой. Так, нужно расширить номенклатуру сферических шлифовальников с максимальным размером 30 мм по действующим ТУ до 50 - 60 мм исходя из мощности прессов, имеющихся в наличии, освоить виды алмазных элементов, которыми пользуются предприятия и которые не выпускает ФГУП "НПО "Оптика", если их нельзя заменить номенклатурой ФГУП "НПО "Оптика".

С целью создания импортозамещающего инструмента для обработки ОД на прецизионном импортном оборудовании с ЧПУ необходимо провести НИОКР по отработке конструкции и технологии изготовления инструмента с участием ФГУП "НПО "Оптика" и ФГУП "ПО "УОМЗ" с последующей организацией производства.

#### **4. АНАЛИЗ КАЧЕСТВА АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА ФГУП "НПО "ОПТИКА" И ОЦЕНКА ЕГО КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ**

Качество алмазного инструмента НПО по различным сегментам очень не однородно. Инструмент для ТАШ имеет в основе собственные разработки НПО и технология его

изготовления отрабатывалась годами, включая массовое производство на РОМЗе, что обеспечивает его конкурентоспособность на внутреннем и внешнем рынках. Слабостью является зависимость качества этого инструмента от качества покупных алмазных порошков. Даже соответствие порошков требованиям ГОСТа не гарантирует качества алмазного инструмента. Важен еще режим синтеза, определяющий монокристаллическую структуру зерен определенных фракций, идеальная очистка алмазного сырья от включений, например, катализатора, используемого при синтезе, требования по гранулометрическому составу, превышающие требования ГОСТ. На алмазном производстве РОМЗ около 60% работающих были заняты подготовкой алмазного сырья: синтезом, химическим обогащением, дроблением, овализацией, классификацией. Не смотря на это, выход годных для инструмента алмазных микропорошков составлял до 50% от испытываемых партий, а по некоторым поставщикам - 0%. Требуемый уровень качества поддерживался 100 %-ном функциональным контролем алмазного сырья в инструменте и таким же контролем каждой партии алмазного инструмента на соответствие требованиям ТУ.

В настоящее время подготовка алмаза в производстве НПО полностью отсутствует, и вопрос решается только за счет отбора поставщиков при испытании инструмента и выбраковке определенных партий алмаза. Опыт предприятий, изготавливающих инструмент для ТАШ своими силами и использующих дополнительную классификацию алмаза (АОМЗ, ЛЗОС), показывает, что таким образом можно довести до кондиции некоторые партии алмаза (не все) и улучшить качество инструмента.

Частично проблема решается и переходом на новые составы связок, менее критичные по требованиям к качеству алмазных микропорошков (инструмент на полимерных или эластомерных связующих, пористые элементы на металлических связках).

Повышение качества инструмента для ТАШ обеспечивает спекание в восстановительной ат-

мосфере, исключающее окисление связки и выгорание алмаза, особенно мелкозернистого. Использование новых технологий наношлифования может потребовать выпуска инструмента с зернистостью алмаза 1 - 5 мкм и изготовление такого инструмента без защитной атмосферы и без особо чистых помещений невозможно.

Защитная атмосфера в среде диссоциированного аммиака применялась в обязательном порядке при серийном изготовлении инструмента на РОМЗе, предприятиями отрасли, самостоятельно изготавливающими алмазный инструмент (ЛЗОС).

Все вышеизложенное относится к наиболее критичному показателю инструмента для ТАШ - глубине дефектов обработанной поверхности. Качество инструмента по абразивной способности повышается за счет того, что НПО занимается не только разработкой инструмента, но и технологией шлифования, что позволяет дать рекомендации заказчикам по СОЖ, режимам, видам инструмента, которые в комплексе дают наилучший результат. Это особенно важно при использовании инструмента на новых оптических материалах (кристаллы, керамика, сверхтвердые материалы - карбид и нитрид кремния, сапфир, алмаз и т.д.)

Инструмент для ТАШ и технология его использования обеспечивают параметры работоспособности не хуже, чем инструмент фирмы WINTER (ФРГ)

В части инструмента для силового резания (фрезерования, сверления, распиливания и т.п.) основным недостатком производимого инструмента становится неадекватность растущего качества алмаза и износостойкости связки. В связи с использованием высокопрочных марок алмаза (AC80 - AC250) с большим ресурсом работы, фирмы - изготовители инструмента для обработки стекла и камня перешли на износостойкие связки на основе кобальта и других тугоплавких материалов, позволивших в несколько раз увеличить стойкость инструмента. В последнее время алмазные инструменты на металлической связке изготавливают с применением альтернативных кобальту металлов. Это связа-

но с определенными проблемами из-за постоянно изменяющейся рыночной стоимости кобальта: новые металлические связки, в частности, связки типа DIABASE и DIAMIX. Новые связки с уменьшенным содержанием кобальта до 15 % (вместо 40 %). Однако они требуют температуры изготовления (спекания, прессования) до 1000 - 1200°C и вакуумной термообработки. Имеющиеся в НПО печи допускают температуру до 800°C и не имеют вакуума или восстановительной атмосферы.

Для обеспечения высокого качества необходимо новейшее оборудование для прессования, пайки и правки алмазных инструментов. Современные методы пайки позволяют заменить крупногабаритные цельные инструменты на составные паянные, уйти от крупногабаритных пресс-форм, уменьшить их номенклатуру и повысить качество инструмента, организовать восстановление инструмента на существующих корпусах, тем самым снизив его стоимость. Необходимо в ближайшее время сертифицировать большую часть продукции согласно ISO 9000.

## 5. ПЛАНЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АЛМАЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА ОАО "НПО "ОПТИКА"

Для эффективности и повышения качества инструмента нужно:

- дополнительная обработка микропорошков алмазов (управляемое измельчение, овализация, дробление, классификация), для повышения качества поверхности и увеличения выхода годных;

- технологические работы по связкам с целью обеспечения эксплуатации инструмента в режиме самозатачивания при одновременном минимальном износе рабочей матрицы с учетом свойств алмазных порошков;

- разработка новых и корректировка имеющихся связок для более эффективного применения микропорошков;

- расширение типажа отдельных алмазосодержащих спецэлементов, брусков, сегментов, вставок, пластин освоение современных технологий пайки для изготовления сборного инструмента;

освоение печного высокотемпературного оборудования вакуумного и с защитными атмосферами для изготовления современных связок.

выделение производства инструмента для ТАШ (шихтовое помещение, отдельный пресс), обеспечение необходимой технологической чистоты.

изготовление инструмента полной готовности (см. раздел 2.3.2), для чего необходима организация производства высокоточных корпусов, освоение технологии пайки, правки инструмента, прецизионной балансировки его.

*Список литературы:*

1. China's Diamond in the World Market Zhi Hong Li, B. Zhao, Liang Li, J. Wong, July, 2011.  
<http://www.scientific.net/KEM.487.526>
2. Новые материалы. Колл. авторов. Под редакцией Ю.С. Карабасова. - М: "МИСИС". - 2002 - 736 с.
3. Winter Diamantwerkzeuge zur Bearbeitung feinoptischer, brillenoptischer und technischer Bauelemente aus Glas. <http://www.winter-dtcbn.de>

# ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ВОЛНИСТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ ИЗ СИТАЛЛОВ

ГУСЕВ В. В., - доктор технических наук, профессор, КАЛАФАТОВА Л. П., - - доктор технических наук, профессор, ОЛЕЙНИК С. Ю.

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина

E-mail: lpk04nov@mail.ru

*В статье рассматриваются особенности формирования волнистости поверхности при алмазно-абразивной обработке тонкостенных оболочек сложной пространственной формы из ситаллов. Для прогнозирования параметров волнистости разработана математическая модель динамического поведения технологической системы во время механической обработки.*

**Ключевые слова:** ситаллы, шлифование, технологическая система, волнистость поверхности.

Область применения рассматриваемых изделий - элементы аэрокосмической и ракетной техники, что определяет их эксплуатационные характеристики. К таким характеристикам относятся: конструкция изделия (высокоточная тонкостенная сложнопрофильная оболочка), обеспечивающая требуемые аэродинамические характеристики; высокие радиотехнические свойства (например, радиопрозрачность), для обеспечения которых должны быть выдержаны высокая точность толщины стенки детали по ее длине и требуемый уровень микро- и макро- геометрии наружного профиля; высокие прочностные характеристики с учетом работы в высокотемпературном режиме, обеспечение которых предполагает отсутствие дефектного слоя в обработанных поверхностях изделия. В качестве его материала используются технические ситаллы, обладающие определенным комплексом физико-механических свойств, позволяющих выполнить все перечисленные выше требования при относительно небольшой массе изделия.

Из-за несовершенства технологии заготови-

тельных операций обеспечение требуемого качества изделий предполагает многоэтапную механическую обработку. Заданная высокая точность профиля изделия обеспечивается на операциях механической обработки, которые включают черновые и чистовые операции шлифования внутреннего и наружного контуров, на которых удаляется основной припуск (до 8-9 мм на сторону). При этом алмазно-абразивная обработка ведется способом глубинного шлифования (глубина резания - 0,5... 1,5 мм), которое сопровождается хрупким разрушением обрабатываемого материала и формированием нарушенного обработкой дефектного слоя. Алмазное шлифование тонкостенных оболочек вращения происходит в условиях динамической нестабильности процесса резания, которая обусловлена неравномерной жесткостью подсистемы "шпиндель-оправка-заготовка" по длине оболочки; неравномерностью сил резания в процессе шлифования при перемещении круга по формируемой поверхности изделия; быстрым износом шлифовальных кругов; биением и огранкой алмазного инструмента [1, 2]. В результате формируется профиль изделия, который характеризуется волнистостью с переменными шагом и высотой для различных участков заготовки вдоль её оси. Окончательная механическая обработка поверхности осуществляется доводкой алмазными брусками, которая ввиду сложности профиля изделия производится вручную, что увеличивает трудоемкость получения готовой детали. Поэтому важной технологической задачей является повышение качества поверхности детали после алмазно-абразивной обработки.

Для обеспечения заданных прочностных свойств изделия после его механической обработки в зависимости от наличия, глубины и структуры нарушенного обработкой поверхностного слоя проводится операция химического травления, на которой полностью удаляется дефектный слой, с последующим ионным упрочнением сформированной поверхности.

**Целью работы** является обоснование факторов, влияющих на формирование геометрических параметров поверхности при обработке крупногабаритных сложнопрофильных оболочек вращения из хрупких неметаллических материалов, описываемых понятием "волнистость".

Под волнистостью поверхности понимаем совокупность периодически повторяющихся высотупов и впадин на поверхности с отношением  $l_v/H_v$  (шаг волнистости/высота волнистости) от 50 - 1000. Общей причиной образования волнистости шлифуемой поверхности является изменение расстояния между линией касания шлифовального круга с обрабатываемой заготовкой и осью её вращения, что в научных источниках связывают с динамикой технологической системы (ТС) резания во время механической обработки [3, 4, 5, 6, 7].

Возникновение волнистости связано с появлением низкочастотных вибраций станка, приспособлений, инструмента или заготовки, вызванных неравномерностью износа инструмента, наличием неуравновешенных масс, неоднородностью свойств заготовки. Экспериментальными исследованиями установлено, что форма волны в этом случае близка к синусоиде [7]. Большинство теоретических исследований, касающихся формирования волнистости, относится к случаям шлифования металлических материалов с малой глубиной резания при обработке не тонкостенных деталей [3, 4, 8].

Особенности шлифования изделий рассматриваемого класса из хрупких неметаллических материалов (ситаллов), в результате которого на их поверхности формируется неприемлемая с точки зрения заданной точности обработки волнистость, представим следующим образом:

- рассматривается алмазное шлифование наружной поверхности тонкостенной сложнопрофильной заготовки из ситалла (длина изделия

до 1000 мм, диаметр цилиндрической части до 500 мм, толщина стенки после чистовой алмазно-абразивной обработки 7 мм при толщине стенки заготовки 20 мм);

- известно, что шлифовальный круг имеет биение и огранку в пределах 0,02 - 0,06 мм, что является источником возбуждения вынужденных колебаний с частотами, кратными частоте вращения круга;

- установка заготовки на станке осуществляется на консольной двухпорной оправке, поэтому обработка ведется в условиях переменной жесткости ТС (рис. 1);

- в процессе обработки шлифовальный круг неравномерно изнашивается, кроме того площадь контакта шлифовального круга и заготовки меняется при перемещении круга вдоль ее оси, что вызывает нестабильность сил резания во время обработки.

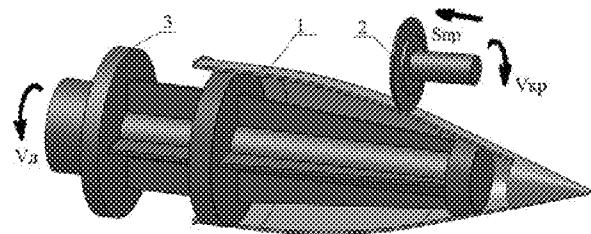


Рисунок 1.

*Схема установки заготовки на операции наружного шлифования изделия: 1 - формируемый контур изделия; 2 - алмазный круг 1A1 200x10x3x76 A1-315/250-4- M2-01; 3 - приспособление-оправка, в которой опорными участками служат гетинаксовые втулки*

Визуальный анализ поверхности изделия после алмазно-абразивной обработки показал наличие двух наиболее выраженных направлений волн: вдоль оси заготовки (в продольном направлении) и по ее окружности (в поперечном направлении). Волны в продольном направлении охватывают несколько поперечных сечений детали, смещенных друг относительно друга на величину продольной подачи круга [2]. Профилограмма поверхности в продольном сечении для различных участков детали позволила оценить величины шага и высоты волнистости [9]. Шаг волнистости в продольном направлении ( $l_v$ ) для разных участков колеблется от 3 до 8,5 мм, высота волнистости ( $H_v$ ) достигает 0,14 мм.

При установке шлифовального круга на шпин-

дель агрегатной головки возможно появление биений, достигающих в производственных условиях величины 0,06 мм, что является источником возбуждения вынужденных колебаний с частотами, кратными частоте вращения круга ( $\omega_1 = 48$  Гц и  $\omega_1 = 63$  Гц для скоростей круга  $v_k = 30$  и  $40$  м/с, соответственно). Наличие вибраций вызывает изменение макропрофиля круга, что, в свою очередь, приводит к появлению дополнительного источника возбуждения колебаний ( $\omega_2 = 144$  Гц и  $\omega_2 = 193$  Гц для  $v_k = 30$  и  $40$  м/с), что близко к низшим собственным частотам подсистемы "шпиндель-оправка-заготовка", экспериментально найденные значения которых соответствуют  $60 \pm 5$  Гц и  $123 \pm 10$  Гц.

За один оборот заготовки, вследствие вибраций ТС, расстояние между линией касания шлифовального круга с заготовкой и осью её вращения изменяется с частотой и амплитудой вынужденных изгибных колебаний, происходящих в направлении действия нормальной составляющей силы резания. При этом на поверхности детали в радиальном направлении образуется волнистость. За один оборот круга в случае его огранки расстояние между линией касания круга с заготовкой и осью её вращения также не остается постоянным и попеременно увеличивается или уменьшается, вызывая образование волнистости поверхности по окружности изделия (рис. 2), то есть, в окружном направлении.

На рис. 2 обозначены:  $e$ ,  $r$  - величины биения и огранки, соответственно;  $v_k$  - скорость шлифовального круга, м/с;  $n_z$  - частота вращения за-

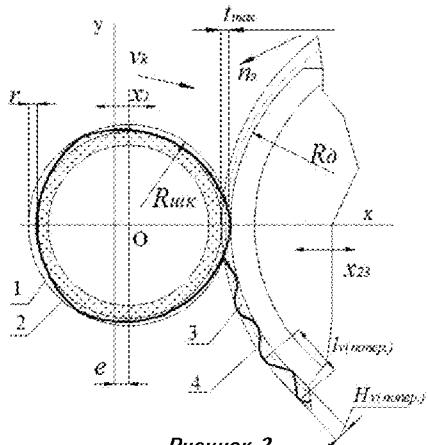


Рисунок 2.

**Формирование Волнистости поверхности по окружности изделия:** 1, 2 - теоретический и реальный контуры шлифовального круга, соответственно; 3, 4 - кривые зоны контакта круга и заготовки при отсутствии и с учетом вибраций, соответственно

готовки, об/мин;  $x_1$  - координата оси шлифовального круга при его колебаниях в направлении  $x$ ;  $x_{23}$  - координата оси подсистемы "оправка-заготовка" при её колебаниях в направлении  $x$ ;  $R_d$  - радиус заготовки, который требуется получить на этом проходе инструмента;  $R_{\text{шик}}$  - радиус шлифовального круга;  $t_{\max}$  - максимальная глубина врезания круга в заготовку;  $H_{v(\text{попер})}$ ,  $l_{v(\text{попер})}$  - высота и шаг волнистости в окружном направлении, соответственно.

Образование волнистости в продольном направлении связано с низкочастотными вибрациями стенки оболочки. Эти колебания появляются как результат того, что на вращающуюся с постоянной частотой заготовку во время шлифования воздействует локальная сосредоточенная периодическая сила (имеющая частоту возбуждающей силы), перемещающаяся вдоль оси заготовки со скоростью, соответствующей заданной подаче [10]. Анализ литературы [11, 12] показал, что такую ситуацию можно рассматривать как факт динамического воздействия подвижной нагрузки на поверхность оболочки, вызывающего появление параметрических колебаний.

Схема образования волнистости в продольном направлении изделия, как результат параметрических колебаний стенки оболочки, представлена на рис. 3.

На рис. 3 а показано формирование продольной волнистости детали после алмазно-абразивной обработки в зависимости от продольной подачи шлифовального круга  $s_{np}$  и параметров колебаний (частоты и амплитуды) стенки оболочки  $x(t)$ . На схеме 3 а обозначены:  $\delta$  - угол наклона обрабатываемой поверхности к оси заготовки;  $\beta$  - угол наклона инструмента к поверхности обрабатываемой детали (применяется для уменьшения износа алмазного круга);  $v_k$ ,  $n_z$  - скорость шлифовального круга и частота вращения заготовки, соответственно;  $t_w$  - глубина шлифования;  $H_v$ ,  $l_v$  - высота и шаг волнистости в продольном направлении.

На рис. 3 б изображена схема (без соблюдения масштаба) формирования волнистости поверхности оболочки в зависимости от частоты и формы ее колебаний. Точками 1...10 показаны перемещения шлифовального круга за 10 обо-

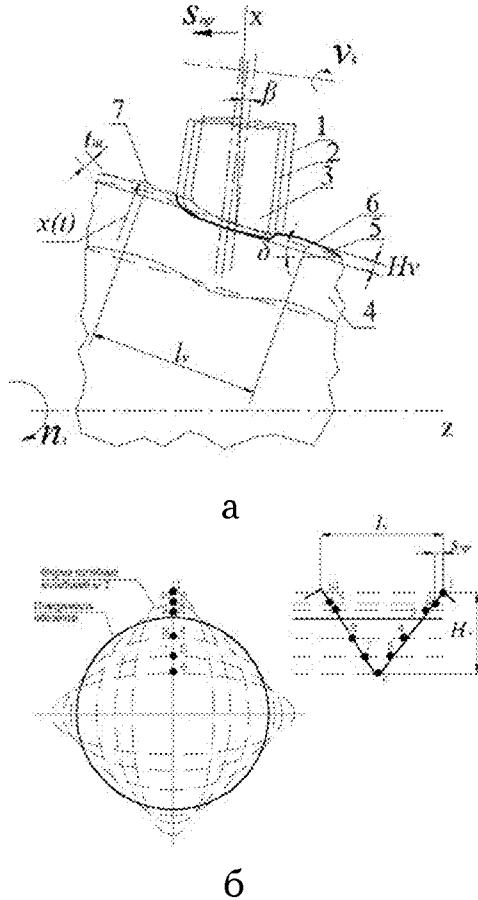


Рисунок 3.

*Схема образования продольной волнистости под воздействием параметрических колебаний стенки оболочки: 1, 2, 3 - положения шлифовального круга при его перемещении со скоростью подачи  $s$ ; 4 - стенка оболочки толщиной  $h$ ; 5, 6 - теоретический и реальный контуры обработанной заготовки; 7 - кривая зоны контакта круга с заготовкой с учетом вибраций*

ротов и формирование шага (длины волны) в продольном направлении.

Таким образом, основным фактором, влияющим на появление волнистости в продольном направлении, являются параметрические колебания обрабатываемой заготовки-оболочки.

Развитие параметрических колебаний полностью зависит от конструктивных особенностей заготовки - тонкостенной оболочки вращения и особенностей её установки на оправке, которые характеризуются расположением опор приспособления относительно поверхностей оболочки, а также от режима обработки, влияющего на уровень силовой нагрузки на поверхность оболочки при резании и скорость перемещения этой нагрузки по поверхности заготовки.

Рассмотрим подробнее характеристики пара-

метрических колебаний [11, 13]. По внешним проявлениям параметрические колебания сходны с вынужденными, но отличаются тем, что поддерживаются за счет изменения параметров самой системы. При определенных соотношениях между частотами возмущающей силы (в данном случае это нормальная составляющая силы резания, перемещающаяся с заданной скоростью подачи и скоростью вращения заготовки) и собственными частотами системы малое начальное возмущение приводит к развитию колебаний большой амплитуды. Резонанс, появляющийся при совпадении частот вынужденных колебаний и собственных колебаний системы, проявляется в виде возрастающих колебаний системы. Параметрический резонанс представляет собой возрастающие колебания около неустойчивого положения равновесия, то есть, он связан с неустойчивостью равновесного состояния системы, при котором любое случайное возмущение приводит к её раскачиванию.

Для прогнозирования вибраций ТС, как основного фактора, влияющего на образование волнистости поверхности, была разработана расчетная схема динамической системы алмазно-абразивной обработки оболочки, которая представлена на рис. 4. Расчет динамических характеристик ТС был приведен к зоне контакта шлифовального круга и заготовки как к пространству, в котором происходит формирование поверхности изделия определенной геометрии.

Подсистему алмазно-абразивной обработки наружной поверхности заготовки - тонкостенной оболочки представим в виде трехмассовой модели. На схеме (см. рис. 4) элементы системы обозначены следующим образом: инструмент (алмазный круг)  $m_1$ , обрабатываемая заготовка  $m_2$ ; оправка, на которой установлена заготовка,  $m_3$ . Кроме того, для расширения возможностей модели в принципиальной расчетной схеме учтен шпиндельный узел  $m_4$ . Расчет колебаний поверхности оболочки будет осуществляться по законам теории оболочек, в расчетной схеме заготовка и оправка представлены как параметр  $m_{23}$ . Колебания моделируются в направлении действия нормальной составляющей силы резания  $P_n(t)$  как силы, оказывающей

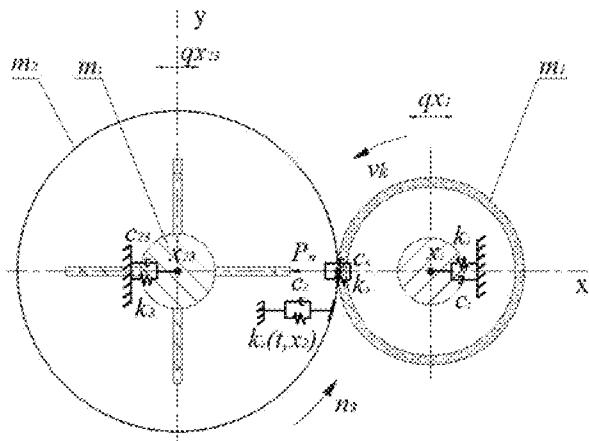


Рисунок 4.

Расчетная схема динамической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенной оболочки вращения

наибольшее влияние на возникновение динамической неустойчивости процесса обработки.

Такую принципиальную схему с учетом ряда допущений можно привести к эквивалентной расчетной цепной схеме, показанной на рис. 5, где  $m_1$  - подсистема "шпиндель - агрегатная головка-суппорт",  $m_{23}$  - подсистема "оправка - заготовка",  $m_4$  - подсистема шпиндельного узла.

Рассмотрим движение динамической системы в направлении нормали к обрабатываемой поверхности. Подсистема "шпиндель - агрегатная головка - суппорт"  $m_1$  соединяется через упругий  $k_1$  и диссипативный  $c_1$  элементы с опорой (станиной станка). Подсистема "шпиндельный узел станка"  $m_4$  через упругий  $k_4$  и диссипативный  $c_4$  элементы также соединяется с опорой (корпус коробки скоростей). Подсистема "оправка - заготовка" через упругий  $k_{23}$  и диссипативный  $c_{23}$  элементы присоединена к шпинделю станка. Обобщенные координаты перемещения масс представлены следующим образом:  $m_1$  -  $x_1$ ,  $m_{23}$  -  $x_{23}$ ,  $m_4$  -  $x_4$ . Координатой  $z$  обозначено возмущающее воздействие со стороны шлифовального круга, которое обусловлено его биением и огранкой.

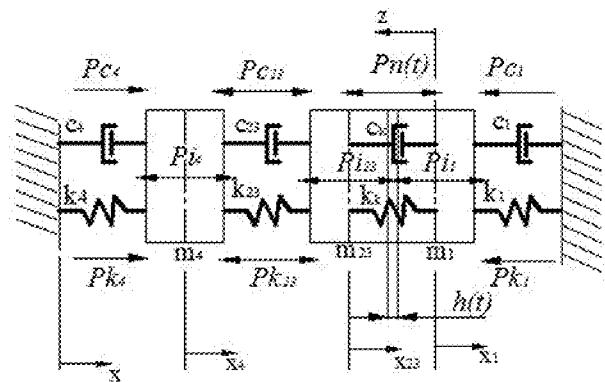


Рисунок 5.

Эквивалентная схема процесса алмазно-абразивной обработки наружной поверхности тонкостенной оболочки вращения

Показатель  $P_n(t)$  на рис. 4 подразумевает величину нормальной составляющей силы резания, которая возникает при шлифовании поверхности. Её можно представить как

$$P_n(t) = P_{n0} + \sum_{i=1}^n P_{ni} \sin \omega t, \quad (1)$$

где  $P_{n0}$  - статическая составляющая силы резания.

Сила резания с учетом приведенной жесткости контакта шлифовального круга и заготовки и коэффициента сопротивления в расчетной модели описывается в виде

$$P_n(t) = k_k h(t) + c_k \dot{h}(t), \quad (2)$$

где  $h(t)$  - периодически изменяющаяся фактическая глубина резания; коэффициенты  $k_k$  и  $c_k$  имитируют упруго-диссипативные и режущие характеристики шлифовального круга во время механической обработки.

Математическая модель динамической системы приведена в виде системы дифференциальных уравнений

Расчет динамического поведения тонкостенной оболочки вращения был проведен на основании

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 - c_1 \dot{x}_1 + c_k (\dot{x}_1 - \dot{x}_{23}) - k_1 x_1 + k_k (x_1 - x_{23}) = c_k \dot{z} + k_k z; \\ m_{23} \ddot{x}_{23} - c_k (\dot{x}_1 - \dot{x}_{23}) + c_{23} (\dot{x}_{23} - \dot{x}_4) - k_k (x_1 - x_{23}) + k_{23} (x_{23} - x_4) = -c_k \dot{z} - k_k z; \\ m_4 \ddot{x}_4 - c_{23} (\dot{x}_{23} - \dot{x}_4) + c_4 \dot{x}_4 + k_{23} (x_{23} - x_4) + k_4 x_4 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

дифференциального уравнения с периодическими коэффициентами, описывающего радиальное перемещение серединной поверхности участка оболочки под действием подвижной нормальной локальной нагрузки [12].

На основании указанных математических моделей в пакете Simulink Matlab разработана имитационная модель динамической системы, включающей подсистемы "шпиндель-оправка-заготовка", "агрегатная головка-суппорт" и процесс шлифования. Адекватность разработанных моделей подтверждена совпадением результатов расчетов с экспериментальными данными, что представлено в работе [14].

Таким образом, теоретическое исследование влияния факторов, связанных с режимами обработки, базированием, установкой и закреплением заготовки, на динамическое поведение ТС при алмазной обработке тонкостенных оболочек сложной пространственной формы может быть осуществлено на основании разработанной модели.

По результатам анализа волнистости поверхности изделия, сформированной после алмазного шлифования тонкостенной оболочки, были сделаны следующие выводы: основным фактором, влияющим на появление неприемлемой волнистости поверхности, являются вибрации в технологической системе, имеющие вынужденную и параметрическую природу возникновения. Эти особенности были учтены при разработке математической модели динамики ТС. Причем волнистость поверхности по окружности оболочки образуется в результате вынужденных колебаний подсистем "шпиндель-оправка-заготовка" и "агрегатная головка-суппорт", а волнистость поверхности вдоль оси заготовки зависит от параметрических колебаний обрабатываемой заготовки при перемещении по ней нагрузки (нормальной составляющей силы резания), возникающей при обработке в зоне контакта шлифовального круга и заготовки.

#### Список литературы:

- Гусев В.В., Калафатова Л.П., Каракуз И.С., Поколенко Д.В. Исследование динамических характеристик элементов системы СПИД при шлифовании деталей сложной пространственной формы из ситаллов // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. 2007. №21. С. 148 - 155.
- Гусев В.В., Калафатова Л.П., Поколенко Д.В. Влияние динамики процесса алмазного шлифования на формирование поверхностного слоя изделий из ситаллов // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. 2007. № 2. С. 14 - 17.
- Badger Jeffrey, Stuart Murphy, Garret O'Donnell. The effect of wheel eccentricity and runout on grinding forces, waviness, wheel wear and chatter // International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2011. С. 3-26.
- Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 319 с.
- Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 357 с.
- Билик Ш.М. Макрогометрия деталей машин. М.: Машиностроение, 1972. 344 с.
- Пер А.Г. Алмазная и тонкая обработка в приборостроении. М.: Оборонгиз, 1963. 186 с.
- Островский В.И. Теоретические основы процесса шлифования. Л.: Изд-во Ленинградского ун.-та, 1981. 144 с.
- Гусев В.В. Обоснование и разработка способа повышения производительной обработки изделий из ситаллов: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01, 05.02.08. М., 1986. 18 с.
- Гусев В.В., Калафатова Л.П., Олейник С.Ю. Обоснование расчетной схемы для исследования динамического состояния технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных оболочек из ситалла // Современные технологии в машиностроении. 2011. №6. С. 14-23.
- Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек. М.: Наука, 1972. 432 с.
- Якушев Н.З., Якушев Р.С. Коническая оболочка под действием подвижных нагрузок // Исследования по теории пластин и оболочек. 1975. № 11. С. 303-316.
- Шмидт Г. Параметрические колебания. М.: Мир, 1978. 336 с.
- Гусев В.В., Калафатова Л.П., Олейник С.Ю. Исследование динамического состояния технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных оболочек из ситаллов // Вестник СевНТУ. 2012. С. 60-67.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ НАЛЕТА НА ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОЛИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА

А.Ю. ФИЛАТОВ - кандидат технических наук, В.И. СИДОРКО - доктор технических наук

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина

E-mail: filatov@ism.kiev.ua

*Описано взаимодействие частиц износа в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали в процессе полирования плоских поверхностей деталей из оптического стекла инструментом со связанным полировальным порошком. Рассчитаны координатные зависимости полного сечения рассеяния частиц износа инструмента. Описаны закономерности дискретного расположения фрагментов налета на обрабатываемой поверхности детали.*

**Ключевые слова:** полирование, рассеяние частиц, налет.

В последние времена в теории механической обработки неметаллических материалов получены новые результаты в области разработки технологии шлифования и полирования прецизионных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем [1-5]. К их числу относятся кластерная модель съема обрабатываемого материала при полировании диэлектриков [2-3] и физико-статистическая модель образования и удаления с обрабатываемой поверхности частиц шлама [4-6]. На основе указанных моделей был исследован механизм формирования обрабатываемой поверхности и образования частиц шлама, а также изучены кинетические зависимости шероховатости и отражающей способности обрабатываемых поверхностей деталей из стекла и кварца, полученные непосредственно в процессе полирования. При *in situ* контроле состояния обрабатываемой поверхности методами лазерной эллипсометрии [7] и рефлек-

тометрии [8] установлено, что периодическое изменение коэффициента отражения света обрабатываемой поверхностью во время полирования объясняется образованием фрагментов налета, состоящего из частиц обрабатываемого материала (шлама) и частиц износа инструмента [9]. На основе квантово-механического описания процесса рассеяния частиц шлама и износа, имеющих размеры порядка 3-4 нм, в зоне контакта детали с инструментом удалось изучить закономерности формирования микропрофиля обрабатываемой поверхности детали и механизм формирования налета частиц шлама на рабочей поверхности полировального инструмента [10-11]. Изучению закономерностей образования налета и дискретного расположения его фрагментов на обрабатываемой поверхности детали в процессе полирования инструментом со связанным абразивом посвящена настоящая работа.

Исследования проводились при полировании плоской поверхности образца диаметром 60 мм из алюмосиликатного стекла системы CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (плотность - 2,65 г/см<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности 0,99 Вт/(мК)) при помощи инструмента со связанным полировальным порошком из оксида хрома диаметром 72 мм (плотность 5,21 г/см<sup>3</sup>) на шлифовально-полировальном станке мод. 6ШП-100 при несимметрии штриха  $e_0=15$  мм, частотах вращения детали  $\omega_1=30,2$  с<sup>-1</sup> и инструмента  $\omega_2=37,7$  с<sup>-1</sup>, давлении прижима инструмента к детали 6,8 кГа, температуре СОТС (воды) - 300 К. В результате анализа процесса полирования стекла на основе кластерной модели износа и физико-статистической модели образования и

удаления частиц износа [3-5] показано, что при взаимодействии поверхностей детали и инструмента образуются частицы шлама и частицы износа инструмента. Частицы шлама подчиняются распределению Пуассона по площадям поверхности с параметром  $\nu = 0,6$  ( $i = \overline{0, N-1}$ ,  $N = 5$  - число выборок), имеют размеры  $d_1(i) \approx 2,5; 3,5; 4,3; 5,0; 5,6$  нм и наиболее вероятный размер  $a_v = 3,1$  нм. Средний размер частиц износа  $d_2 \approx 2,8$  нм. Производительность съема стекла  $1,26 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$ . За время одного оборота обрабатываемой детали ( $t_1 = 2\pi/\omega_1 = 0,2$  с) в контактной зоне объемом  $v_0 \approx 2,1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$  образуется  $n_1 \approx 2,2 \cdot 10^{13}$  частиц шлама и  $n_2 \approx 2,8 \cdot 10^{13}$  частиц износа. Концентрация частиц шлама и износа в зоне контакта инструмента и детали -  $1,2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}\text{с}^{-1}$ . Взаимодействие частиц износа инструмента с частицами шлама и между собой в зоне контакта инструмента и детали определяется суммой потенциалов их межмолекулярного

$$V_m(x) = -\frac{\hbar\omega_{123}d_1d_2}{16\pi x(d_1 + d_2)} \quad \text{и электрического}$$

$$V(x) = \frac{q_1q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon x} \quad \text{взаимодействия} \quad (\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с})$$

Дж·с - постоянная Планка,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  - электрическая постоянная;  $\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость смазывающей-охлаждающей технологической среды;  $\hbar\omega_{123}$  и  $\hbar\omega_{223}$  - константы Лифшица,  $\omega_{123} = 4,4 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_{223} = 2,3 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$ ,  $q_1 = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  и  $q_2 = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  - электрические заряды частиц шлама и износа соответственно [2, 12]. Фазы волновых функций частиц износа при рассеянии на частицах шлама в поле  $V_{21}(x)$  и частицах износа в поле  $V_{22}(x)$  определяются формулой

$$\delta_l(r) = -\int_0^\infty \frac{mV(x)dx}{\hbar^2 \sqrt{k(r)^2 - \frac{(l+1/2)^2}{x^2}}}$$

(где  $k(r) = \frac{mu(r)}{\hbar}$  - волновое число;  $m$  - масса;  $u(r)$  - скорость частицы износа инструмента; частицы;  $V(x) = \begin{cases} V_{21}(x) \\ V_{22}(x) \end{cases}$ ;  $r_{01} = [d_1(i=0) + d_2]/2$  и

$r_{02} = d_2$  - координаты, определяемые размерами частиц износа и минимальными размерами частиц шлама;  $l$  - азимутальное квантовое число частицы

износа, определяющее ее угловой момент).

Амплитуды рассеяния частиц износа инструмента определяются методом парциальных волн

$$f(\theta, r) = \frac{1}{2ik(r)} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1)P_l(\cos\theta)e^{2il\phi(r)}$$

(где  $P_l(\cos\theta)$  - полиномы Лежандра,  $\theta$  - угол рассеяния), а вероятности их рассеяния в телесный угол  $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$  и во всех направлениях определяются дифференциальным сечением рассеяния

$$I(\theta, r) = |f(\theta, r)|^2 = [\operatorname{Re} f(\theta, r)]^2 + [\operatorname{Im} f(\theta, r)]^2$$

и полным эффективным сечением рассеяния

$$Q(r) = 2\pi \int_0^\pi |f(\theta, r)|^2 \sin\theta d\theta$$

соответственно [12].

На основе *ab initio* вычислений в соответствии с квантовой теорией рассеяния частиц можно определить характеристики рассеяния частиц износа инструмента на частицах шлама и частицах износа, исходя из решения уравнения Шредингера. Дифференциальное сечение рассеяния частиц износа на частицах шлама минимального размера  $I_1$  ( $i = 0$ ) имеет максимальные значения 0,5 Тб/ср при углах рассеяния близких к  $0^\circ$  и 0,4 Тб/ср при углах около  $180^\circ$  только для центральных участков контактной зоны. Дифференциальное сечение рассеяния (в барнах в телесный угол 1 стерadian, 1 барн =  $10^{-24} \text{ см}^2$ ) частиц износа на частицах износа  $I_2$  характеризуется максимальными значениями 2,0 Тб/ср при рассеянии вперед и 1,0 Тб/ср - при рассеянии назад. Максимальные значения дифференциального сечения рассеяния также характерны для центральных участков зоны контакта инструмента и детали. Из анализа угловых зависимостей дифференциального сечения рассеяния следует, что при углах близких к  $0^\circ$  (рассеяние вперед) и  $180^\circ$  (рассеяние назад) рассеяние частиц износа инструмента на частицах шлама практически не зависит от их размеров. Суммарные величины дифференциального сечения рассеяния вперед частиц износа на частицах шлама  $I_{21}(r) = \sum_i I_1(\theta = 0, r, i)$  и частицах износа  $I_{22}(r) = I_2(\theta = 0, r)$  в зависимости от радиуса круговых зон рабочей поверхности инструмента показывают, что величина дифференциального сечения рассеяния частиц износа на частицах шлама вперед наиболее

существенна в центральной зоне, достигает 7,0 Тб/ср и почти в 200 раз превосходит величину дифференциального сечения рассеяния частиц износа на частицах износа. Это наблюдается в узкой кольцевой зоне рабочей поверхности инструмента шириной 0,5-1,0 мм и радиусом 3 мм. Именно из этой кольцевой зоны частицы износа инструмента устремляются к поверхности обрабатываемой детали, рассеиваясь на нулевой угол. Закономерности рассеяния частиц износа инструмента в контактной зоне и формирования микропрофиля обработанной поверхности при полировании кварца описаны в [10]. Аналогичные зависимости, характеризующие величину дифференциального сечения рассеяния назад, частиц износа на частицах шлама и частицах износа в различных круговых зонах поверхности инструмента, показывают, что из узкой кольцевой зоны рабочей поверхности инструмента вылетают частицы износа и после рассеяния на угол 180° устремляются назад к инструменту, на поверхности которого и образуется налет из частиц шлама [11].

Дифференциальное сечение рассеяния частиц износа имеет тенденцию к уменьшению в направлении от центральных зон рабочей поверхности инструмента к периферийным. Эти зависимости имеют очень сложный характер и величины отношения дифференциальных сечений рассеяния частиц износа на частицах шлама и на частицах износа вперед и назад для различных круговых зон рабочей поверхности инструмента могут изменяться в широких пределах: от 0,003 до 200,0. Рассеивание частиц износа вперед происходит преимущественно на частицах шлама, а вероятность их рассеяния на частицах износа инструмента значительно меньше.

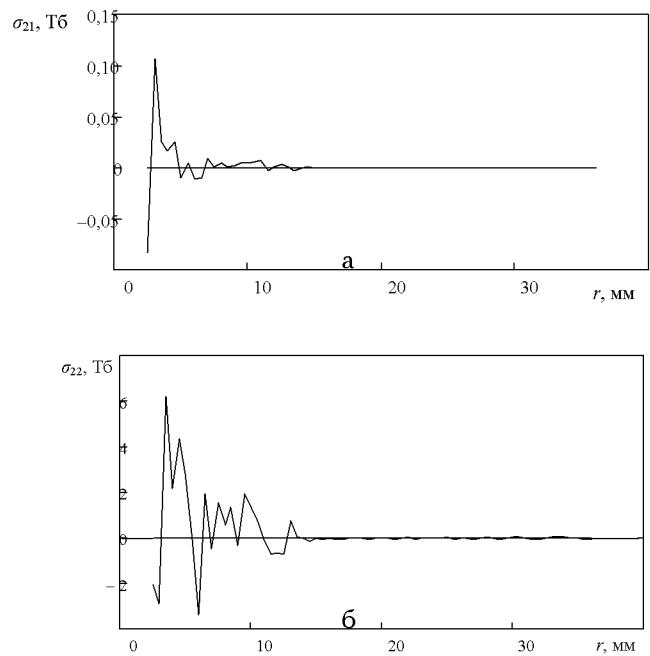
Квантово-механический подход к взаимодействию частиц износа инструмента и частиц шлама обрабатываемого материала позволяет рассчитать полное сечение рассеяния в соответствии с оптической теоремой через минимуму часть амплитуды рассеяния  $f(9)$  на нулевой угол ( $9 = 0$ ) согласно формуле [12]

$$\sigma_{opt}(r) = \frac{4\pi}{k(r)} \text{Im}[f(0)].$$

Координатные зависимости полного сечения рассеяния частиц износа на частицах шлама  $\sigma_{21}$  (рис. 1 а) и на частицах износа  $\sigma_{22}$  (рис. 1 б)

позволяют определить суммарную величину полного сечения рассеяния частиц износа инструмента при рассеянии вперед для процесса полирования плоской поверхности из стекла в описанных выше условиях, когда для частиц износа рассеивающими центрами являются частицы шлама или такие же частицы износа, в соответствии с формулой

$$\sigma_{opt}(r) = \frac{1}{n_1 + n_2} [n_1 \sigma_{21}(r) + n_2 \sigma_{22}(r)].$$



**Рисунок 1.**  
Зависимость полного сечения рассеяния частиц износа на частицах шлама (а) и на частицах износа (б) от радиуса круговых зон рабочей поверхности инструмента

Преимущественное рассеяние частиц износа вперед предопределяет их движение в направлении обрабатываемой поверхности в соответствии с координатной зависимостью полного сечения рассеяния  $\sigma_{opt}(r)$  (рис. 2 а), то есть при значительно большей вероятности рассеяния потока частиц износа на центральных участках зоны контакта инструмента и обрабатываемой детали, чем на периферийных. Максимальная величина полного сечения рассеяния частиц износа составляет 0,04 Тб, а линейная аппроксимация зависимости полного сечения рассеяния  $\sigma_{opt}(r)$  приведена на рис. 2 б.

При попадании частиц износа инструмента (полировального порошка - оксида хрома и органического связующего - полиэтилентерефталата) на поверхность алюмосиликатного стекла происходит образование налета.

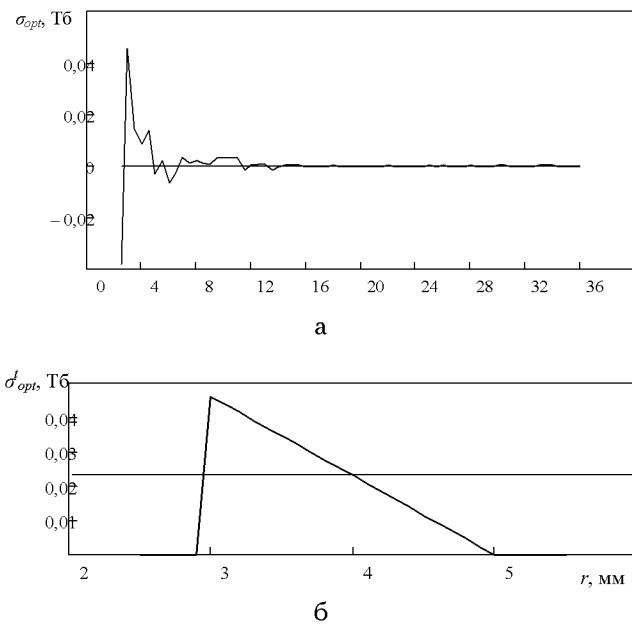


Рисунок 2.

*Зависимость полного сечения рассеяния частиц износа инструмента на всех частицах шлама и износа (а) от радиуса круговых зон его рабочей поверхности и ее линейная аппроксимация (б)*

Для определения координат зоны максимального воздействия частиц износа инструмента на обрабатываемую поверхность стекла воспользуемся функцией  $\sigma_{opt}(r)$ , которая определяет вероятность рассеяния частиц износа, пропорциональную отношению числа рассеянных частиц к плотности падающего потока частиц. Она описывает профиль волнового фронта частиц износа, перемещающихся в направлении обрабатываемой поверхности детали, в прямоугольной системе координат  $X_2O_2Y_2$ , начало которой совпадает с центром вращения инструмента. Профиль волнового фронта (рис. 2б) можно представить приближенной функцией и, преобразовав ее при переходе в систему координат  $X_1O_1Y_1$ , связанную с центром вращения детали, при помощи коэффициента

$$k(\rho) = \frac{1}{\pi \rho} \int_{\xi(\rho)}^{\eta(\rho)} \sqrt{1 + \left( \frac{dy_1}{dx_1} \right)^2} dx_1$$

$$\text{(где } \xi(\rho) = \frac{\rho^2 + e_0^2 - c^2}{2e_0}, \eta(\rho) = \frac{\rho^2 + e_0^2 - d^2}{2e_0} \text{,}$$

$c = 3 \text{ мм, } d = 4 \text{ мм,}$  можно получить распределение полного сечения рассеяния частиц износа вдоль радиуса круговых зон обрабатываемой поверхности детали (рис. 3), которое определяется функцией

$$\Sigma_0(\rho) = \begin{cases} k(\rho) \cdot \sigma_{opt}^t(\rho - \rho_m), & \rho_{min} < \rho < \rho_{max} \\ 0, & \rho \leq \rho_{min}, \quad \rho \geq \rho_{max} \end{cases}$$

(где  $\rho_m = e_0 - r_m$ ,  $\rho_{min} = 14 \text{ мм, } \rho_{max} = 17 \text{ мм}$  - радиусы, ограничивающие зону на поверхности детали, в которую рассеиваются частицы износа).

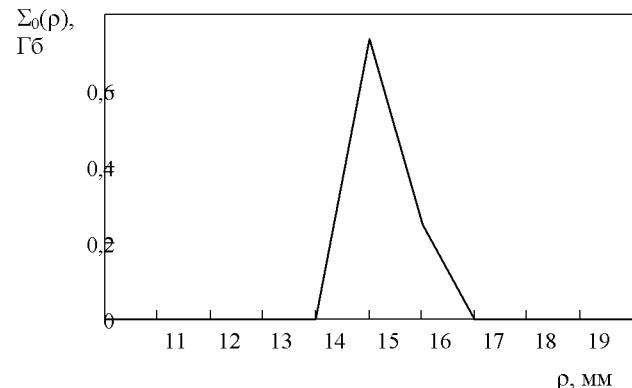


Рисунок 3.

*Функция распределения полного сечения рассеяния частиц износа от радиуса круговых зон обрабатываемой поверхности*

Функция распределения полного сечения рассеяния частиц износа вдоль радиуса круговых зон обрабатываемой поверхности детали  $\Sigma_0(\rho)$ , показывает, что наиболее плотно фрагменты налета располагаются в середине зоны при  $\rho \in [14 \text{ мм; } 17 \text{ мм}]$ .

При экспериментальном исследовании состояния обработанной поверхности детали из алюмосиликатного стекла при помощи сканирующего микроскопа анализатора "Camscan-4DV" установлено, что после полирования инструментом из полировального порошка  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  на ней образуется налет в виде отдельных фрагментов, дискретно расположенных в пределах одной колышевой зоны, ограниченной радиусами  $\rho \in [13 \text{ мм; } 18 \text{ мм}]$ , что согласуется с результатами теоретических расчетов. Отдельные фрагменты налета преимущественно расположены между двумя окружностями радиусами 14 мм и 16,5 мм, что подтверждает расчетные данные. Отдельные фрагменты налета имеют толщину 4-5 мкм, а в их состав входят те же химические элементы, что и в состав рабочего слоя инструмента ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), и не входят оксиды  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  и др., входящие в состав обрабатываемого стекла. Это значит, что налет состоит из частиц износа инструмента, которые объединяются в крупные агрегаты с размерами, которые могут достигать сотен микрометров.

Наблюдаемое явление, состоящее в возникновении налета частиц износа инструмента на обрабатываемой поверхности при полировании, является квантовым эффектом рассеяния наноразмерных частиц износа инструмента и частиц шлама при перемещении в контактной зоне, заполненной жидкостью. Квантово-механический подход к рассеянию частиц износа инструмента и частиц шлама при их межмолекулярном и электрическом взаимодействии, а также *ab initio* расчеты характеристик рассеяния частиц, позволили объяснить закономерности перемещения частиц износа, образования налета и локализации его фрагментов на обрабатываемой поверхности.

Полученные закономерности имеют общий характер и применимы для процессов полирования оптического стекла различных марок инструментами со связанными полировальными порошками и при помощи свободного абразива. Микроскопические исследования фрагментов налета из частиц износа инструмента на поверхности оптического стекла марки К8 после полирования инструментом со связанным полировальным порошком - полиритом марки ПФ на связующем из эпоксидной смолы ЭД-20, проведенные при помощи оптического микроскопа ЛОМО "МЕТАМР-1", оснащенного цифровой камерой Vision "STD-Res Series", показали, что их размеры составляют приблизительно 300 x 30 мкм<sup>2</sup>.

Таким образом, описаны закономерности локализации фрагментов налета на обрабатываемой поверхности детали, позволившие определить границы кольцевой зоны, в которой дискретно располагаются отдельные фрагменты налета. Теоретически рассчитанные размеры зоны совпадают с данными эксперимента. Экспериментально исследованы фрагменты налета на деталях из оптического стекла и кварца. При помощи методов оптической и электронной микроскопии подтверждено соответствие экспериментальных данных и теоретических квантово-механических расчетов.

#### Список литературы:

1. Rogov V.V., Filatov Y.D., Kottler W., Sobol V.P. New technology of precision polishing of glass optic. - Optical Engineering. - V. 40, august 2001. - P. 1641-1645.
2. Поперенко Л.В., Филатов Ю.Д. Технологія обробки оптичних поверхонь. Навчальний посібник, ВПЦ "Київський університет", Київ: 2004. - 165 с.
3. Филатов Ю.Д. Полирование прецизионных поверхностей деталей из неметаллических материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтвердые материалы, 2008, № 1. - С. 59-66.
4. Филатов Ю.Д., Сидорко В.И. Статистический подход к износу поверхностей деталей из неметаллических материалов при полировании // Сверхтвердые материалы, 2005, № 1. - С. 58-66.
5. Филатов Ю.Д. Теоретические основы финишной обработки высококачественных прецизионных оптических поверхностей // Сб. Международной Академии КОНТЕНАНТ. - декабрь 2009. - С. 19-30.
6. Filatov Yu., Sidorko V. Formation of Flat Optical Surfaces in Polishing / Jemna mechanika a optika.- 2009.- N 9.- S. 239-243.
7. Filatov O. Yu., Poperenko L.V. In situ ellipsometry of surface layer of nonmetallic transparent materials during its finish processing // Applied Surface Science, V. 253, Issue 1, 31, Oct. 2006, P. 163-166.
8. Filatov Yu.D., Filatov O.Yu., Heisel U. Storchak M., Monteil G. In situ control of roughness of processed surfaces by reflectometric method // Optical Micro- and Nanometrology III. edited by Christophe Gorecki, Anand Krishna Asundi, Wolfgang Osten, Proc. of SPIE Vol. 7718, pp. 77181J-9 (2010).
9. Filatov Yu. D., Filatov O.Yu., Monteil G. Heisel U., Storchak M. Boundabrasive grinding and polishing of surfaces of optical materials // Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XI; and Advances in Thin Film Coatings VI. Proc. of SPIE Vol. 7786 pp. 778613-9 (2010).
10. Филатов Ю.Д., Филатов А.Ю., Сирота О.О., Ящук В.П., Монтеі Г., Хайзель У., Сторчак М. Влияние рассеяния частиц износа инструмента в контактной зоне на формирование микропрофиля обработанной поверхности при полировании кварца // Сверхтвердые материалы, 2010, № 6. - С. 68-77.
11. Филатов А.Ю., Поперенко Л.В., Ящук В.П., Сидорко В.И., Хайзель У., Сторчак М. Образование налета продуктов износа на поверхности рабочего слоя полировального инструмента // Сверхтвердые материалы, 2011, № 1. - С. 59-71.
12. Филатов А.Ю., Сидорко В.И. Локализация фрагментов налета на обрабатываемой поверхности при полировании неметаллических материалов // Сверхтвердые материалы, 2011, № 5. - С. 73-87.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ КОЛИЧЕСТВА РЕЖУЩИХ КРОМОК И УГЛА ИХ ЗАОСТРЕНИЯ С АБРАЗИВНОЙ СПОСОБНОСТЬЮ АЛМАЗНЫХ МИКРОПОРОШКОВ

ПЕТАСЮК Г.А., ШАМРАЕВА В.С., ПЕТАСЮК О.У.

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина

E-mail: petasyuk@ukr.net

*Исследовано влияние параметров режущих кромок зерен и других эксплуатационных характеристик алмазных микропорошков на их абразивную способность. Установлена в аналитическом виде взаимосвязь абразивной способности с показателями этих характеристик. Полученные результаты могут быть использованы при изучении процессов алмазно-абразивной обработки, а также при выработке требований к качеству используемых для этого алмазных порошков.*

**Ключевые слова:** абразивная способность, алмазные микропорошки, режущие кромки, характеристики, эмпирическая математическая модель

Абразивная способность алмазных микропорошков, используемых на операциях механической (в том числе и прецизионной) обработки, является основной их эксплуатационной характеристикой. Проводившимися ранее исследованиями [1-3] установлено, что на абразивную способность существенное влияние оказывают размерный фактор зерен и их прочность. Вполне очевидно, что наряду с размерными характеристиками на абразивную способность порошка оказывают влияние также геометрические (площадь проекции, периметр проекции, количество режущих кромок зерен, их угол заострения) характеристики, характеристики формы и развитости поверхности, число зерен в одном карате, усилия прижима, силовой фактор. Поэтому актуальной задачей является дальнейшее изучение феномена абразивности алмазных порошков и порошков других сверхтвердых материалов

(СТМ). Причем с акцентом на количественное оценивание и аналитическое описание взаимосвязи абразивной способности с другими характеристиками порошков. В настоящее время созданы и активно используются современные компьютерно-технические средства автоматизированной диагностики размерных, геометрических и морфологических (совокупно морфометрических) характеристик абразивных порошков, разработаны эффективные компьютерно-аналитические методы определения многих важных их характеристик. Это обстоятельство вносит новые перспективы в научно-прикладные исследования абразивной способности алмазных микропорошков, создает предпосылки более глубокого изучения ее сути.

Нами в качестве независимых параметров, оказывающих влияние на абразивную способность, исследовались количество ( $n$ , шт.) и средний угол заострения ( $\phi$ , град.) режущих кромок зерен, их шероховатость ( $R_g$ ), число зерен в одном карате порошка ( $N$ , шт.), удельный периметр ( $\rho_{уд}$ , 1/мкм), эквивалентный диаметр зерен ( $d_{экв}$ , мкм), внешняя удельная поверхность ( $F_{уд}$ , м<sup>2</sup>/кг), усилия прижима ( $P_n$ , г) при испытании на абразивную способность.

Углы заострения режущих кромок зерен порошков СТМ и других абразивных порошков являются одним из основных факторов, определяющих их абразивную способность. Информация о режущих кромках зерен очень важна для эффективного и прогнозированного использования порошков СТМ как абразивного материала. Обычно определение углов заострения режущих кромок осуществляется путем ручной зарисовки

контура проекции совокупности зерен на часовом проекторе с последующим использованием для таких же ручных измерений углов специальных шаблонов [3]. Но особого развития такие исследования не получили, поскольку процедуры получения конечного результата очень трудоемки.

В ИСМ им В. Н. Бакуля НАН Украины разработан оригинальный метод экспериментально-аналитического определения среднего значения угла заострения и количества режущих кромок абразивных порошков. Согласно этому методу указанные характеристики находятся из полученной нами система уравнений:

$$f - \frac{n \cdot Rg^2 \cdot \operatorname{tg}(\pi/n)}{\pi[Rg - \operatorname{tg}(\pi/n) \cdot \sqrt{Rg^2 - 1}]} = 0, \\ \Phi = \frac{\pi(n-2)}{2n} - \arccos\left[\frac{1}{Rg}\right]. \quad (1)$$

Исходными данными для решения такой задачи служит форм-фактор  $f$  и шероховатость зерен абразивного порошка, а  $n$  и  $\Phi$  - неизвестные уравнений. Форм-фактор характеризует степень окружности проекции зерна, шероховатость  $Rg$  - степень развитости его поверхности [4]. Более подробно методика определения  $n$  и  $\Phi$  из системы уравнений (1) изложена в работе [5].

Испытания на абразивную способность проводились по методике стандартов [6, 7]. Испытывались 20 образцов микропорошков синтетического и природного алмаза марок АСМ и АМ зернистостей 60/40, 40/28, 28/20 и 20/14. Кроме того, испытывались три образца микропорошков природного алмаза с включением лонсдейлитовой фазы, отличающиеся повышенной абразивной способностью, а также три образца мелкозернистых низко прочных образца шлифпорошков синтетического алмаза. Всего было исследовано 26 образцов. Предварительно на приборе DialInspect.OSM [8] производилась диагностика морфометрических характеристик исследуемых микропорошков. С использованием полученных данных рассчитывали количества режущих кромок и среднее значение угла их заострения. На основании результатов DialInspect-диагностики также расчетным путем по разработанным в ИМС им В. Н. Бакуля НАН Украины методикам [9, 10]

определялись внешняя удельная поверхность и число зерен в одном карате микропорошка. Стратегия исследования состояла в том, чтобы учесть влияние на абразивную способность по возможности большего количества характеристик порошка, не увеличивая при этом числа независимых переменных в описывающих эту взаимосвязь эмпирических аналитических зависимостях. По этой причине в качестве независимых переменных ( $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ ) принимались безразмерные комплексы, составленные из произведения отдельных характеристик и (или) их отношений:  $x_1 = d_{\text{экв}} \rho_{\text{уд}} / Rg$ ,  $x_2 = 100 \rho F_n u_{ds} / (A_t N)$ ,  $x_3 = \Phi f u_f / 10$ ,  $x_4 = E$ ,  $x_5 = F_{el} u_{Fel}$ . Здесь  $d_{\text{экв}}$  - эквивалентный диаметр зерен (мкм),  $E$  - показатель эллиптичности зерен (безразмерная величина),  $A_t$  - площадь проекции зерен ( $\text{мкм}^2$ ),  $f$  и  $F_{el}$  - соответственно форм-фактор округлости зерен и их Фере-удлинение (безразмерные величины),  $u_{ds}$ ,  $u_f$ ,  $u_{Fel}$  - показатели однородности микропорошка по эквивалентному диаметру, форм-фактору округлости и Фере-удлинению зерен соответственно (безразмерные величины). Смысл этих и других морфометрических характеристик абразивных порошков, диагностируемых прибором DialInspect.OSM, и показателей их однородности более полно изложен в работах [4, 11].

По результатам экспериментальных исследований составлен массив исходных данных (табл. 1), необходимых для поиска наиболее адекватной эмпирической математической модели. В программу исследований входил также корреляционный анализ взаимосвязи независимых факторов с абразивной способностью. Полученные коэффициенты корреляции (табл. 2) как парной, так и множественной ( $R$ ) довольно высокие. Относительно большие значения парных коэффициентов корреляции указывают на объективно существующую взаимосвязь независимых факторов с абразивной способностью в отдельности. А близость коэффициента множественной корреляции к единице ( $R=0,9212$ ) свидетельствует о тесной взаимосвязи между совокупность всех рассматриваемых факторов.

Математическая обработка совокупности данных расчетного определения показателей введенных таким образом независимых переменных и соответствующих им экспериментальных значений

Таблица 1

Перечень испытанных алмазных порошков\*, значения независимых факторов, соответствующие им экспериментальные ( $A_{\text{эксп.}}$ ) и расчетные ( $A_{\text{расч.}}$ ) значения абразивной способности, относительная погрешность ( $\delta$ ) расчетного определения

Алмазные порошки		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$A_{\text{эксп.}}$	$A_{\text{расч.}}$	$\delta, \%$
№ образца	Марка и зернистость, мкм								
1	ACM 40/28	4,52	6,28	9,03	1,43	0,69	5,710	5,49	3,84
2	ACM 40/28	4,55	5,60	7,13	1,45	0,48	5,160	5,11	1,03
3	AM 40/28	4,51	5,36	7,63	1,46	0,50	5,300	5,49	3,56
4	ACM40/28	6,98	,90	8,73	1,38	0,65	5,150	5,15	0,09
5	ACM40/28 п	4,56	6,15	7,98	1,39	0,51	5,680	5,44	4,17
6	ACM40/28 к	5,00	6,48	7,30	1,41	0,52	5,490	5,62	2,34
7	ACM 20/14 исх.	4,41	5,49	7,69	1,37	0,56	4,840	4,72	2,48
8	ACM 20/14	4,36	5,65	9,03	1,35	0,54	5,250	5,44	3,69
9	ACM 28/20	4,73	5,19	7,54	1,58	0,68	5,630	5,61	0,36
10	AM 28/20	4,58	5,17	8,37	1,48	0,72	5,310	5,08	4,27
11	ACM 60/40	4,52	4,71	9,28	1,42	0,71	5,300	5,22	1,43
12	40/28 исх.	4,46	5,56	9,45	1,41	0,75	5,040	4,92	2,28
13	40/28 №1 ХО	4,44	5,35	9,92	1,39	0,75	5,010	4,98	0,53
14	40/28 №2 TXO	4,43	5,34	9,93	1,39	0,75	5,230	4,97	4,94
15	40/28 №3 TXO	4,45	5,73	9,23	1,40	0,75	4,490	4,77	6,20
16	40/28 №4 TXO	4,49	5,62	8,89	1,42	0,73	4,610	4,92	6,63
17	40/28 №5 TXO	4,48	5,29	9,39	1,43	0,73	5,050	5,18	2,48
18	40/28 №6 TXO	4,43	5,47	9,90	1,40	0,72	5,020	5,29	5,36
19	40/28 №7 TO	4,40	5,81	9,99	1,37	0,71	5,190	5,28	1,66
20	Лонсд. А	6,45	5,87	5,49	1,74	0,58	8,720	8,65	0,79
21	Лонсд. Б	5,93	4,94	5,29	1,77	0,51	7,340	7,35	0,07
22	-25+16	6,55	5,70	5,76	1,63	0,55	8,190	8,17	0,20
23	AC20 100/80 исх	4,49	5,96	10,43	1,28	0,77	4,600	4,61	0,18
24	ACM 20/14 ЭГ	4,85	5,76	8,98	1,38	0,69	5,650	5,57	1,48
25	AC80/63 ЭГ	4,44	5,73	11,09	1,29	0,76	5,340	4,99	6,55
26	AC 100/80 ЭГ	5,28	6,64	11,05	1,25	0,79	5,320	5,43	1,98

\* Примечание: п - пенный продукт флотации, к - камерный продукт флотации, ХО - химическая обработка, TXO - термохимическая обработка, исх. - исходный образец, м - модифицированный образец, Л - образцы природного алмаза с включением лонсдейлитовой фазы, ЭГ - образцы, полученные дроблением методом электрогидроимпульсного удара.

Таблица 2

Коэффициенты парной корреляции между зависимым и независимыми факторами и множественной корреляции между совокупностью рассматриваемых факторов

—	A	$x_1$	$x_2$	$X_3$	$x_4$	$x_5$
A	1	0,71559	0,73004	-0,73051	0,80943	-0,44269
$x_1$	0,71559	1	-0,48302	-0,55363	0,54597	-0,30271
$x_2$	0,73004	-0,48302	1	0,062683	-0,079063	0,00813
$x_3$	-0,73051	-0,55363	0,062683	1	-0,86802	0,79450
$x_4$	0,80943	0,54597	-0,079063	-0,86802	1	-0,47150
$x_5$	-0,44269	-0,30271	0,00813	0,79450	-0,47150	1
—	коэффициент множественной корреляции $R = 0,9212$					

абразивной способности показала, что их взаимосвязь наилучшим образом аппроксимируется зависимостью:

$$A = \frac{1}{a_0 + a_1 \sqrt{\frac{P_{\text{уд}} d_3}{R}} + \frac{a_2 A_t N}{100 P_{\text{н}} F_{\text{уд}} u_{d_3}} + \frac{\sqrt{10} a_3}{\sqrt{\varphi C u_c}} + a_4 E \sqrt{E} + \frac{a_5}{1,5(\lg F_{el} + \lg u_{F_{el}})}} \quad (2)$$

где  $a_0 = 0,3629276$ ,  $a_1 = -0,2158622$ ,  $a_2 = 0,1220165$ ,  $a_3 = 1,179514$ ,  $a_4 = -0,1176289$ ,  $a_5 = -0,01646103$  рабочие параметры модели [12].

Зависимость (2) получена с использованием компьютерно-программной системы многовариантного построения и анализа эмпирических математических моделей LrAproh [13]. Было проанализировано более 1000000 эмпирических математических зависимостей. В двух последних столбцах табл. 1 приведены результаты расчетного определения абразивной способности по зависимости (2) и относительная погрешность такого определения ( $A_{\text{расч}}$  и  $\delta$  соответственно). Анализ показывает, что средняя относительная погрешность полученной аппроксимирующей зависимости (2) составляет 2,6389 %, максимальная - 6,63%.

Полученная эмпирическая модель, учитывая высокую степень ее адекватности, может быть использована для практической диагностики абразивной способности микропорошков СА в случае, когда не требуется слишком большая точность определения этих характеристик. Основным достоинством такого способа установления значений указанной характеристики является его экспрессность и сравнительно небольшая трудоемкость практической реализации. При этом получение необходимых для их практического применения исходных данных не предполагает проведения специальных испытаний. В качестве таковых могут быть использованы результаты микроскопического анализа, который осуществляется на современных автоматизированных приборах. Проведение этой процедуры предписывается стандартом и имеет целью определение показателей зернового состава порошка и идентификации его зернистости.

#### Список литературы:

1. Богданович М.Г. Абразивная способность микропорошков синтетического алмаза // Синтетические алмазы. 1969. вып. 2. С. 42-45
2. Богданович М.Г., Гинзбург О.В., Волошин М.Н., Киццинская З.А. Зависимость абразивной способности алмазных порошков от прочности зерен // Синтетические алмазы. 1972. вып. 2. С. 12-14
3. Порошки и пасты из синтетических алмазов / Ю.И. Никитин, С.М. Уман, Л.В. Коберниченко и др.- Киев: Наук. думка, 1992
4. Богатырева Г.П., Петасюк Г.А., Базалий Г.А., Шамраева В.С. К вопросу однородности алмазных микропорошков по морфологическим характеристикам // Сверхтвердые материалы. 2009. №2. С. 71-81
5. Петасюк Г.А. Экспериментально-аналитический метод определения среднего значения углов заострения режущих кромок зерен абразивных порошков // Инструментальный світ. 2010. №2(46). С. 37-40
6. ДСТУ 3292-95. Порошки алмазні синтетичні. Загальні технічні умови. Введ. 01.01.1996.- Київ: Держстандарт України, 1995
7. ГОСТ 9206-80 "Порошки алмазные. Технические условия" - М.: Изд-во стандартов, 1981
8. List E., Frenzel J., Vollstaedt H. A new system for single particle strength testing of grinding powders // Industrial Diamond Review. 2006. № 1. Р. 42-47.
9. Петасюк Г.А. Дискретно-геометрический метод измерения внешней удельной поверхности порошков сверхтвердых материалов // Измерительная техника" 2008. №1 С. 59-64
10. Петасюк Г.А., Сирота Ю.В. Аналитическое определение количества зерен в одном карате алмазного порошка на основе экстраполяционно-аффинной 3D модели зерна // Сверхтвердые материалы. 2012. № 3. С. 70-82
11. Новиков Н.В., Богатырева Г.П., Петасюк Г.А., Никитин Ю.И. Методика определения показателей однородности порошков синтетического алмаза на основе системно-критериального подхода // Инструментальный світ. 2006. №3(31). С. 4-6
12. Рыжиков Ю.И. Решение научно-технических задач на персональном компьютере. - СанктПетербург: КОРОНАпринт, 2000
13. Петасюк Г.А., Петасюк О.У. Компьютерно-программная система многовариантного построения и анализа эмпирических математических моделей LrAproh для применения в научно-прикладных задачах материаловедения // Порошковая металлургия. Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Минск. 2008. Вып. 31. С. 58-63.

# АЛМАЗНАЯ ОБРАБОТКА СФЕРИЧЕСКИХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ НА АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ОБОРУДОВАНИИ ФИРМЫ «ОРТОТЕСН», Германия

ПЕТРОВ С.Н. - кандидат технических наук,

ОАО "Научно-производственное предприятие космического приборостроения "Квант", г. Ростов-на-Дону

E-mail: sinoptic60@gmail.com

*В статье рассмотрен опыт изготовления плоских металлических зеркал, используемых в узлах сантирования оптико-электронных приборов ориентации космических аппаратов.*

**Ключевые слова:** плоские металлические зеркала, алмазные пасты, алмазные порошки, алмазные инструменты.

На предприятии ОАО "Научно-производственное предприятие космического приборостроения "Квант", (г. Ростов-на-Дону) имеется большой опыт изготовления плоских металлических зеркал, используемых в узлах сканирования оптико-электронных приборов ориентации космических аппаратов (рис 1). Технология

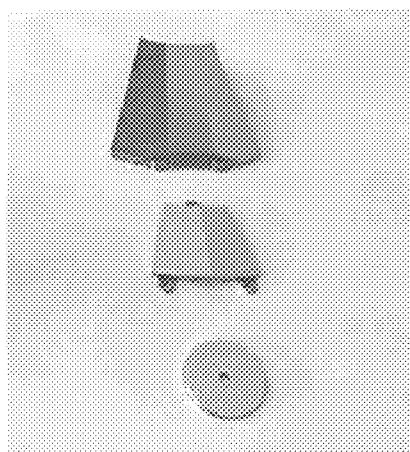


Рисунок 1

изготовления таких зеркал традиционно основана на методе поверхностного притира. В качестве шлифующего и полирующего агентов используются алмазные пасты и микропорошки в виде водных суспензий. Инструментом служат металлические планшайбы, предварительно отшлифованные до минимальных параметров плоскости. Основные требования, предъявляемые к материалу зеркал - их высокая твердость и коррозионная устойчивость. Практика показывает, что оптимальной является твердость поверхности 53...55 HRC, что может быть достигнуто путем закалки предварительно изготовленной механическим путем подложки. Коррозионная стойкость зеркал обеспечивается самим составом легированной стали. Другим способом получения твердой металлической поверхности служит гальваническое или химическое нанесение слоя никеля с последующей его обработкой. Достигаемые параметры плоскости подобных зеркал составляют 1-2 колца на диаметре 50-70 мм. Разрешающая способность  $\varepsilon$  поверхности составляет 13" и выше. Для достижения наивысшего качества поверхности применяется доводка поверхности на смоляном полировальнике с использованием субмикронных алмазных порошков.

Однако даже такие приемы не избавляют нас от наличия на полированной поверхности сетки очень мелких царапин (т.н. "ласин"). Поскольку это является следствием самого способа обработки, полностью избавиться от ласин чрезвычайно трудно. Одним из способов может быть

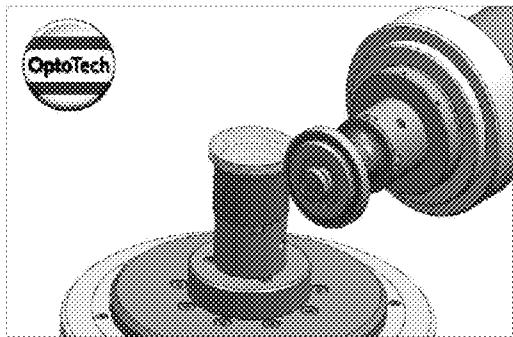


Рисунок 2

добавление в полирующую сuspензию нейтральной жидкости с большей, чем у воды вязкостью.

Следующим шагом в развитии технологии изготовления металлических зеркал для нас стало использование алмазной автоматизированной обработки с обкаткой алмазным инструментом по образующей оптической поверхности.

Алмазный инструмент при этом имеет торицкую, а точнее сказать сферическую ( $R_1=R_2$ ) рабочую поверхность, и контакт с поверхностью осуществляется в очень малой "точечной" зоне (рис. 2). Траектория движения инструмента обеспечивается системой ЧПУ и пакетом прикладных программ. Поскольку точность позиционирования инструмента не превышает 1 мкм, заготовка крепится в гидрозажимном патроне, а скорость вращения круга может изменяться в пределах до 5000 об/мин., открывается широкий диапазон выбора режимов обработки и достижения высокой точности. Именно высокая

точность шлифовального станка ASM 100 CNC ТС позволила взяться за обработку твердых металлических поверхностей, не рискуя при этом войти в жесткий контакт с поверхностью, повредить алмазный инструмент и вызвать критическое повышение мощности станка (рис. 3). Измеренный после окончания работы износ алмазного инструмента составил не более 0,01 мм на диаметре 120 мм, что свидетельствует о его высоком качестве. Необходимо заметить, что форма инструмента корректируется на том же шлифовальном станке и основана на сферической форме круга. В этой схеме правильный инструмент располагается как нижнее звено.

Однако предлагаемый способ обработки пока мало применяется в отечественной оптико-механической отрасли. Не в последнюю очередь это связано со стареющим парком оборудования, его ограниченными возможностями. Более известны примеры алмазного точения медных зеркал алмазным резцом (Цеснек Л.С. и др.). При этом очень серьезные требования предъявляются к жесткости системы СПИД. Конечно, такой метод обработки не стоит на месте и также находится в развитии, в чем можно было убедиться на проходившей в мае 2012 г. во Франкфурте-на-Майне выставке Optatec 2012.

Так, например, немецкая фирма Kugler представила станок, шпиндельная бабка которого была изготовлена из гранита, что придавало ему особую термическую и вибрационную стабильность (рис. 4).



Рисунок 3

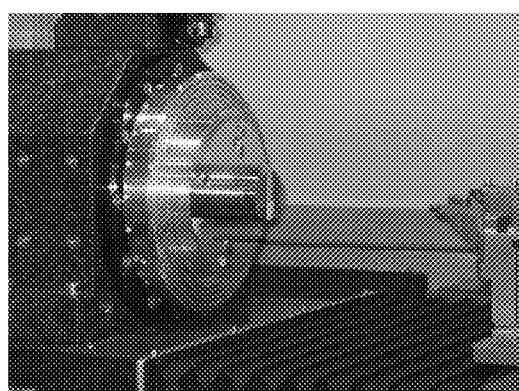


Рисунок 4

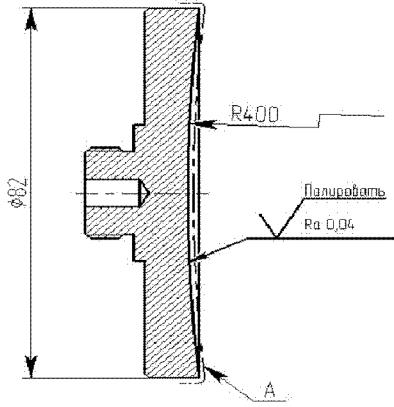


Рисунок 5

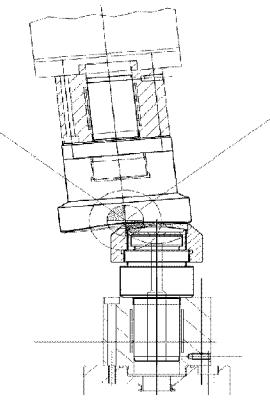


Рисунок 7

Для получения высоких результатов нами было изготовлено гальваническое никелевое зеркало на подложке из сплава D16 диаметром 82 мм и радиусом 400 мм. Металлическая подложка зеркала протачивалась на высокоточном токарном станке SPINNER под последующее нанесение гальванического никеля (рис. 5). Радиус выдерживался с учетом наносимого слоя никеля. Начальная толщина никелевого покрытия не превышала 150 мкм. Столы небольшая толщина никеля предъявляла особые требования к точности станка. Алмазная обработка была проведена в два перехода - 100/80 и 40/28. После обработки толщина никеля не превышала 40-60 мкм. Для предотвращения т.н. "завала края" нами был использован специальный внешний поддерживающий контур, который по завершении удалялся. Он представлял собой полимерно-минеральную композицию, твердость которой подбиралась соотношением компонентов.

Полирование проводилось на станке ASP-200 (OptoTech) (рис. 6).

Для полирования поверхности использовалась тиксотропная суспензия окиси алюминия и полноразмерный полировальный инструмент с гранитным корпусом.

Обработка велась по известной схеме "синхроспид" (рис. 7). Использование такой технологии позволило нам в итоге добиться практически полного отсутствия даже малейших царапин. Шероховатость поверхности составила  $Rz 0,05$ . Кроме описанного метода полирования мы использовали также обработку малым упругим инструментом FEM с использованием пакета прикладных программ POLYCAM (рис. 8). Последний метод показал себя особенно эффективным при обработке асферических поверхностей и исправлении зональных ошибок.

Точныхные параметры зеркала измерялись контактным способом на асферическом профилометре TalySurf Form PGI 1240 (Taylor-Hobson). Одна из профилограмм представлена

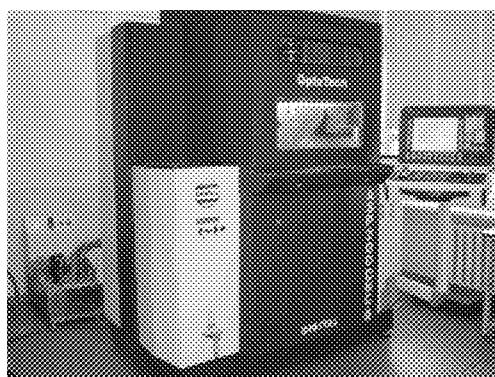


Рисунок 6

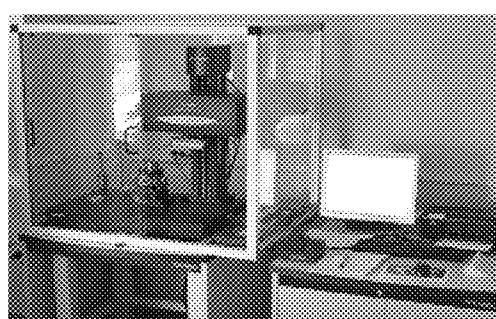


Рисунок 8

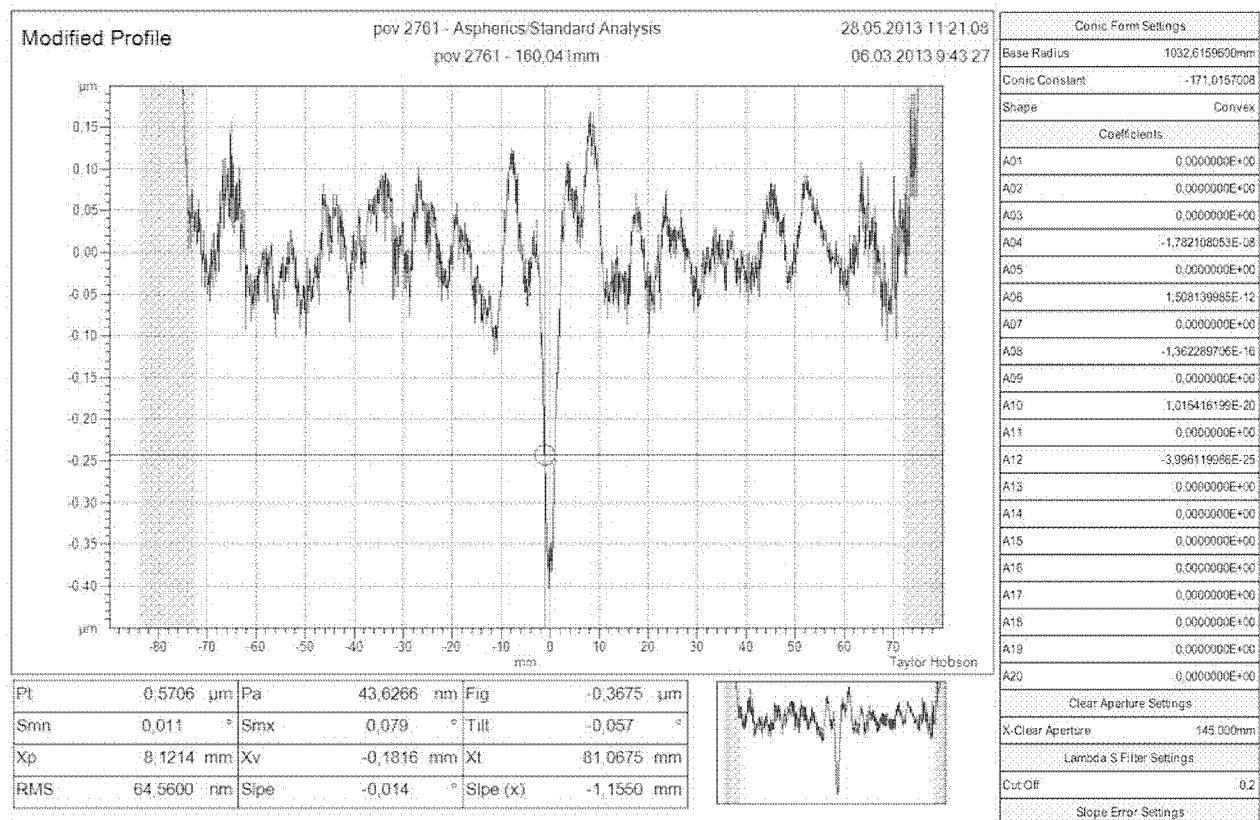


Рисунок 9

на рис. 9. Как видно, размах отклонения формы поверхности лежит в пределах 0,2 - 0,3 мкм, что соответствует 1 кольцу т.н. "цвета".

Из таблицы также можно видеть, что шероховатость поверхности соответствует 14 классу, т.е. Rz 0,05, что в обычных условиях практически недостижимо.

Как уже упоминалось, кроме вышеописанного опыта проводились работы с асферическими металлическими зеркалами, где также получены положительные результаты. Стоит отметить, что исходная подложка при этом должна протачиваться по эквидистантной кривой, которой соответствует иное уравнение поверхности.

# **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ И ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИЗ САПФИРА ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ПРИ ТРИБОХИМИЧЕСКОМ ПОЛИРОВАНИИ**

**В. В. РОГОВ** - доктор технических наук, академик ОАК

**Институт сверхтвёрдых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины**

**E-mail:** krotenko\_t\_1@ukr.net

*Представлен обзор информационных источников по физико-химическим процессам формирования прецизионных поверхностей деталей электронной техники и оптических систем из стекла и сапфира ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Установлено, что невозможно обеспечить необходимые требования к состоянию их поверхностей до уровня "атомно-гладких" без физико-химического взаимодействия обрабатывающих полировальных составов и обрабатываемого материалов на заключительном этапе обработки - трибохимическом полировании.*

**Ключевые слова:** физико-химическая обработка, трибохимическое полирование, стекло, сапфир.

Развитие современного оптического и электронного приборостроения в первую очередь определяется созданием нового уровня функциональных возможностей оптико-электронных приборов и устройств и, соответственно, повышением технических требований к состоянию шероховатости ( $R_a \leq 0,2$  нм), классу оптической чистоты ( $\rho 0\text{-}10$ ,  $\rho 0\text{-}20$ ), высокой отражательной способности и высокой точности формы функциональных поверхностей их деталей. В связи с этим приоритетным является направление исследования многофакторных условий формирования нанорельефа поверхности деталей с вышеуказанными требованиями, в первую очередь механики и физико-химии контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали.

Исследование физико-химического взаимодействия в зоне контакта при финишной прецизионной обработке функциональных поверхностей

деталей наноэлектроники и оптики из стекла и сапфира тесно связано с изучением химических и физико-химических превращений на поверхности обрабатываемых материалов под воздействием энергии трения и относится к трибохимии - области химии, изучающей химические и физико-химические изменения твердых веществ под влиянием механической энергии [1]. Помимо физических свойств на трибологические характеристики взаимодействующих материалов большое влияние оказывают химические свойства самих контактируемых поверхностей [2]. Деформация поверхностных слоев при скольжении вызывает их активизацию, которая, совместно с повышением температуры на пятнах фактического контакта, интенсифицирует химические реакции. От кинетики химического взаимодействия контактирующих поверхностей сильно зависят сила и коэффициент трения, которые, исходя из основных трибологических принципов [3], имеют молекулярно-физическую природу и включают такие процессы как адгезия, адсорбция, хемосорбция и др., влияющие на формирование поверхностного слоя обрабатываемого материала. Таким образом, данные области науки можно считать основополагающими в достижении вышеуказанных целей и задач. Однако, как показал глубокий, масштабный анализ доступных источников информации, использование этих областей знаний в технологических процессах финишной прецизионной обработки деталей оптических систем и электронной техники из неметаллических материалов, в особенности сапфира, недостаточно, в отличие от их использования в других процессах (дробления, измельчения природных материалов и т. п.). Наиболее изучен-

ной является десятилетиями сложившаяся на предприятиях оптической промышленности классическая технология прецизионного полирования оптических деталей из кремнеземсодержащего стекла  $\text{SiO}_2$  [4], а также разработка полировальных составов, в частности, полирита на основе диоксида церия  $\text{CeO}_2$ , с применением различных полировальных подложек. Авторами установлено, что вклад физико-химии в процесс полирования определяется энергетической выгодностью хемосорбции кремнезема на зернах полировального порошка  $\text{CeO}_2$ . Съем материала происходит, в основном, за счет механически активированной притиром хемосорбции и возрастает с увеличением содержания  $\text{SiO}_2$  в стекле. Весьма эффективным полировальным составом является состав на основе диоксида церия  $\text{CeO}_2$ , а наиболее эффективным - на основе диоксида тория  $\text{ThO}_2$ . Эффективность их зависит от кристаллической структуры и хемосорбционной способности, которая обусловлена структурно-геометрическим соответствием расположения атомов кислорода на гранях 111 кристаллов  $\text{CeO}_2$  с размерами спаренного тетраэдра диортогруппы  $\text{Si}_2\text{O}_7$  стекла. Дальнейшее развитие исследований физико-химических аспектов процесса полирования оптических деталей из силикатных стекол [5-7], выполненных в Институте сверх-

твердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины в 80-90-х годах прошлого столетия, завершилось разработкой полировального инструмента со связанными частицами полировального порошка  $\text{CeO}_2$  в составе композитов Аквапол-1, -2, -5, -7 и -8 [8], трибохимического механизма и технологии процесса полирования оптических деталей из кремнеземсодержащих стекол. Установлено, что физико-химический механизм процесса полирования оптического стекла инструментом Аквапол включает совокупность проявления процессов диспергирования стекла на атомно-молекулярном уровне:

- в гидролизе растворимых силикатов в поверхностном слое при взаимодействии с водой;
- в адгезионном изнашивании путем массопереноса фрагментов стекла от менее когезионно-прочного  $\text{SiO}_2$  к более когезионно-прочному  $\text{CeO}_2$ ;
- в хемосорбционном изнашивании, сопровождающимся сорбционным массопереносом кремнезема стекла на  $\text{CeO}_2$ , усиливающимся при введении в состав полировального композита хлорида аммония  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ;
- в преобладающем усталостном износе.

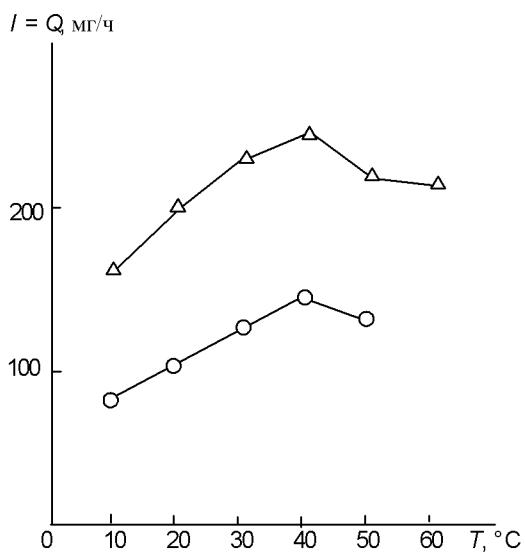
При этом достигаются высокое качество и производительность обработки (табл. 1), а также значительное сокращение расхода полировального состава из  $\text{CeO}_2$ .

**Таблица 1.**  
*Полирующая способность различных полировальных составов (композитов) при полировании деталей оптических систем и электронной техники из стекла К-8 и ситалла*

Полировальный состав (композит)	Обрабатываемая деталь	Состояние обрабатываемой поверхности			$Q$ , мг/ч
		$R_a$ , мкм	$R_{max}$ , мкм	Класс оптической чистоты $P$	
Водная суспензия (Т:Ж = 1:10) на основе полирита ПФ*, с применением смоляного полировальника	приборные линзы, призмы, подложки, окна	не $\geq 0,01$	не $> 0,05$	не хуже II	не менее 80
Аквапол-1, -2 [8]	то же	0,001—0,002	не $> 0,015$	II—III	$\sim 200$
Аквапол-5	плоские подложки лазерных зеркал, панели жидкокристаллических дисплеев, окна	0,001	не $> 0,007$	0—40—II	$\sim 140$
Аквапол-7, -8		0,0003	не $> 0,003$	0—10—0—40	$\sim 100$

*Примечание.* Параметры  $R_a$  и  $R_{max}$  измеряли на атомно-силовом микроскопе "Nano Scope IIIa Dimension 3000"

\* ТУ48-4-244-82



*Зависимость интенсивности взаимодействия кремнезема  $\text{SiO}_2$  с  $\text{CeO}_2$  и производительности съема стекла К-8 при полировании его супензией из полирита (s) на основе  $\text{CeO}_2$  и инструментом Аквапол-2 (n) от температуры в зоне их контакта*

На рисунке представлена зависимость интенсивности  $J$  взаимодействия  $\text{SiO}_2$  с  $\text{CeO}_2$  и, соответственно, производительность  $Q$  съема стекла К-8 при полировании его супензией из полирита на основе  $\text{CeO}_2$  и инструментом Аквапол-2 от температуры в зоне их контакта. Как следует из графика, увеличение  $J$  и  $Q$  происходит идентично для супензии и инструмента до темпера-

туры  $40^\circ \text{ C}$  в зоне контакта, однако их значения для инструмента в два с лишним раза превышают показатели для супензии.

Инструменты в виде сферических притиров на основе композитов Аквапол-1, -2 в течение более восьми лет прошли опытно-промышленную проверку на Феодосийском оптическом заводе при выпуске более 4 млн. шт. выпукло-вогнутых линз  $\varnothing 17\text{-}22$  мм для кино- и фотообъективов, обеспечивая оптическую чистоту класса  $\rho$  II- $\rho$  III и точность формы  $N$  равную 1-2 интерференционным кольцам, более чем в 1,5 раза большую производительность и сокращение расхода полированного порошка в 10-15 раз.

Инструменты на основе Аквапол-5, -7, -8 с положительными результатами прошли испытания на КП "ЦКБ Арсенал" при обработке подложек лазерных зеркал из кварцевого стекла и панелей жидкокристаллических дисплеев ( $t = 0,3$  мм) из боросиликатного стекла по заказу фирмы "Wintek" (USA), обеспечивая необходимые технические требования к состоянию обработанных поверхностей деталей (см. табл. 1).

Уникальные оптические и физико-механические свойства сапфира  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (табл. 2) - диапазон спектрального пропускания от 100 до 5000 нм, высокие теплотехнические и механические

*Таблица 2.  
Оптические и некоторые физико-механические свойства  
сапфира ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) и оптических стекол (литературные данные)*

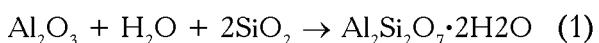
Свойство	Сапфир ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ )	Оптическое стекло
Коэффициент преломления $n_c$ $n_d$	1,765	1,4721—1,7517
	1,773	1,4704—1,7550
Двухлучепреломление $\Delta (\lambda = 589,3 \text{ нм})$	0,008	$\pm 0,0002$ —0,0020
Показатель отражения $\rho$ , % при $n_d = 1,768$ ( $\lambda = 589,3 \text{ нм}$ )	7,8	3,6—7,5
Оптическое пропускание $\tau$ при $\lambda = 589,3 \text{ нм}$	0,923	0,47—0,90
Диапазон спектрального пропускания $\lambda_{\text{пр}}$ , нм	от 100 до 5000 (ИК, УФ, СВЧ)	до 2500 в ИК и до 1700 в видимой части спектра
Коэффициент дисперсии $V$	72,2	15—70
Твердость $HKN$ , ГПа $HV$ , ГПа	18,6* 21,6*	4,75
Устойчивость к царапанию	устойчив к большинству природных материалов кроме алмаза	не устойчиво
Химическая устойчивость (инертность)	устойчив к агрессивным средам ( $\text{HCl}$ , $\text{HNO}_3$ , $\text{H}_3\text{PO}_4$ , $\text{HF}$ , $\text{H}_2\text{SO}_4$ )	не устойчиво

\* Данные измерений в ИСМ НАНУ

характеристики, превосходящие таковые для всех марок оптических стекол - позволяют использовать его в оптических и оптико-электронных приборах и комплексах, работающих одновременно в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях светового спектра и жестких условиях эксплуатации, что очень важно для оборонного и космического приборостроения. Однако сложившаяся за много лет на предприятиях оптико-механической промышленности Советского Союза классическая технология обработки оптических деталей из стекла непригодна для обработки оптических деталей из сапфира, превосходящего по твердости стекло в 4,5 раза, но который не взаимодействует с  $\text{CeO}_2$ , и для которого необходима принципиально новая технология обработки.

Начиная с 80-х годов прошлого столетия и до последнего времени в ИСМ НАН Украины в лабораторных и производственных условиях проводился комплекс теоретических и экспериментальных исследований механики и трибохимии контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали и их влияния на формирование нанорельефа поверхностного слоя деталей с вышеуказанными требованиями и, в первую очередь, физико-химического контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали на заключительной операции обработки - полировании.

Об использовании при полировании деталей из сапфира ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) водной суспензии на основе коллоидного кремнезема  $\text{SiO}_2$ , а также о гипотетическом представлении их химического взаимодействия по уравнению



с образованием и удалением продукта реакции каолинита  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$  в процессе фрикционного взаимодействия полировальника и детали с достижением высокого качества поверхности без "алмазного фона", впервые стало известно из публикаций японских исследователей [9, 10]. Сильное специфическое взаимодействие между  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  было подтверждено и обосновано в фундаментальных трудах физико-химика Р. Айлера [11]. Несмотря на то, что указанное взаимодействие получило широкое применение,

процесс полирования сапфира на его основе остается весьма трудоемким и актуальным для дальнейшего исследования и разработки. Как установлено в [11], в реакции ионного обмена между  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  только не более 25 % поверхностных атомов Si может быть замещено атомами Al, т. е. существует определенное ограничение количества взаимодействующих атомов Si и, соответственно, концентрации  $\text{SiO}_2$  в полировальном составе. Сверхдопустимая концентрация  $\text{SiO}_2$  увеличивает силу и коэффициент трения между обрабатываемым образцом сапфира и полировальником так, что процесс ТХП может стать невозможным. В ИСМ НАН Украины проведены комплексные научно-исследовательские работы по физико-химии процесса формирования прецизионных поверхностей деталей электроники и оптики из сапфира с целью достижения необходимых к ним требований. В результате:

- исследованы физико-химические свойства (концентрация  $\text{SiO}_2$ , плотность, pH и полирующая способность) различных полировальных составов (табл. 3, 4) на основе коллоидного кремнезема;
- определены их оптимальные значения для деталей различного назначения и состояния обработанных поверхностей, которое они обеспечивают [14];
- на патентном уровне разработаны необходимые инструменты для подготовки поверхностей под полирование и для полирования [13];
- исследована интенсивность физико-химического контактного взаимодействия полировального состава с сапфиром в зависимости от pH, температуры в зоне их контакта и номинального давления  $\rho_a$ , а также концентрации в нем  $\text{SiO}_2$  [15] и определены условия ее повышения (табл. 5).

Как следует из данных табл. 4:

- при повышении температуры в зоне контакта от 20 до 50° С интенсивность и, соответственно, производительность трибохимического полирования (ТХП) увеличивается в 1,6 раза;
- при повышении номинального давления  $\rho_a$  в контакте в 1,7 раза J и Q снижаются в связи с тем, что в зоне контакта уменьшается толщина слоя полировального состава и, соответственно,

количество  $\text{SiO}_2$ , взаимодействующего с  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;

- при повышении в 1,5 раза концентрации кремнезема в полировальном составе по причинам указанным выше, снижается  $J$  и, соответственно,  $Q$  ТХП;

- $J$  и  $Q$  зависят от химической активности полировального состава;

- повышение температуры в зоне контакта не изменяет состояние поверхностного слоя обрабатываемой детали, но стабилизирует его (по  $R_a$ ,  $R_q$ ).

Главным, определяющим фактором повыше-

ния интенсивности взаимодействия  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и производительности ТХП является химическая активность полировального состава и, соответственно, скорость химической реакции между ними.

На основании полученных результатов разработаны опытные технологии финишной прецизионной обработки деталей электронной техники (подложки для эпитаксии GaN, КНС структур (кремний на сапфире)) и оптических систем (приборные линзы силовой оптики) [16, 17, 18] из сапфира, а также изготовлены опытные партии

**Таблица 3.**  
*Состав и физико-химические свойства полировальных суспензий на основе коллоидного кремнезема  $\text{SiO}_2$ , используемых при ТХП сапфира*

Состав и свойства		Полировальные составы				
		ОСЧ.6-3*	NALCO-2354		NALCO-2360	
			исходный	рабочий	исходный	рабочий
Состав, % (по массе)	$\text{SiO}_2$	23,6	48,2	8,5	50,8	9,0
	Si	—	47,4**	—	57,82*	—
	O	—	52,4**	—	40,82*	—
	Примеси	B, Fe, Co, Mn, Cu, Ni, Cr, Ti $10^{-3}$ — $10^{-5}$	Na 0,51—0,38	—	Na 0,94	—
	Этанол	3,2	—	—	—	—
	$\text{H}_2\text{O}$	остальное	остальное	остальное	остальное	остальное
Свойства	pH	9,3	11,32	10,85	8,6	8,54
	Вязкость, с·G	22	—	—	—	—
	Плотность $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	—	1,48	1,12	1,56	1,18

\*ТУ 6-09-4989-83

\*\* По данным определения поэлементного химического состава сухого остатка из раствора с помощью растрового электронного микроскопа с системой микроанализа, остальные значения определены по содержанию сухого остатка  $\text{SiO}_2$  с помощью анализатора влажности XM-60

**Таблица 4.**  
*Полирующая способность полировальных составов (композитов) при полировании деталей электронной техники и оптических систем из сапфира ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) || (0001) при  $T = 20^\circ\text{C}$*

Полировальный состав	pH	Обрабатываемые детали	Состояние обработанной поверхности		Производительность $Q$	
			$R_a$ , мкм	Класс Р	мг/ч	мкм/ч
Сиопол-1 [13] с водно-аммиачным коллоидным раствором ОСЧ.6-3	9,3	подложки КНС структур, окна	0,0003	0—40—I	1,2	0,15
Водный раствор коллоидного кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) торговой марки NALCO-2354	10,85	подложки для эпитаксии GaN, КНС структур, приборные линзы, окна, призмы	0,0002— 0,0003	0—10— 0—20	2,8	0,36
NALCO-2360	8,54	то же	$\leq 0,0002$	то же	2,2—2,7	0,35

*Примечание.* Параметр  $R_a$  измеряли на атомно-силовом микроскопе «Nano Scope IIIa Dimension 3000»

Таблица 5.

*Влияние условий обработки и концентрации  $\text{SiO}_2$  в полировальном составе на интенсивность трибохимического контактного взаимодействия, производительность съема материала и состояние поверхностного слоя деталей из сапфира при их полировании составом NALCO-2354*

Параметр	Интенсивность взаимодействия $J = Q$ , мг/ч при температура в зоне контакта, $^{\circ}\text{C}$			
	20	30	40	50
Номинальное давление $p$ , МПа	0,020	2,8	3,3	3,8
	0,034	2,0	3,4	3,9
Концентрация кремнезема $\text{SiO}_2$ в полировальном составе ( $p_a = 0,02$ МПа), % (по массе)	8,5	2,8	3,3	3,8
	12,4	2,1	1,9	2,9
		Средние значения параметров состояния поверхностного слоя		
$R_a$ , нм		0,2	0,2	< 0,2
$Rq$ , нм		0,3	0,3	0,2
$R_{\max}$ , нм		2,2	3,2	2,4

указанных изделий, которые прошли аттестацию с применением современных средств измерений и получили положительную оценку. Достигнуто состояние функциональных поверхностей сопоставимое с мировым уровнем: у подложек - шероховатость  $R_a \leq 0,2$  нм (2 А), класс оптической чистоты  $\rho 0\text{-}10 - \rho 0\text{-}20$  с четким изображением линий Кикучи при использовании метода дифракции отраженных электронов и микроскопа "Цейс-50"; у сферических поверхностей приборных линз из сапфира - шероховатость  $R_a < 1$  нм и класс оптической чистоты  $\rho \text{III-IV}$ . При этом точность формы плоских поверхностей была равна 1-2 интерференционных кольца, а сферических - 3-5.

Обстоятельные исследования процессов формирования при механических, химических, радиационных, плазменных и других воздействиях поверхностей элементов микрооптики из сапфира, в частности, эллиптических и сферических линз в составе чипов гетероструктур  $\text{InGaN}/\text{GaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , светодиодов с микролинзами, при создании новых источников белого света выполнены авторами [19]. После механического полирования апробировали бесконтактное химическое полирование (БХП) в условиях ламипарного потока травителей - ортофосфорной кислоты  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ( $400\text{-}500$   $^{\circ}\text{C}$ ), расплава буры  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  ( $1000$   $^{\circ}\text{C}$ ), расплава бисульфата калия ( $450$   $^{\circ}\text{C}$ ). Наилучшее качество поверхности обеспечивает  $\text{CClF}_3$  (хлортрифлюорометан) при  $T = 1400\text{-}1500$   $^{\circ}\text{C}$  со скоростью  $0,6$  мкм/мин. Авторы [18] относят к наиболее распространенным

газовое травление сапфира потоком чистого водорода при  $1300\text{-}1400$  или  $1100\text{-}1200$   $^{\circ}\text{C}$  со скоростью до  $0,1$  мкм/мин. Однако при указанном травлении полирующий эффект удается достичь только на базовых поверхностях (0001). При реактивном ионно-плазменном химическом травлении (ПХТ) температура процессов понижается до  $200\text{-}500$   $^{\circ}\text{C}$ . В качестве травящих газов могут быть использованы фторсодержащие ( $\text{CF}_3$ ,  $\text{CF}_4$ ,  $\text{SF}_4$ ,  $\text{CHF}_3$ ) и углеродсодержащие ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ) соединения при температурах выше  $2000$  К (скорость травления  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0001) составляет  $6\text{-}240$  мкм/мин), а также  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{BBr}_3$  со скоростью травления  $0,09$  мкм/мин. Авторы считают, что высокое кристаллическое совершенство поверхности подложек и чипов из сапфира возможно получить также с помощью ионного или радиационного отжига. Основным фактором, улучшающим структуру поверхности при таких отжигах, по мнению авторов, является процесс рекристаллизации нарушенного слоя, сопровождающийся снятием внутренних напряжений вокруг дефектов, внесенных механической обработкой. В итоге авторы приходят к выводу, что оптимальными и экономически целесообразными вариантами технологии формирования поверхности подложек и чипов являются химическое полирование и плазмохимическое травление, позволяющие обеспечить состояние их поверхности  $R_a = 20$  А (2 нм) и  $R_{\max} = 220$  А (22 нм), что по их мнению сопоставимо с результатами зарубежных исследователей - соответственно 17 и 22,5 нм. Авторы пришли к

выводу, что достигнутое ими состояние поверхности на сапфире является экономически достаточным для экстракции излучения светодиодов с гетероструктурой  $\text{InGaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , поскольку дальнейшее дорогостоящее уменьшение  $R_a$  и  $R_{\max}$  не увеличивает интенсивности излучения. К сожалению, авторы при исследовании и выводах не оценивали состояние обработанных по своим вариантам технологии поверхностей по главному оптическому показателю - классу оптической чистоты по ГОСТ-11141-84, а также точности формы (плоскости, сферы). Поскольку не указан прибор, используемый для измерения параметров шероховатости  $R_a$ ,  $R_{\max}$  поверхности и его разрешающая способность, трудно судить о точности их измерения. Поэтому, несмотря на информационную обстоятельность публикации, судить о приемлемости предлагаемых подходов применительно к достижению мировых требований  $R_a \leq 0,2 \text{ нм}$ ,  $R 0\text{-}10$ ,  $R 0\text{-}20$  к подложкам гетероструктур  $\text{InGaN}/\text{Al}_2\text{O}_3$  и тем более технологии изготовления приборных оптических линз из сапфира затруднительно.

Авторы [20], исследуя процесс химико-механического полирования микролинз и полусферических колпаков (обтекателей) диаметром от 3 до 180 мм из сапфира ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) с использованием полировального состава на основе коллоидного кремнезема  $\text{SiO}_2$  за 240 мин машинного времени обработки достигали наилучших, с их точки зрения, но не достаточных результатов по шероховатости обработанных поверхностей  $R_a = 0,969 \text{ нм}$  (исходная шероховатость изделий была  $R_a$  не больше 1,31 нм), оптической чистоте класса  $s/d = 20/10$  (Mil) и точности формы  $N = 0,1\lambda$  ( $\lambda = 589,3 \text{ нм}$ ). Шероховатость измеряли на атомно-силовом микроскопе "Solver.Pro". Характеристика полировального состава не указана.

Известно, что изменение скорости химической реакции происходит за счет изменения энергии активации  $E_a$ , т. е. необходимого количества энергии для прохождения реакции. Химические реакции, как и все природные процессы, протекают самопроизвольно, если они сопровождаются уменьшением ( $\Delta G < 0$ ) энергии Гиббса системы при постоянстве давления и температу-

ры. Для варианта ТХП сапфира полировальным составом на основе коллоидного кремнезема  $\Delta G = -26,6 \text{ кДж/моль}$ , так что реакция (1) может протекать самопроизвольно.

Скорость реакции можно изменить с помощью катализатора. В контактной зоне каталитические реакции, обычно протекают на поверхности твердого тела и обусловлены активацией молекул реагентов при взаимодействии с поверхностью. Особую группу составляют гетерогенно-катализитические реакции, объединяемые понятием гетерогенного ионного катализа. В реакциях кислотно-основного типа высокой активностью обладают комплексные катализаторы, состоящие из нескольких веществ, описываемые общей формулой  $X_n M_m Y_y$ , где  $X$  - лиганд, связывающий атом металла с поверхностью;  $M$  - активный центр (атом) переходного металла;  $Y$  - внешний лиганд. В общем случае комплекс может быть моноядерным ( $T = 1$ ) или полиядерным ( $T \geq 2$ ) и связан с поверхностью одним или несколькими лигандами  $X$ . Например, близкий для (1) растворимый комплексный катализатор гидрирования  $\text{Rh}\{\text{P}(\text{C}_6\text{H}_5)\}_3\cdot\text{Cl}$  может быть закреплен на поверхности силикагеля ( $\text{SiO}_2$ ). Однако нахождение и использование катализаторов для ускорения реакций взаимодействия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  при ТХП сапфира с целью повышения его производительности ограничивается тем, что при увеличении интенсивности взаимодействия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  ухудшается состояние обрабатываемой поверхности, в частности, по параметру  $R_{\max}$  (см. табл. 5).

Из анализа вышеизложенного очевидна значимость физико-химии в процессах формирования поверхностей деталей электронной техники и оптических систем из стекла и сапфира ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) до требуемого уровня.

На основе вышеуказанных результатов исследований разработана технология прецизионного трибохимического полирования деталей оптики, электроники, лазерной оптики и электронной светотехники XXI века, изготовлены и положительно аттестованы опытные партии указанных деталей на КП Арсенал, Красногорском заводе им. С.А.Зверева, Институте физики полупроводников НАН Украины.

**Список литературы:**

1. Хайнеке Г. Трибохимия / Пер. с англ. - М.: Мир, 1987. - 584 с.
2. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Пер. с англ. А. Б. Белого, Н. К. Мышкина: Под ред. А. И. Свириденко. - М.: Машиностроение, 1986. - 360 с.
3. Справочник по триботехнике: В 3 т. Т. 1. Теоретические основы / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 1989. - 400 с.
4. Ходаков Г. С., Кудрявцева Н. Л. Физико-химические процессы полирования оптического стекла. - М.: Машиностроение, 1985. - 224 с.
5. Рогов В.В. Трибохимический механизм процесса полирования стекла инструментом "Аквапол" // Оптико-механическая промышленность. - 1991. - № 6. - С. 56-60.
6. Rogov V. V., Filatov Y.D., Kottler W., Sobol V.P. New technology of precision polishing of glass optics // Opt. Eng. - 1999. - 40, N 8. - P. 1641-1645.
7. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общ. ред. Н. В. Новикова. - Т. 4. Инструменты и технологические процессы в прецизионной обработке / Под ред. В. В. Рогова. - Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ "Алкон", НАНУ, 2006. - 260 с.
8. Свидетельство Украины № 13366 на товарный знак "Аквапол" с приоритетом от 30.08.1999 г.
9. Новый способ полировки поверхности кристаллов. - Densoken Nyusu (News in Electrotechnical Lab.). - 1973. - 230. - Р. 5.
10. Yasunaga N., Imanaka O. Polishing hart crystals with soft powder // Technocrat. - 1975. - 8, N 9. - Р. 15-21.
11. Айлер Р. Химия кремнезема / Пер. с англ. - М.: Мир, 1982. - Ч. 1. - 416 с.; Ч. 2. - 712 с.
12. Рогов В.В., Рублев Н.Д., Троян А.В., Попельнюк В.Н. Развитие технологии финишной прецизионной обработки функциональных поверхностей оптических и электронных деталей из синтетического монокорунда // Сверхтв. материалы. - 2002. - № 5. - С. 83-87.
13. Пат. 48581A Украина, МПК7 В 24 В 1/00, В 24 D 3/3. Способ фінішної, прецизійної обробки деталей з монокорунду і полірувальний інструмент / В. В. Рогов, М. Д. Рубльов, О. В. Троян, Т. Л. Кротенко. - Опуб. 15.08.02, Бюл. № 8.
14. Rogov V.V., Tkach V.N., Rublev N.D. et al. Analysis of the state condition of the surfaces of sapphire (-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) parts after finishing // J. Superhard materials. - 2008. - N 3. - P. 67-74.
15. Rogov V.V., Rublev N.D., Krotenko T.L. Troyan A.V. Investigations into the intensity of the tribochemical contact interaction of a polishing compound and sapphire when machined // Ibid. - N 4. - 2008. - P. 75-78.
16. Новиков Н. В., Рогов В.В. Инновационная технология финишной обработки элементов микроэлектроники и электронной светотехники XXI века из сапфира (-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) // Журнал "Контентант", международной Академии Контентант, Москва-Красногорск, 2005, апрель. - С. 39-41.
17. Рогов В.В., Рублев Н.Д., Ветров А.Г. и др. Перспективность новой технологии ИСМ НАНУ по изготовлению оптических приборных линз из сапфира ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) // Инstrumentальний світ. - 2007. - № 4. - С. 12-14.
18. Рогов В.В. Новая технология финишной прецизионной обработки элементов лазерной оптики. Сборник "Контентант", МАК, за май 2011 г, С. 27-29.
19. Осинский В.И., Гончаренко Т.И., Ляхова Н.Н. Влияние обработки поверхности чипов на экстракцию излучения сверхярких светодиодов на гетероструктурах InGaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Физическая инженерия поверхности. - 2003. - 1, № 1. - С. 94-98.
20. Дронь О.С., Коровкина Н.М., Кузнецов А.С. и др. Исследование процесса полирования сапфира // Научно-технический вестник СПЕГУ ИТМО. Вестник 30. Фундаментальные и прикладные исследования информационных систем и технологий. - Санкт-Петербург, 2006. - С. 129-135.

# ПРИМЕНЯЕМЫЕ АЛМАЗНЫЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ РЕЗЦЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛООПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

ДЕВИН Л.Н. - доктор технических наук, РЫЧЕВ С.В.

Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины

E-mail: ldevin@ism.kiev.ua

В работе представлены сведения об алмазных монокристаллических резцах для обработки металлооптических изделий различного профиля - плоская поверхность, сферическая поверхность, асферическая поверхность, на особо точных станках алмазного микроточения. Показана роль правильного выбора режущего инструмента для эффективности процесса обработки в общей цепочке технологического процесса.

**Ключевые слова:** алмазное микроточение, алмазный резец, стойкость.

Современные металлооптические элементы характеризуются высокими требованиями по точности и качеству обработки, а именно - шероховатостью зеркальной поверхности  $R_a < 10$  нм, погрешностью формы  $< 0,1$  мкм и коэффициентом зеркального отражения  $> 96\%$  [1]. Широкое распространение для изготовления таких изделий получил метод алмазного микроточения (АМТ), особенно при обработке металлооптических поверхностей сложного профиля (сферическая, асферическая поверхность). Алмазное микроточение является методом современной сверхточной обработки, при котором точность формы достигается с помощью алмазного монокристаллического резца на станке высокой степени точности. Поверхностный слой после алмазного микроточения имеет высокое качество и, в сравнении с полированым, лучшее металлографическое состояние. Оптические поверхности, изготовленные таким методом, имеют,

кроме того, больший порог разрушения под действием лазерного излучения [2].

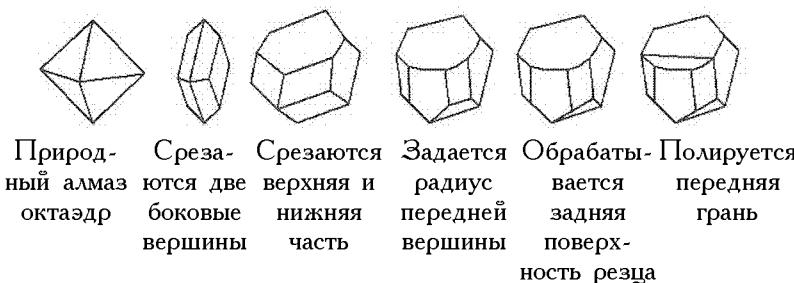
Рабочим инструментом при микроточении является резец, оснащенный монокристаллом природного алмаза массой 0.8 ... 2 карата. К резцам данного типа предъявляются повышенные требования по шероховатости граней резца и остроты лезвия (величина округления режущей кромки  $\rho$  не должна превышать 160 ангстрем).

В Украине разработка технологий по изготовлению резцов из природных алмазов для АМТ и специальных станков для микроточения проводилась в Институте сверхтвердых материалов НАН Украины. Для изготовления инструмента используют природные кристаллы алмазов разных форм. Одна из применяемых форм - октаэдр, который представляет собой кристалл с 6 вершинами, через которые проходят 3 кристаллографические оси {111}, он имеет 8 граней и 12 ребер [3]. Основные технологические операции, применяемые для обработки алмазного резца из октаэдра, приведены на рис. 1.

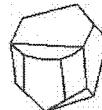
При резании алмазными резцами создается контакт режущей кромки с обрабатываемой заготовкой близкий к точечному. Термин "точечный" контакт применяется в том контексте, что процесс резания происходит в условиях малой зоны контакта режущего инструмента с заготовкой. Например при глубине резания  $t = 2$  мкм, подачи  $S_o = 5$  мкм/об., радиусе лезвия резца в плане = 1,5 мм - длина контакта режущей кромки с обрабатываемым материалом составляет около 80 мкм.

В зависимости от кинематики станка может

## Алмазный резец из октаэдра



## Готовый алмазный резец



*Рисунок 1*  
 Технологические операции изготовления алмазного резца  
 из октаздрического кристалла

быть задействована длина контакта на режущей кромке резца (при точении криволинейных поверхностей) одних и тех же точек, которые не меняются в процессе резания - рис. 2 а, либо переменных - рис 2 б.

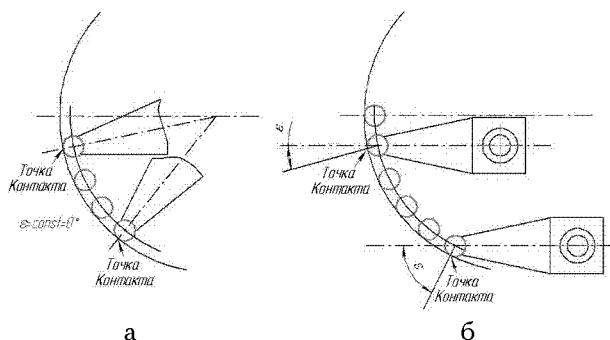
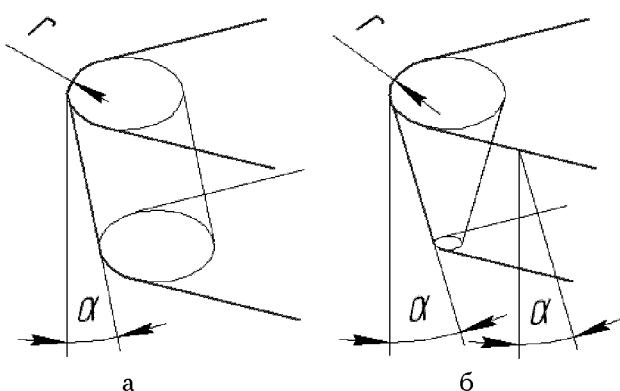


Рисунок 2.

*Кинематика перемещения режущей кромки относительно обрабатываемой заготовки:  
а - на станке конструкции ИСМ НАН Украины;  
б - на станке фирмы Nanoform (США)*

Изменение положения точки контакта обозначим через угол  $\varepsilon$ . На станке конструкции ИСМ НАН Украины (рис. 2а), кинематика движения суппорта обеспечивает для любого момента резания угол контакта режущего инструмента с заготовкой  $\varepsilon$  равным  $0^\circ$ . Кинематика же станка фирмы Nanophorm (рис. 2б), позволяет формировать обрабатываемую поверхность сложной формы путем продольного перемещения суппорта относительно плоскости детали и поперечного перемещения шпинделя. Поэтому положение точки контакта режущей кромки с обрабатываемой

емой заготовкой при движении будет изменяться [4]. Различные кинематические схемы обуславливают выбор резцов различной конструкции и геометрии (рис. 3).



*Рисунок 3.*

Так выбор цилиндрической формы задней поверхности рис. 3а не позволит выполнить качественную обработку сферической, асферической поверхности на станке, где кинематика не обеспечивает угол  $\epsilon = 0^\circ$  на протяжении всего пути резания. Это обусловлено тем, что задний угол  $\alpha$  будет переменным при такой схеме обработки. При этом будет изменяться и передний угол  $\gamma$ , если его значения будут отличаться от  $0^\circ$ .

В процессе обработки это вызовет неравномерность распределения сил резания, а также трение задней грани резца с обработанной по-

верхностью, что в целом отрицательно скажется на качестве проточенной металлоптической поверхности. В связи с этим на станках с такой кинематикой используют резцы с конической задней поверхностью, передним углом  $\gamma = 0^\circ$  и радиусной формой режущей кромки.

Особенность кинематики станков ИСМ НАН Украины позволяет использовать резцы различной формы передней и задней поверхностей. Это дает возможность выбрать такое расположение режущей кромки резца, которое обладает наибольшей износостойкостью в силу особенностей кристаллографии монокристалла алмаза, так как в разных направлениях кристаллографических осей износостойкость алмаза различна. На практике кристалл ориентируют так, чтобы наиболее "твёрдое" направление совпадало с направлением схода стружки, за которое принимают ось, перпендикулярную обрабатываемой поверхности. Это позволяет увеличить стойкость резца в 3 - 5 раз [5]. Так, в работе [5] для большей универсальности применения на практике алмазных резцов, было предложено не менять ориентацию кристалла при пайке, а устанавливать резец в державке с поворотом на угол  $\beta$  (рис. 4), рассчитываемый в зависимости от режимов резания не учитывая радиус округления режущей кромки  $r_e$  по формуле:

$$\beta = \arctg \frac{t - r_e + \sqrt{r_e^2 - \frac{S^2}{4}}}{\frac{S}{2} + \sqrt{t(2r_e - t)}} \quad (1)$$

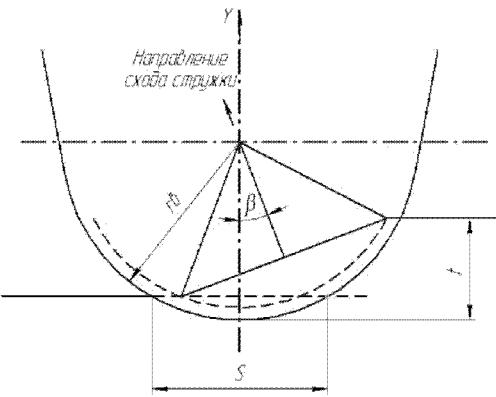


Рисунок 4.

*Схема движения стружки по передней поверхности резца при микроточении*

где  $t$  - глубина резания,  $r_v$  - радиус при вершине резца,  $S$  - подача.

Таким образом, можно существенно повысить стойкость алмазных резцов.

Величина радиуса в плане алмазного резца также важна для процесса алмазного микроточения. Как показали исследования в работе [6] (рис. 5), зависимости шероховатости от скорости вращения шпинделя, при различной глубине резания -  $t$ , подаче -  $S$  и радиусе вершины в плане -  $r_v$ , радиус при вершине резца играет ключевую роль в формировании точности обрабатываемой поверхности. С увеличением радиуса вершины в плане качество обработки возрастает.

Таким образом, процесс алмазного микроточения целесообразно выполнять режущим инструментом, оснащенным монокристаллом алмаза. Режущий инструмент играет важную роль в формировании высокого качества и формы металлоптической поверхности. Важно правильно

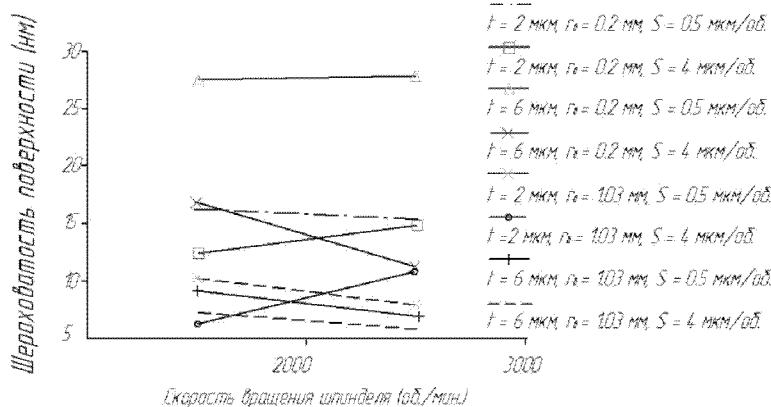


Рисунок 5.

*Зависимость шероховатости от скорости вращения шпинделя, при различных  $r_v$ ,  $t$ ,  $S$*

выбрать геометрию резца и форму задней поверхности. Для увеличения стойкости резца нужно правильно выполнить ориентацию кристалла до начала обработки. Также важно обеспечить минимально возможное значение радиуса закругления  $\rho$  для достижения требуемого качества обработки.

*Список литературы:*

1. Добровольский Г. Г. Введение в механику алмазного микроточения. - К.: Сучасне машинобудування. - Журнал асоціації технологів - машинобудівників України - 3-4 (5-6)/2000. - С 37-54.
2. Модель процесса алмазного точения и технологические рекомендации по обработке поверхностей металлооптических элементов №07-08-92103 - С 2 - 5.
3. Гомеляко Е.В., Добровольский Г.Г., Саксеев П.Ю., Шевченко Д.А. Математическая модель процесса алмазного микроточения для оптимизации технологических параметров обработки - Сб.научных трудов, ИСМ, Київ. - 2006, - "Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин" - 45 - 56 с.
4. Jeff Roblee. Factors affecting surface finish in diamond turning - Precitech, inc. 3 с.
5. Добровольский Г.Г., Дятлов Ю.А. Способ повышения стойкости резца при алмазном микроточении - Сверхтвердые материалы 1993, №3. 53 - 55 с.
6. K.A.Mahajan, Dr. M. Sadaiah and S.H. Gawande. "Experimental investigations of surface roughness on OFHC copper by diamond turning machine", International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(10), 2010, 5215-5220.

# ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ АЛМАЗНОГО МИКРОТОЧЕНИЯ НА МАТЕРИАЛАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ИК ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

АРУТЮНЯН В.В., ШЕВЦОВ С.Е. - кандидат технических наук

ОАО «НИИ ОЭП», г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: asus\_59@mail.ru, shevtsov@niiki.ru

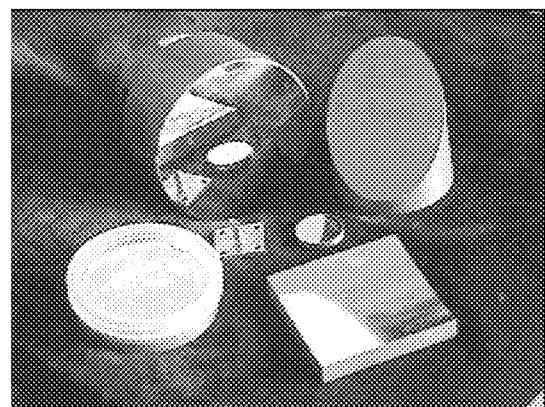
*В статье рассмотрена технология алмазного микроточения в области формообразования оптических поверхностей для ИК- и видимой области спектра. Используется прецизионное, специализированное технологическое оборудование токарного или фрезерного типа, где режущим инструментом является природный алмаз. Данная технология позволяет изготавливать оптические поверхности сложной формы и высокого качества из таких нетрадиционных для оптики материалов как металлы, это алюминиевые сплавы, медь и медные сплавы; кристаллы - германий, селенид цинка; полимерные материалы - полиметилметокрилат.*

**Ключевые слова:** алмазное микроточение, металлы, кристаллы, полимерные материалы.

С развитием лазерной техники и космической оптики, где большое значение имеют облегченные конструкции и конструкционные оптические материалы, а также в связи с разработкой систем наблюдения работающих не только в видимой обла-

сти спектра возникла необходимость использования нетрадиционных для оптики материалов, что в свою очередь потребовало разработки новых технологий и технологического оборудования. Одной из таких технологий является технология алмазного микроточения, для реализации которой используется прецизионное, специализированное технологическое оборудование токарного или фрезерного типа, где режущим инструментом является природный алмаз. Данная технология позволяет изготавливать оптические поверхности сложной формы и высокого качества из таких нетрадиционных для оптики материалов как металлы, это алюминиевые сплавы, медь и медные сплавы; кристаллы - германий, селенид цинка; полимерные материалы - полиметилметокрилат. Причем время технологической обработки, для получения готовой оптической детали, значительно уменьшается по сравнению с традиционными оптическими технологиями.

На фотографиях представлены оптические элементы изготовленные нами в различное время методом алмазного микроточения.



*Рисунок 1.  
Зеркальная оптика из алюминиевых сплавов АМГ-6, 1201 и бескислородной меди*



Рисунок 2.

*Сферическая и асферическая оптика, охлаждаемая силовая оптика лазерных систем, полигональная и призменная оптика сканирующих систем*

Технологический процесс алмазного микроточения реализуется взаимодействием радиусного алмазного резца с обрабатываемой оптической поверхностью. При их взаимодействии на некотором расстоянии  $\rho$  от центра заострения алмазной режущей кромки в обрабатываемом материале распространяется фронт зоны пластической деформации

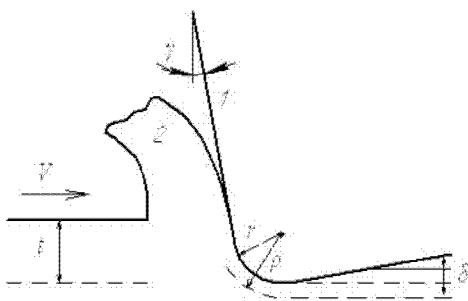


Рисунок 3.

*Упрощенная двумерная схема взаимодействия радиусного алмазного резца с обрабатываемой оптической поверхностью: 1 - резец; 2 - стружка*

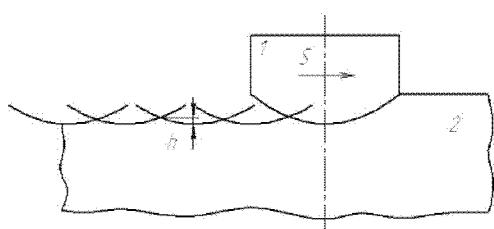


Рисунок 4.

*Схема формирования микрорельефа поверхности: 1 - резец; 2 - обрабатываемая поверхность*

ции сжатия (рис. 1). Глубина распространения пластической деформации  $\rho$  определяется соотношением (1):

$$\rho \approx r \sqrt{\frac{H_\mu}{2\sigma_s}} , \quad (1)$$

где:  $r$  - радиус заострения режущей кромки резца;  $H_\mu$  - микротвердость поверхности;  $\sigma_s$  - предел текучести материала поверхности.

После прохода резца с глубиной резания  $t$  происходит частичное упругое восстановление обрабатываемого материала.

При взаимодействии алмазного резца с обрабатываемой оптической поверхностью, в зоне резания происходит выделение некоторого количества тепла. Количество тепла  $Q$ , выделяемого при резании в единицу времени, приблизительно можно выразить как (2):

$$Q = kstv \quad (2)$$

где:  $k$  - коэффициент, зависящий от свойств материала и геометрии резца;  $s$  - подача резца на один оборот;  $t$  - глубина резания;  $v$  - скорость резания.

Если при формообразовании оптической поверхности глубина резания превышает некоторое критическое значение, тепловой фактор возрастает и соответственно увеличиваются растягивающие напряжения в приповерхностных слоях, особенно для материалов с малой теплопроводностью. Подробно феноменологическая модель образования оптической поверхности на пластичных материалах при алмазном микроточении представлена в статье [2], одного из авторов.

Анализ факторов, влияющих на качество обрабатываемой поверхности, основывается на изучении зависимости шероховатости поверхности ( $R_z$ , мкм) от глубины резания ( $t$ , мкм) и скорости резания ( $V_s$ , мкм/сек), которая в свою очередь характеризуется двумя параметрами - скоростью вращения шпинделя ( $V$ , об/мин) и подачей резания ( $S$ , мкм/об). При торцевом точении на станках токарного типа на поверхности обрабатываемой детали получается регулярный микрорельеф в виде винтовой линии чередующихся впадин и выступов (рис. 2).

При пластическом резании, когда съем материала является полностью пластичным и режим обработки характеризуется гладкой поверхностью, подобной полированной поверхности, без повреждений и трещин, величина выступов,  $h$ , винтовой линии составляет порядка 2 нм, а общая шероховатость поверхности ( $R_a$ )  $25 \div 70 \text{ A}^\circ$ , в зависимости от обрабатываемого материала. Проведенные исследования и опыт практической работы показывают, что при обработке пластичных материалов, алюминиевых и медных сплавов АМГ-6, 1201, БрХ, полиметилметокрилата и безкислородной меди Моб оптимальными, с точки зрения обеспечения минимальной величины шероховатости обрабатываемой поверхности, режимами являются:  $V = 300 \div 450 \text{ об}$ ,  $t = 4 \div 15 \text{ мкм}$ ,  $S = 4 \div 5 \text{ мкм/об}$ . При обработке хрупких материалов, монокристаллического германия, на станках токарного типа, наиболее оптимальные режимы обработки:  $V = 900 \div 1000 \text{ об}$ ,  $t = 2 \div 10 \text{ мкм}$ ,  $S = 11.5 \div 2 \text{ мкм/об}$ . Увеличение скорости подачи от оптимальных значений приводит к увеличению шероховатости, при этом высота выступов винтовой линии  $h$ , при пластическом резании в основном определяющая шероховатость поверхности, составляет (3):

$$h \approx \frac{s^2}{8R} \quad (3)$$

При увеличении глубин резания увеличивается локальный разогрев материала в зоне резания, возрастают растягивающие напряжения в приповерхностных слоях и начинают появляться элементы характеризующиеся процессом хрупкого скальвания. Выход за пределы нижних значений глубин резания может привести к возникновению вибрационных эффектов и также к ухудшению оптических характеристик обрабатываемой поверхности.

Представленные режимы обработки получены на станках совместной разработки ГОИ им. С. И. Вавилова и Института сверхтвердых материалов, г. Киев. Это станки МО-200 и МО 500С для изготовления сферических, асферических и плоских поверхностей, работающие в полярной системе координат  $\Delta R$  (линейное перемещение

резца по радиусу обрабатываемой поверхности);  $\Delta\varphi$  (угловое перемещение резцовой головки), станки 150-МГ и МО-600ПЛ для изготовления плоскостей, призм и полигональной оптики (многогранных призм).

Другим фактором, существенно влияющим на характеристики обрабатываемых оптических поверхностей, является режущий инструмент, его качество, характеристики, состояние износа. В качестве режущего инструмента используется природный алмаз, величиной примерно 0.5 карат. Нами используются радиусные резцы с радиусом закругления режущей кромки  $2 \div 5 \text{ мм}$ , передний угол заточки резца  $\gamma$  (рис. 1) отрицательный  $2 \div 5 \text{ град}$ , задний  $10 \div 14 \text{ град}$ , длина зачистной фаски  $0.5 \div 1.0 \text{ мм}$ . Режущая кромка должна иметь вид идеальной радиусной острой кромки без видимых микротрещин и микроскопов при наблюдении в микроскоп с увеличением не менее  $700'$ . Отдельно следует отметить большое значение и степень влияния на шероховатость обрабатываемых оптических поверхностей, радиуса закругления режущей кромки в плоскости перпендикулярной плоскости кромки, но данный вопрос не является предметом изучения в данной работе.

В технологии алмазного микроточения оптических поверхностей, одним из главных условий получения поверхности оптического качества является создание в зоне резания пластичных условий микроточения и минимальных усилий. В сочетании со скоростью вращения шпинделя, скоростью подачи и глубиной резания, это условие обеспечивается главным передним углом режущего инструмента. Главный передний угол должен обеспечить достаточную зону фазового перехода высокого давления материала, который создается за счет большого сжимающего и касательного напряжений в зоне формирования стружки, чтобы обеспечить образование стружки и пластичное микроточение материала. При обработке пластичных материалов, таких как безкислородная медь Моб, полиметилметокрилат, алюминиевые сплавы АМГ-6, 1201, передний главный угол должен быть отрицательным и его значение должно находиться в диапазоне  $2 \div 5 \text{ град}$ . Менее отрицательный передний угол не обеспечивает достаточного объема фазового перехода высокого давления, чтобы получить необходимую пластичную глубину точения.

Более отрицательный главный передний угол больше не усиливает пластичное формирование материала, но увеличивает усилия давления, что приводит к значительному износу режущей кромки.

При обработке хрупких материалов, монокристаллического германия, в силу твердости и хрупкости материала, отрицательного значения переднего главного угла в  $2 \div 5$  град, для получения шероховатости поверхности оптического качества, не достаточно. Нами было экспериментально установлено и подтверждено в процессе практической работы, что для получения поверхности оптического качества на монокристаллическом германии методом алмазного микроточения, передний главный угол резания должен быть отрицательным в диапазоне  $11 \div 14$  град. Но при таком отрицательном угле алмазного резца значительно уменьшается прочность алмаза, за счет утоньшения объема режущей кромки, поэтому мы используем резец с передним отрицательным углом  $2 \div 5$  град, но дополнительно развернутым на отрицательный угол  $8 \div 9$  град. При обработке более твердых кристаллических материалов, например монокристаллического кремния, главный передний угол должен иметь ещё большие отрицательные значения, порядка 30 град. К сожалению технические возможности нашего станочного оборудования не позволяют установить резец на такой отрицательный угол, но в экспериментальных работах проведенных нами четко прослеживается тенденция уменьшения шероховатости поверхности монокристаллического кремния, с увеличением отрицательного переднего угла. При достижении технически возможного отрицательного угла величины  $19 \div 21$  град, шероховатость поверхности составляла Ra  $10 \div 15$  нм. Следует отметить, что оптическая обработка монокристаллического кремния имеет и другую специфику: скорость вращения шпинделя не менее 1000 об./мин, подача резания, S не более  $1.75 \div 1.25$  мкм/об и очень малую глубину резания.

В процессе обработки режущая кромка испытывает значительные усилия резания, которые с увеличением пути резания, L км, и с учетом характеристик обрабатываемого материала, приводят к её износу. При алмазном микроточении можно вы-

делить два характерных периода износа режущей кромки: это быстрый начальный износ, L до 50 км, с последующей стабилизацией условий резания и дальнейшим износом с малой интенсивностью, L до 400 км, такие резцы наиболее эффективно использовать для чистовой обработки оптических деталей; и период характеризующийся постепенным затуплением режущей кромки и медленным износом затупленного резца, L  $\geq 1000$  км, в таком состоянии резец может работать ещё очень долго и пройти путь до  $5 \div 6$  тыс. км, пока в результате разрушения микронеровностей на режущей кромке не начнут накапливаться повреждения в виде микроскопов и микротрещин. В процессе медленного затупления усилия резания возрастают, что приводит к повышению напряжений в приповерхностных слоях обрабатываемой детали и влиянию на точность формообразования в виде микровибрационных эффектов за счет возрастания упругой деформации в зоне контакта режущей кромки с материалом. Такой процесс может иногда наглядно наблюдаться на интерферограмме, на последней стадии износа резца, при обработке асферических деталей на удар, когда идет не сплошное точение, а за счет внеосевого расположения деталей, на каждом обороте происходит «набегание» режущего инструмента на обрабатываемую поверхность, например при одновременной обработке нескольких деталей установленных на одном блоке.

Практическая работа в области алмазного микроточения показывает, что алмазное микроточение на сегодняшний день является одной из наиболее прогрессивных высокопроизводительных технологий в области формообразования оптических поверхностей для ИК- и видимой области спектра при обработке пластичных материалов и хрупких материалов в том числе монокристаллического кремния и карбида кремния.

#### Список литературы:

1. Дрозд М. С. Определение механических свойств металла без разрушения. - М.: Металлургия, 1965. - с. 171.
2. В. Г. Соболев, С. Е. Шевцов. Модель образования оптических поверхностей на пластичных материалах при алмазном микроточении. - Оптический Журнал, 1994, №11

# РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

ПОПЕРЕНКО Л.В. - доктор физико-математических наук, профессор

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

E-mail: plv@univ.kiev.ua

Задача исследования поверхности требует осмыслиения двух проблем: 1) физико-химическое состояние поверхности и выбор адекватной модели для описания как самого приповерхностного слоя, так и его динамики при фазовых превращениях аморфное-кристаллическое состояние; 2) атомно-электронная структура и свойства материала непосредственно в объеме. Сущность ее состоит в поиске однозначной связи между характерными особенностями оптических спектров и соответствующими параметрами электронной структуры приповерхностного слоя, которые соотносятся в зависимости от условий эксперимента либо с объемом, либо с поверхностью. На экспериментальном уровне решение такой задачи проводится путем рационального объединения методов оптической и электронной спектроскопии, направленного на последовательное разделение и учет парциальных вкладов в суммарный отклик электронной системы от ее поверхностных и объемных областей. Принципиально новым разработкам и выбору в данном аспекте соответствующих методик, краткому описанию их основных особенностей и взаимных отличий и посвящена эта работа.

**Ключевые слова:** физико-химическое состояние поверхности, атомно-электронная структура и свойства материала, оптические спектры, приповерхностный слой, оптическая и электронная спектроскопия.

## ЭЛЛИПСОМЕТРИЯ И РЕФЛЕКТОМЕТРИЯ СО СКАНИРОВАНИЕМ УГЛА ПАДЕНИЯ СВЕТА И НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ ДЛЯ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Поскольку поглощающие среды обусловливают комплексный характер коэффициентов Френеля, при отражении от поверхности линейно-поляризованный свет становится эллиптически поляризованным при всех углах падения  $\Phi$ , за исключением  $\Phi = 0$  и  $90^\circ$  [1].

На рис. 1 представлена схема такого эксперимента, где падающий в направлении 1 от источника L свет под углом  $\Phi$  к нормали поверхности с направлением поляризации E под углом  $45^\circ$  в (p, s)-системе координат после отражения под тем самым углом эллиптически поляризованный. Обычно в этой системе для описания эллипса колебаний используют сдвиг фаз  $\Delta$  между p- и s-компонентами [2], который монотонно спадает от  $\pi$  до 0 с изменением  $\Phi$  от 0 до  $90^\circ$ , и азимут  $\Psi$  восстанов-

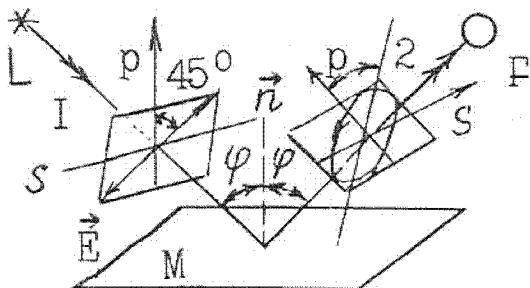


Рисунок 1.

Схема эллипсометрического эксперимента:  
L - источник, M - образец, F - фотоприемник,  
 $\vec{n}$  - нормаль к плоскости образца, 1 и 2 - направления  
падения и отражения света под углом  $\Phi$  к  $\vec{n}$ .

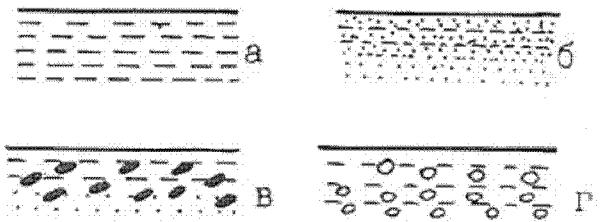


Рисунок 2.

Модели идеально-плоских границ раздела:  
полубесконечная однородная (а) и неоднородная с  
нормальным к поверхности градиентом концентрации  
компонент (б), неоднородная многофазная (в)  
и пористая (г) среды

ленной линейной поляризации ( $\text{tg } \Psi = r_p / r_s$ , где  $r_p$  и  $r_s$  - амплитудные коэффициенты отражения в  $p$ - и  $s$ -поляризациях), который при увеличении сначала уменьшается от  $45^\circ$  ( $\phi = 0^\circ$ ) и, достигнув минимума  $\Psi_m$ , стремится снова к этому значению.

После определения  $\Delta$  и  $\Psi$  любым из многих известных методов [3] задача состоит в том, чтобы, подобрав модель слоя (рис. 2), определить оптические постоянные: показатели преломления  $n$  и поглощения  $\alpha$  в нем. Но еще не выполняя подобных расчетов, получают зависимости  $\Delta(\phi)$  и  $\Psi(\phi)$ , по которым получают сведения об одном из четырех атрибутов поверхности - геометрическое строение [4]: наличие адсорбированного слоя, их относительные размеры и характер поглощения света в нем, влияние шероховатостей [5, 6] и пор [7]. Новую информацию об отражающей системе получают при помощи регистрации эллиптически поляризованного света фотоприемником  $F$ , установленным не под углом зеркального отражения, а в некотором интервале ( $\phi_1, \phi_2$ ) вблизи него [8, 9].

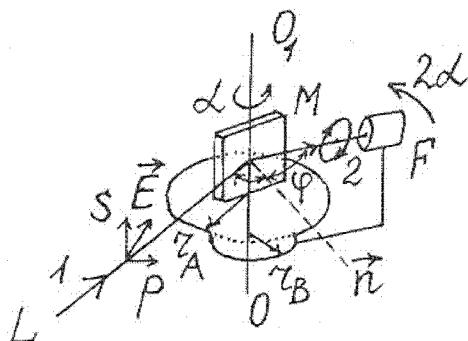


Рисунок 3.

Гониометрическое устройство с кинематической связью поворотных вокруг оси  $OQ$  и соосных дисков, радиусы  $r_A$  и  $r_B$  которых соотносятся как 2:1 [11].  
Остальные обозначения такие же, как на рисунке 1

Для осуществления угловых эллипсометрических измерений может быть использован, например, эллипсометр ЛЭФ-ЗМ-1 вертикального типа с рабочей длиной волны лазерного излучения  $\lambda = 632,8$  нм [10], который, однако, лишен универсальности из-за невозможности сопряжения с монохроматорами при проведении таких измерений для произвольной  $\lambda$ . Вот почему предпочтение отдается эллипсометру горизонтального типа с кинематической связью его поворотных узлов [11]. Эта связь осуществляется между соосно насыженными друг на друга по типу конического подшипника двумя дисками, радиусы которых соотносятся как 2:1. На большем диске установлен предметный столик, а к меньшему жестко прикреплена штанга фотоприемника (рис. 3). Углы поворотов фотоприемника  $2\alpha$  и образца  $\alpha$  обеспечивают при неизменном направлении 1 падающего пучка от источника при сканировании угла падения  $\phi$  попадание света на фотоприемник автоматически без каких-либо переустановок.

С учетом такого типа кинематической связи между поворотными узлами была создана эллипсометрическая приставка к стандартному спектрофотометру [12], существенным отличием которой является сохранение коллинеарности направлений падающего 1 и отраженного 2 пучков при сканировании углов падения на двух поворотных вокруг осей  $Q$  и  $R$  зеркалах (одно из которых  $M$  - исследуемое) путем смещения в направлении 3, проходящем посередине между осями  $Q$  и  $R$ , вспомогательного плоского зеркала, нормаль к поверхности которого совпадает с этим направлением

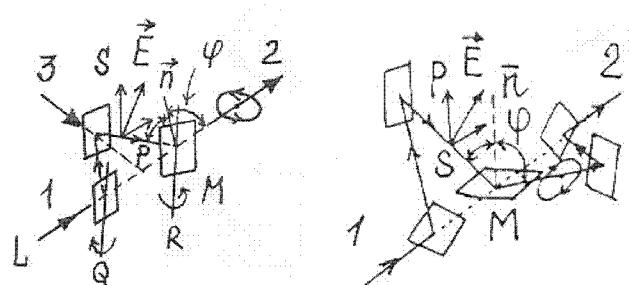


Рисунок 4.

Эллипсометрические приставки вертикального (а) [12]  
и горизонтального (б) [13] типов.  
Обозначения такие же, как и на рисунке 3

(рис. 4 а). В этой приставке исследуемое зеркало подвижное, что ограничивает его использование при изучении фазовых превращений. Поэтому была создана эллипсометрическая приставка вертикального типа [13], лишенная этого недостатка, где объектом исследования может быть поверхность жидкости или расплава металла (рис. 4 б), и обеспечена коллинеарность направлений 1 и 2.

Чтобы контролировать шероховатости поверхности, в нашем приборе, как и в ЛЭФ-ЗМ-1, предусмотрена возможность поворотов образца на  $360^\circ$  вокруг оси, перпендикулярной оси поворота  $O_1O_2$  и совпадающей с нормалью  $\vec{n}$  (рис. 3). В гониометре-эллипсометре при изменении угла  $\phi$  от  $45^\circ$  до  $88^\circ$  погрешность в определении его значения изменяется от  $\pm 0,5$  до  $\pm 1$  угловой минуты.

С учетом средней абсолютной погрешности измерений величины  $\operatorname{tg}\Psi$ , составляющей  $2 \cdot 10^{-3}$ , можно считать, что эллипсометрический метод позволяет определять высоту неровностей  $R_z$  по десяти точкам поверхности с абсолютной погрешностью  $\pm 2,5$  нм [14]. Совершенствуя метод и определяя интегральное рассеяние  $R$  на зеркалах алмазного точения и глубокого полирования по формуле:

$$R = R_0 \{1 - \exp[-(4\pi h \sin\theta/\lambda)^2]\},$$

где  $R_0$  - отражательная способность идеально-гладкой поверхности (рис. 2),  $h$  - среднеквадратичная высота неровностей [15],  $\theta = (90^\circ - \phi)$  - угол скольжения, удается снизить погрешность до 1 нм путем исследования индикатором рассеяния от угла скольжения в поляризованном свете [16] и ниже - до долей нм [17] на основе подхода Аンドронова-Леонтовича [18].

На основе угловых эллипсометрических измерений определено [19], что главный угол падения  $\Phi_0$  с ростом шероховатости  $R_z$  уменьшается так же, как и  $\Psi_m$ , поэтому зависимости  $\Delta(\phi)$  и  $\Psi(\phi)$  оказываются эффективными, например, при аттестации лент аморфных металлических сплавов (АМС), слежении за их релаксационной эволюцией и сопровождаемыми ее конформационными изменениями. Поскольку на значение  $\Delta$  и  $\Psi$  помимо шероховатостей влияние оказывает и слой оксидов, по разной кинетике формируемый на поверхности образца в аморфном (а-) и кристаллическом (к-) состояниях сплава [20], важно суметь разделить или хотя бы учесть вклады слоя оксида

и шероховатостей в эти параметры. В этой связи информативными являются угловые рефлектометрические измерения в поляризованном свете.

## МЕТОДЫ УГОЛОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

В эллипсометрии рассматривают пару величин: фазовую ( $\Delta$ ) и амплитудную ( $\Psi$ ) величины, которые в неразрывной их взаимосвязи исчерпывающе характеризуют отражающую систему. В принципе такую же по полноте информацию получают и при измерении двух коэффициентов отражения в ортогональных поляризациях при разных  $\phi$  [21-23]. Особое значение имеют измерения, где определяют не абсолютные, а относительные коэффициенты отражения двух поверхностей, обеспечивая эллипсометрией их сопоставление, когда одна из них выполняет роль эталона. При этом используют не только прямые, но и перекрестные соотношения френелевских амплитуд  $r_p$  и  $r_s$  в  $p$ - и  $s$ -поляризациях отраженных от эталонной (e) и исследуемой (d) поверхностей волн, если их представить в виде матрицы: 1-й ряд -  $r_p(e)$ ,  $r_s(e)$ , а второй -  $r^0(d)$ ,  $r_s(d)$ . Тогда отношения стоящих в каждой из строк элементов соответствуют эллипсометрическому (прямому) параметру  $\operatorname{tg}\Psi$ , а стоящих в каждом из столбцов - относительному коэффициенту отражения в  $p$ - или  $s$ -поляризации. Отношения же расположенных на диагоналях элементов представляют собой комбинированные эллипсометрические параметры  $\operatorname{tg}\Psi_1 = r_p(e)/r_s(d)$  и  $\operatorname{tg}\Psi_2 = r_p(d)/r_s(e)$  [24]. Если, например, в качестве эталона выбрать неокисленную (e) поверхность меди и проводить сравнения с ней окисленной (d) медной поверхности [25], то, как видно из

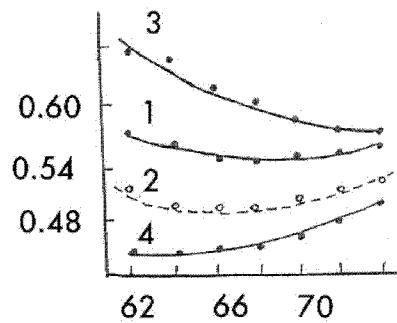


Рисунок 5.  
Зависимости  $\operatorname{tg}\Psi(\phi)$  неокисленной ( $\operatorname{tg}\Psi_e$ ) (1) и окисленной ( $\operatorname{tg}\Psi_d$ ) (2) поверхностей меди и их комбинированных параметров  $\operatorname{tg}\Psi_1$  (3) и  $\operatorname{tg}\Psi_2$  (4)

Рис.5,  $|\operatorname{tg}\Psi_e - \operatorname{tg}\Psi_d| < |\operatorname{tg}\Psi_1 - \operatorname{tg}\Psi_2|$ . Причем в интервале углов  $\varphi$  от  $60^\circ$  до  $70^\circ$  величина справа примерно в 5 раз больше величины слева. Тем самым появляется возможность посредством измерения не прямых, а комбинированных параметров  $\operatorname{tg}\Psi_1$  и  $\operatorname{tg}\Psi_2$  точнее регистрировать структурные отличия поверхностей.

Используя этот подход, был предложен способ бесконтактного контроля состава поверхностных слоев и структур АМС после их изготовления и в процессе обработки поверхности, а также устройство для его осуществления [26]. При этом использованы двухкружный гoniометр, точность отсчета углов поворота предметных столиков 2 и 3 в котором такая же, как и в стандартном одноосном гoniометре-спектрометре ГС-5. Для формирования ортогональных  $p$ - и  $s$ -поляризаций применена призма Волластона 5, которая установлена с возможностью поворота вокруг оптической оси устройства на  $360^\circ$  для регистрации фотоприемниками 1 и 4 отраженных от эталонной и исследуемой поверхностей пучков света в соответствующих ортогональных поляризациях (рис. 6).

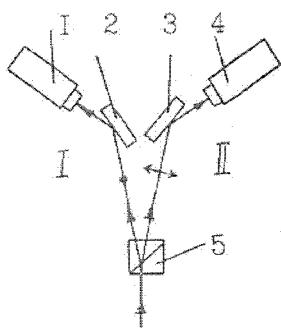


Рисунок 6.

Двукружный гoniометр [26]: 1 - фотоприемники, 2 - эталон, 3 - образец, 5 - призма Волластона

Разновидностью такого двухкружного гoniометра-рефлектометра является устройство, оснащенное шарнирно установленными плоскими зеркалами, связанными кинематически с двумя предметными столиками, главным отличием которого является применение только одного фотоприемника [27]. На нем определяют комбинированные эллипсометрические параметры  $\operatorname{tg}\Psi_1$  и  $\operatorname{tg}\Psi_2$  и без дополнительных пере юстировок и балансировок двух измерительных каналов 1 и 2 (рис. 6) оперативно выбирают оптимальный угол падения опт,

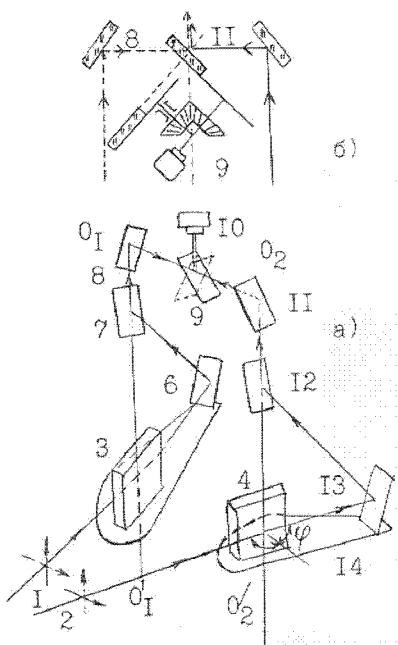


Рисунок 7.  
Оптико-кинематическая схема двухкружного гoniометра  
с одним фотоприемником (а) и схема прохождения  
лучей через модулятор (б) [28]

при котором разности  $\operatorname{tg}\Psi_1 - \operatorname{tg}\Psi_2$  отвечает максимальный сигнал на фотоприемнике.

Устранив шарнирные связи между подвижными узлами и использовав зеркальную поворотную систему, повышают точность и производительность измерений указанных параметров при сканировании угла падения  $\varphi$ . Как и в предыдущих [27], в этом устройстве используется только один фотоприемник [28]. Новизна конструкции заключается в том, что при использовании оптико-поляризационного эффекта создана современная методика экспресс-анализа и контроля качества поверхности лент АМС с повышенной по сравнению с достигнутой в [27, 28] пороговой чувствительностью.

На рис. 7. изображена его принципиальная схема. Свет со взаимно ортогональным направлением поляризации, падающий от источника вдоль направлений 1 и 2, попадает на эталонную и исследуемую поверхности, установленные на столиках 3 и 4 соответственно. Зеркала 6 и 13 жестко закреплены на кронштейнах 5 и 14, поэтому падающие на них пучки отражаются в направлении осей вращения столиков гoniометров. Установленные на осях  $O_1O'_1$  и  $O_2O'_2$  зеркала 7 и 12 крепятся к кронштейнам 5 и 14 так, что отраженные от них пучки света проходят в направлении этих осей независимо от поворотов каждого из кронштей-

нов. Зеркала 8 и 11 закреплены на отдельной платформе и остаются неподвижными при вращении столиков. Поэтому направленные на них вдоль осей  $O_1O'_1$  и  $O_2O'_2$  пучки света отразятся в направлении, например, перпендикулярном к этим осям. С помощью зеркал 7 и 8 с одной стороны, и зеркал 11 и 12 - с другой, пучки света, которые попадают на модулятор 9 (рис. 7 б), после отражения от его зеркал поочередно направляются на один и тот же фотоприемник 10, благодаря которому регистрируется сигнал переменного тока, прямо пропорциональный разности коэффициентов отражения  $r_s(d)$  и  $r_p(e)$ . При повороте плоскости поляризации на  $90^\circ$  вокруг оптических осей в каждом из каналов 1 и 2 направления поляризации отраженного от этих поверхностей света меняются местами и сигнал на фотоприемнике 10 уже соответствует разности  $r_s(e) - r_p(d)$ . По разности величин двух сигналов, в условиях выбора опт когда такая величина максимальная, оценивают расхождение структурных параметров сравниваемых лент АМС.

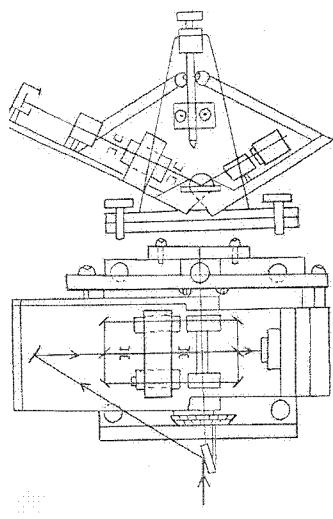


Рисунок 8.

Оптико-кинематическая схема двухканального рефлектометра-эллипсометра горизонтального типа [29]

Однако обеим конструкциям рефлектометрических устройств [27, 28] все же присущ один общий недостаток - невозможность измерений  $\operatorname{tg}\Psi_1$  и  $\operatorname{tg}\Psi_2$  для жидкостей и расплавов. В связи с этим разработано устройство [29], которое лишено такого недостатка. На рис. 8 представлена его оптико-

кинематическая схема, принцип действия которой аналогичен рассмотренному выше в устройстве [28], а отличие заключается в наличии одной поворотной оси [30]. В отличие от эллипсометра вертикального типа [31] данный поляризационный рефлектометр является более универсальным и пригодным для измерения не только прямых ( $\Delta$ ,  $\Psi$ ), а и комбинированных ( $\operatorname{tg}\Psi_1$  и  $\operatorname{tg}\Psi_2$ ) эллипсометрических параметров как жидких, так и твердых объектов.

Зная  $\operatorname{tg}\Psi_m$  и соответствующий ему угол падения  $\Phi_0$ , определенный по экспериментальной зависимости  $\operatorname{tg}\Psi(\varphi)$ , с помощью программ сопряженно-го с эллипсометром-рефлектометром вычислительного комплекса находят оптические постоянные  $n$  и  $\alpha$  среды [32].

Поведение энергетического коэффициента отражения  $R = r_p^2/r_s^2$  в зависимости от  $\varphi$  описывается одним из соотношений Френеля

$$R = R_p/R_s = ((a - \sin\varphi \operatorname{tg}\varphi)^2 + b^2)/((a + \sin\varphi \operatorname{tg}\varphi)^2 + b^2), \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  - неточные аналоги  $n$  и  $\alpha$  и связаны с ними системой уравнений:

$$a^2 - b^2 = n^2 - \alpha^2 - \sin^2\varphi, \quad (2)$$

$$a \cdot b = n \cdot \alpha. \quad (3)$$

При уменьшении поглощения ( $\alpha \rightarrow 0$ ) траектория кривой минимума в зависимости  $R(\varphi)$  направлена к точке  $(0, \Phi_0 = \arctg(n))$  справа. При больших  $\alpha$  этот минимум достаточно широкий. Поэтому для уточнения углового положения минимума применяют модуляционную методику [33]. При сканировании  $\varphi$  вблизи  $\Phi_0$  регистрируют сигнал, пропорциональный производной функции

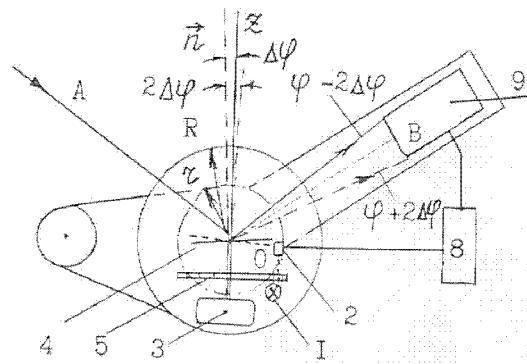


Рисунок 9.

Рефлектометр с модуляцией угла падения света [35]

$R(\phi)$  по углу  $\phi$  в соответствующей поляризации [34]. Схема одного из устройств, разработанного для регистрации сигнала по такой методике [35], представлена на рис. 9.

Пучок света, падающего на образец 4 в направлении А, отклоняется плоской поверхностью при повороте вала электродвигателя 3 вокруг оси z. Нормаль  $\vec{n}$  к поверхности составляет с осью z угол  $\Delta\phi$ . Ось z вала перпендикулярна оси поворота гoniометра 2, пересекает ее и направлена по биссектрисе угла АОВ, причем ОВ - направление отклоненного образцом 4 пучка света при  $\Delta\phi = 0$ . Прерыванием пучка обтюратором 5 формируют опорные сигналы в синхродетекторе. При полном повороте вала значения углов падения и отражения изменяются вблизи данного  $\phi$  в пределах от  $\phi + 2\Delta\phi$  до  $\phi - 2\Delta\phi$  в плоскости АОВ относительно направления ОВ. За счет выбора угла  $\Delta\phi$  обеспечивают амплитуду угловой модуляции. Полезный сигнал с фотоприемника 9 поступает на вход синхродетектора 8 в те моменты времени, когда через прорези обтюратора 5 проходит свет от источника света 1, который формирует управляющие импульсы с помощью фотодиода 2 в опорном канале синхродетектора, а образец 4 направляет измеряемый пучок вблизи направления ОВ на фотоприемник или под углом  $\phi - 2\Delta\phi$ , или  $\phi + 2\Delta\phi$ , когда плоская поверхность образца совпадает с осью поворота гoniометра. Поворотный

столик и кронштейн, на котором установлен фотоприемник, объединены кинематической связью по типу устройства [11]. Угол  $\Delta\phi$  выбирается из условия:  $0 < \Delta\phi < (r_1 - r_2)/2L$ , где  $r_1, r_2$  - соответственно радиусы окна фотоприемника и пятна светового пучка на его входе, L - расстояние между осью вращения гoniометра и окном фотоприемника. Применение модуляционного рефлектометра позволяет разграничить вклады слоя адсорбированных на лентах АМС посторонних веществ и шероховатостей поверхности в параметры  $\Delta$  и  $\Psi$ .

Минимальной шероховатости соответствует максимальное значение  $\operatorname{tg} \Psi$  в минимуме кривой  $\operatorname{tg} \Psi(\phi)$ , что демонстрируют угловые зависимости  $\operatorname{tg} \Psi(\phi)$  трех образцов Ni с различными высотами неровностей микрорельефа их поверхности [14] (рис.10). Часто важны не сами параметры шероховатости, число которых достигает 40 в приборах типа Тейлисерф-5 [36], а контроль отклонений этих параметров от допустимых, если задаться неровностями образцовой поверхности. Именно этому и служат предложенный метод комбинированных эллипсометрических параметров [5] и компараторные устройства для его осуществления [26-28] при контроле соответствия профильных характеристик поверхности испытуемой ленты АМС по отношению к выбранной в качестве образцовой мере в заданных пределах. Повышение надежности контроля с целью отработки технологического режима изготовления лент АМС достигается автоматической балансировкой и калибровкой устройства, которое реализуется только в одноканальных схемах регистрации разностного сигнала. Поэтому разработано устройство для бесконтактного контроля качества физико-химического состояния поверхности АМС в виде лент и покрытий, основу которого составляет двухкружный гoniометр [37], который в отличие от рассмотренных гoniометров [26-28], где обе поворотные оси параллельны, имеет их взаимно перпендикулярную ориентацию.

На рис. 11 изображена его оптико-кинематическая схема, где 1 - модулятор, 2 и 3 - плоские зеркала, 4 - поляризатор, 5 и 6 - столики, 7 - анализатор, 8 - фотоприемник, 9 - приемно-регистрирующий узел, а  $O_1O'_1$  и  $O_2O'_2$  - оси вращения столиков 5 и 6. Углы падения  $\phi$  света на

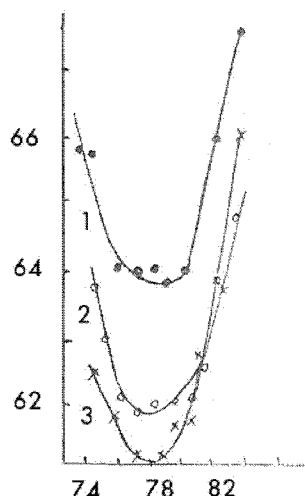


Рисунок 10.

Зависимости  $\operatorname{tg} \psi(\phi)$  шероховатых поверхностей образца Ni со среднеарифметическим отклонением  $R_o = 4$  (1), 30 (2) и 40 нм (3) [14]

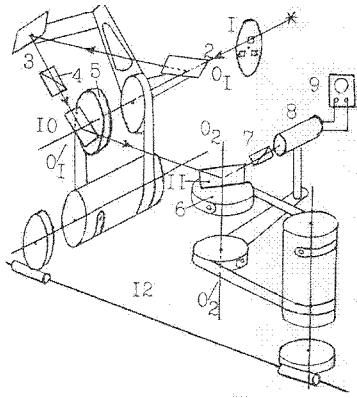


Рисунок 11.

Двукружный гониометр со взаимно перпендикулярными поворотными осями [37]

эталонную деталь ( $\mathcal{E}\mathcal{D}$ ) 10, установленную на столике 5, и на контролируемую ( $\mathcal{K}\mathcal{D}$ ) - 11, установленную на столике 6, равны между собой. Первый гониометр включает зеркала 2 и 3, поляризатор 4, столик 5, а второй - столик 6, анализатор 7 и фотоприемник 8.

Излучение от источника направлено вдоль оси  $O_1O'_1$ . После прохождения через модулятор 1 и отражения от плоского зеркала 2, а затем и плоского зеркала 3, излучение проходит через поляризатор 4 и попадает на  $\mathcal{E}\mathcal{D}$ . Поляризатор установлен с возможностью вращения вокруг направления распространения пучка света, проходящего через него.

Повороту столика 5 вокруг  $O_1O'_1$  на угол  $\Delta\phi$  за счет кинематической связи по типу устройства [11] зеркалам 2 и 3 соответствует поворот на угол вдвое больший. Это условие обеспечивает при изменении  $\phi$  на  $\mathcal{E}\mathcal{D}$  сохранение направления распространения отраженного пучка, который затем падает на  $\mathcal{K}\mathcal{D}$ . Повороту анализатора и фотоприемника на угол  $\Delta\phi$  соответствует поворот столика 6 на угол  $\Delta\phi/2$ . После отражения от  $\mathcal{K}\mathcal{D}$  свет через анализатор попадает на фотоприемник. Чертежные передачи 12 обеспечивают синхронную кинематическую связь между столиками 5 и 6 при изменении  $\phi$ , которой нет в прототипе [38] и в другом устройстве [39], где решают подобную задачу. Изменение угла  $\phi$  необходимо для выбора  $\Phi_{\text{опт}}$ , чтобы оперативно осуществить с высокой доверительной вероятностью контроль поверхности параметров микрорельефа относительно соответствующих характеристик поверхности слоя

ленты АМС, взятой в качестве  $\mathcal{E}\mathcal{D}$ . Оptический принцип, положенный в основу контроля, заключается в следующем [40]. Ориентируют плоскости пропускания поляризатора и анализатора под азимутальным углом  $\zeta$  к  $\rho$ -плоскости  $\mathcal{E}\mathcal{D}$  и  $\mathcal{K}\mathcal{D}$ . Только при идентичности параметров микрорельефа поверхностей и одном и том же угле падения оптически компенсируется разность фаз и ее изменение и восстанавливается соотношение  $\rho$ - и  $s$ -компонент вектора поляризации  $\vec{E}$  (поскольку  $r_p(k)r_s(\varepsilon) = r_p(\varepsilon)r_s(k)$ , когда  $(k) \approx (\varepsilon)$ ), а значит, и азимут  $\zeta$ , на выходе системы  $\mathcal{K}\mathcal{D}$ - $\mathcal{E}\mathcal{D}$  по отношению к тому, что было на входе, и сама система представляет собой ахроматический компенсатор. Если азимуты восстановленного линейно поляризованного света и направления пропускания анализатора образуют между собой 900, то на фотоприемнике регистрируют нуль-сигнал. Преимуществом конструкции двукружного гoniометра со взаимно перпендикулярной ориентацией поворотных осей является отсутствие балансировки измерительного канала, поскольку равенство углов падения  $\phi$  на  $\mathcal{K}\mathcal{D}$  и  $\mathcal{E}\mathcal{D}$  и выбранная ориентация поляризатора и анализатора принципиально ее обеспечивают. Тем самым степень отклонения сигнала, регистрируе-

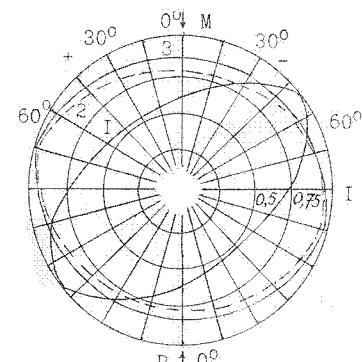
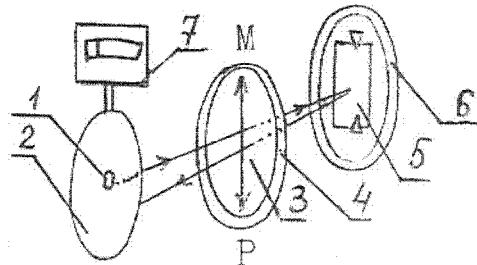


Рисунок 12.

Рефлектометр нормального угла падения  
(а) и ИРАП (б) лент АМС на основе Ni (1), Fe (2), а также образца поликристаллического Ni (3) [44]

мого от нулевого связана с несоответствием параметров микрорельефа поверхности КД и ЭД, в роли которых могут выступать контактная и неконтактная стороны ленты АМС.

Взаимосвязь между отражательной способностью  $R_{\text{ш}}$  шероховатых поверхностей и параметрами их микрорельефа замечают при нормальном падении ( $\phi = 0$ ) согласно формуле [41]:

$$R_{\text{ш}}/R_0 = \exp(-(4\pi h/\lambda)^2) + (1 - \exp(-(4\pi h/\lambda)^2)) \cdot (1 - \exp(-(\sqrt{2\pi} h/m\lambda)^2)), \quad (4)$$

где первое слагаемое представляет радиационные потери пучка света с длиной волны  $\lambda$ , а второе - диффузно-отраженный поток, собранный детектором в пределах телесного угла  $\delta$ ,  $m$  и  $h$  - среднеквадратичные отклонения наклона профиля микрорельефа поверхности и его высоты,  $R_0$  - отражательная способность идеально-гладкой поверхности.

При нормальном падении  $p$ - и  $s$ -поляризации неразличимы, но поляризационные эффекты могут возникать в угловом распределении диффузно-отраженного света [42]. Интересно, что "оптические" оценки  $h$  по формуле (4) чаще всего завышены относительно тех  $h_m$ , которые получены непосредственным измерением при механическом контакте, примерно в 1,5-2 раза при малых  $h \sim 45 \text{ \AA}$  и в 4-5 раз - при  $h \sim 450 \text{ \AA}$  (пленки Au) [43]. Для наблюдения таких эффектов на отражающей поверхности аморфных лент изготовлен рефлектометр [44], отличающийся своей конструкцией от известных рефлектометров [45] введением поляроида к регистрирующей головке и выбором ее геометрии. На рис. 12 а представлена его оптическая схема, где 1 - источник света, 2 - фотоприемник, 3 - поляроидная пленка, 4 - лимб, 5 - столик для крепления лент, 6 - лимб, 7 - регистрирующее устройство, а МР - направление оси пропускания поляроида и продольной оси ленты в исходном положении. Источник и фотоприемник выполнены в виде одного блока и установлены над столиком. На лимбах 4 и 6 закреплены поляроид 3 и столик 5. Ленту АМС размещают на столике так, чтобы угловое положение ее оси в направлении длины ленты было параллельным направлению МГ. Световой поток, попавший на ленту от источника 1 подвергается направленно-диффузному рассеянию на поверхности под углом, близким к нормальному и, пройдя через поляроид, в

обратном направлении к падающему пучку, попадает на фотоприемник, фототоки из которого регистрируют устройством 7. Вращая лимб 6 вокруг оптической оси, которая по направлению совпадает с нормалью к плоскости ленты, на 3600, фиксируют устройством 7 фототоки и соответствующие им углы поворота оси ленты, а точнее, получают полярную зависимость (азимутального сканирования) интенсивности отраженного от ленты света по данному направлению поляризации в ее плоскости, названной нами индикаторской рассеяния по азимуту поляризации (ИРАП) [44]. Такая индикаторика по форме представляет собой замкнутую кривую в виде овала (рис. 12 б). Относением экстремальных значений фототоков определяют степень структурной анизотропии поверхностного слоя ленты и ориентацию главной оси овала относительно ее продольной осевой линии. Фактически регистрируемая такой индикаторской анизотропией оптических свойств означает и анизотропию диэлектрической проницаемости (а соответственно, и атомной структуры слоя), связанную с выделенным направлением на поверхности вследствие сформированных внутренних напряжений при изготовлении ленты АМС.

В качестве источника света использован светодиод АЛ-307, а фотоприемника - фотосопротивление кольцевого типа ФСВ-16АН. Фототок регистрировали микроамперметром М-24 или самописцем Н-307/1 при вращении лимба 6 электромеханическим приводом.

На рис. 12 б представлены нормированные до максимального сигнала ИРАП свободных поверхностей лент аморфных сплавов  $\text{Ni}_{78}\text{Si}_6\text{B}_{16}$  (кривая 1) и  $\text{Fe}_{81}\text{B}_{12}\text{Si}_5\text{C}_2$  (кривая 2) и полированной поверхности массивного образца электролитического Ni (кривая 3). Нулевой отметке соответствует направление продольной оси ленты и плоскость пропускания (МР) поляроида. Отношение минимального фототока к максимальному соответствует отношению малой и большой полуосей овала  $a'/b'$  и с учетом азимута главной оси этого овала относительно продольного направления ленты характеризуют анизотропию структуры АМС, составив для сплава  $\text{Ni}_{78}\text{Si}_6\text{B}_{16}$  0,56 и 600, сплава  $\text{Fe}_{81}\text{B}_{12}\text{Si}_5\text{C}_2$  - 0,77 и 700. Относительно никелевого образца следует отметить, что однородность его приповерхностного слоя нарушена предыду-

щей направленной шлифовкой, что стало заметным затем в оптических свойствах полированной поверхности аналогично результатам [46], поскольку данный образец был отожжен. Для взятых в качестве репера электрохимически осажденных пленок сплава  $Ni_{81}P_{19}$  ИРАП приобретала форму окружности. В том, что форма ИРАП лент АМС на основе никеля или железа преимущественно определяет структурный фактор, а не ориентированные поверхностные шероховатости, убеждают проведенные нами эксперименты.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНОГО НЕСОВЕРШЕНСТВА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ЛЕНТ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

С самого начала однородность структуры лент АМС исключает присутствие каких-либо дефектов, но в реальных условиях это не так [47]. Поэтому современные модели АМС основаны на неоднородности структуры и при ее описании используют представления (Немилова С.В., Джохар и др. [48]) о стекле как совокупности полиздеров (основная структурная единица) с плотной упаковкой, связанных промежуточной областью с рыхлой упаковкой. Но и в таком подходе тяжело объяснить фрактальную структуру поверхности и ее анизотропию, которую можно заметить методом малоуглового рентгеновского рассеяния [47] и регистрацией протяженной тонкой структуры рентгеновского спектра поглощения (EXAFS) в  $\rho$ -и  $s$ -поляризациях для ряда АМС. Ситуация осложняется в ферромагнитных АМС, на поверхности лент которых возникают сжимающие и растягивающие напряжения [47], неровности (1 мкм на неконтактной стороне) клиновидной формы, которые не способствуют уменьшению коэрцитивной силы  $H_c$ . Внутренние напряжения локализованы в областях 50-200 Å [49]. Полагают [47], что в их пределах структура сильно анизотропна и существенно влияет на магнитную доменную конфигурацию [50, 51]. Возможной причиной анизотропии может быть также появление атомных цепочек или слоев, обладающих дальним порядком [47], и их размещение вдоль направления истечения расплава. Очевидно, неодинаково должна себя проявлять анизотропия обеих сторон лент [52]. Поэтому важно заметить ее оптически

и детально изучить по характеристикам ИРАП.

Оказалось, что в только что изготовленных лентах с контактной стороны ИРАП - окружность, а с неконтактной - овал. Значит, большую однородность структуры и изотропные свойства имеет контактная сторона. Такой характер ИРАП лент АМС связан с разной спецификой укладки направленных атомных слоев металла при формировании метастабильных фаз [53] и с появлением сдвиговых напряжений, в результате чего происходит поворот атомных кластеров или нанокристаллических зародышей относительно продольной оси ленты. Необходимо также учитывать и различие в характере растекания с обеих сторон расплава в продольном и поперечном направлениях ленты на диске, врачающемся при ее изготовлении [54], с чем связана и анизотропия прочности (разрушающего напряжения  $\sigma_f$ ) лент в этих направлениях, когда константа такой анизотропии  $\sigma_f(0^\circ)/\sigma_f(90^\circ)$  составляет 1,22 [55].

Важно подчеркнуть, что с неконтактной стороны ленты, где скорость охлаждения аморфной фазы на 2 порядка ниже, чем для контактной, рентгеновский спектр приобретает признаки, присущие спектру сплава в кристаллическом состоянии [56]. Соответственно, причиной формирования структурной неоднородности неконтактной стороны ленты АМС может быть ориентированный фронт кристаллизации в мелких включениях, направление которого, возможно, и задает угол разрыва ленты относительно ее продольной оси [47]. Контактная же сторона лент АМС имеет по отношению к неконтактной более высокую степень аморфности, которая определяется отношением количества комплексов, присущих только а-составлянию данной системы (и таких, которые формируют поверхностные слои расплава), к количеству кристаллоподобных комплексов [56], что и зафиксировано вырождением овала в окружность в форме ИРАП в нашем эксперименте.

Среди возможных причин неоднородности структуры лент АМС авторы [52] отмечали шероховатость и ее влияние на намагниченность насыщения с контактной стороны. Поэтому для однозначного разграничения структурно-деформационного фактора и шероховатости в формировании ИРАП, проведены опыты [44] как для лент АМС  $Ni_{78}Si_xB_{22-x}$  ( $x = 4,5,6$  и 8 ат %), так и фольги

AMC Ni (основа) - Cr ( $18,2 \pm 0,5$ ) - Si ( $7,7 \pm 0,2$ ) - В ( $1,35 \pm 0,05$ ) (весовые %) (полученных закалкой из расплава с перегревом его на 300 (образец № 1) и  $450^\circ\text{C}$  (образец №2)) после термических и / или деформационных (прокатка ленты вдоль (Y-направление) и поперек (X-направление) ее продольной оси) воздействий на образцы, а также после электролитического (со снятием слоя толщиной 1,5 мкм) или механического полирования (алмазными пастами с направленными движениями их абразивных частиц вдоль ( $<\text{Y}>$ ) и поперек ( $<\text{X}>$ ) продольной оси ленты).

При неизменной шероховатости поверхности лент AMC Ni-Cr-Si-B после отжига в течение 15 мин при  $450^\circ\text{C}$ , во-первых, возникает анизотропия на контактной стороне (хотя в исходном состоянии лента характеризовалась ИРАП в виде окружности), а, во-вторых, она существенно меняется на неконтактных поверхностях. Более того, анизотропия, возникшая на контактной стороне ленты образца № 2 после повторного отжига ( $4500\text{ C}$ , 15 мин) полностью исчезала. Эти факты однозначно свидетельствуют, что при кратковременном нагревании ленты изменение формы и ориентации ИРАП обусловлено эволюцией атомной структуры скин-слоя ( $d \sim 100\text{ \AA}$ ) на фоне неизмененного микрорельефа его внешней поверхности, а изначально сформированная структура AMC существенно зависит от температуры перегрева расплава. На этот последний факт также было указано в [56]. Пожалуй, нет причин полагать, что подобного типа анизотропия связана со значительными внутренними или поверхностными напряжениями, поскольку при спинниговании расплава есть условия для их возникновения на обеих сторонах лент, а особенно на контактной. Но именно индикаторика с контактной стороны фиксирует изотропные свойства слоя. Сопутствующим обстоятельством при выяснении роли шероховатости в формировании ИРАП является то, что неровности микрорельефа иногда не изменяются при переходе AMC из а- в к-состояние [57].

Таким образом, в только что изготовленных лентах AMC на основе Ni свободная поверхность имеет анизотропные оптические свойства, обусловленные не столько напряжениями, возникшими при ее изготовлении в прилегающем к этой поверхности слое, сколько проявлением фронта крис-

таллизации в пределах субмикрообластей с вполне характерной кристаллографической ориентацией.

После пластической деформации лент AMC вследствие прокатки на контактной стороне возникает анизотропия в соответствии с формами ИРАП, которые наблюдаются экспериментально, а ее характер на неконтактной поверхности существенно меняется в зависимости от предыстории (до (после) отжига, его продолжительности и температуры) подвергнутого механическому воздействию образца и направления ( $<\text{Y}>$  или  $<\text{X}>$ ) прокатки относительно оси ленты, указывая на структурные изменения и особенности их превращения в таком процессе.

Но утверждать, что шероховатость никоим образом не влияет на зарегистрированные параметры ИРАП, нельзя. После неглубокого механического полирования контактной и неконтактной поверхностей ленты AMC  $\text{Ni}_{78}\text{Si}_8\text{B}_{14}$  снимается тонкий слой материала.

**Таблица 1.**  
Эллипсометрические параметры неконтактной (нк) и контактной (к) поверхностей лент AMC  $\text{Fe}_{80-x}\text{Ni}_x\text{B}_{20}$  при  $x = 20, 40$  и  $60\text{ at \%}$

Сплав	$\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{60}\text{B}_{20}$		$\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$		$\text{Fe}_{60}\text{Ni}_{20}\text{B}_{20}$	
	нк	к	нк	к	нк	к
параметр						
главный угол, фо, град	77	76,7	77,6	77	78	77
$\text{tg}\psi_m$	0,580	0,578	0,562	0,552	0,554	0,544
угол падения при $\psi_m, \Phi_0$ , град	75	76	76	77	76	77,5

Понятно, что тогда зондируемый светом скин-слой практически сохраняется и зафиксированная анизотропия не испытывает существенных преобразований. Поэтому этот вид полирования дает возможность оценить изменение формы ИРАП ленты при уменьшении параметра шероховатости ее поверхностного микрорельефа. После снятия слоев с обеих сторон ленты в результате такой полировки отношение полуосей овала ИРАП  $a'/b'$  возрастает от 0,82 до 0,91 (Y-полировка) и 0,94 (X-полировка) (неконтактная поверхность) и фактически остается на прежнем уровне на контактной стороне (0,98). Выходит так, что полирование, направленное только на уменьшение шероховатости, не устраняет свойственную слою ани-

зотропию, и характерная ориентация ИРАП сохраняется в скин-слое под гладкой полированной поверхностью.

Согласно формуле (3) при использовании рефлектометра, собранного по оптической схеме с нормально падающим зондовым пучком на исследуемую поверхность, нами проведена оценка среднеквадратической высоты неровностей  $h$  методом сравнения для однотипных металлических поверхностей (например, Ni (эталон (e)) и лент АМС  $\text{Ni}_{78} \text{Si}_6 \text{B}_{16}$  (d)). Полагая  $R_0$  одинаковым для обоих образцов, из первого слагаемого в формуле (3) можно получить  $\ln(r^2(d)/r^2(e)) = (4\pi/\lambda)^2(h_e^2 - h_d^2)$ . Приняв класс чистоты поверхности образца Ni по данным [14] как соответствующий  $\nabla_{11} - \nabla_{12}$  (среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a = 40-60$  нм), полученные оценки  $h$  для неконтактной и контактной поверхностей ленты дают величины относящиеся к  $\nabla_6 - \nabla_7$  ( $R_a = 0,8 - 1,5$  мкм), причем класс чистоты неконтактной поверхности на одну-две ступени выше. Это подтверждают результаты угловых эллипсометрических измерений широких лент АМС  $\text{Fe}_{80-x} \text{Ni}_x \text{B}_{20}$  при  $x = 20, 60$  и  $40$  ат. % для обеих поверхностей. Из таблицы 1 видно, что главный угол и азимут  $\Psi_m$ , а не угловое положение  $\Phi_0$  минимального азимута для неконтактной поверхности всегда выше, чем для контактной. Введением эффективного слоя для шероховатой поверхности [58] объясняется такое различие эллипсометрических параметров обеих поверхностей одной и той же ленты, а также тот факт, что со стороны свободной поверхности ленты параметры шероховатости ниже. В зависимости от технологии изготовления и ширины полученной ленты ее шероховатость может расти и класс чистоты поверхности тогда составляет  $\nabla_3 - \nabla_4$  ( $R_a \sim 16,0$  мкм). В этом случае проводилось полирование с помощью алмазных паст типа ACM, абразивный размер зерна которых непрерывно уменьшался с шагом в 1 мкм от 14/10 до 1/0 мкм. Поэтому надо обсуждать, проводилось ли такое полирование в конкретном исследовании, поскольку поверхность исходных образцов бывает разного качества.

Таким образом, если в плоскости ленты по каждому направлению отложить величину интенсив-

ности рассеянного света с тем же направлением поляризации, что и в падающем пучке света, то получаем замкнутую кривую (полярную диаграмму). Ее форма и ориентация относительно продольной оси ленты характеризуют свойственную приповерхностному слою анизотропию как со стороны неконтактной поверхности, для которой при формировании не было сцепления с поверхностью диска, так и со стороны контактной, но уже после термических и деформационных воздействий на ленту.

### ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОГО НЕСОВЕРШЕНСТВА ЛЕНТ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ НА ИХ ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ

Чтобы проверить, как обнаруженное с помощью ИРАП структурное несовершенство лент влияет на другие оптические характеристики, а также определить, насколько изменяются эллипсометрические параметры в зависимости от ориентации продольной оси лент относительно  $\rho$ -плоскости, на основе эллипсометра ЛЭФ-3М-1 были измерены угловые зависимости  $\Delta(\phi)$  и  $\Psi(\phi)$  для лент АМС  $\text{Fe}_{78-y} \text{Ni}_y \text{Si}_9 \text{B}_{13}$  с  $y = 0, 8$  и  $21$  ат. %, результаты обработки которых приведены в табл. 2.

Особенность оптических измерений заключалась в том, что продольная ось ленты совпадала или с  $\rho$ - (||), или с  $s$ -плоскостью (⊥) образца. Из этой таблицы видно, что для сплавов в а-состоянии в зависимости от ориентации продольной оси ленты и главный угол  $\Phi_0$ , и угол  $\Phi_m$ , который отвечает минимальному азимуту, изменяется в пределах 0,2-0,90, превышающих погрешности измерений  $\Delta\Phi_0 = 0,1^\circ$  и  $\Delta\Phi_m = 0,2^\circ$ . При уменьшении концентрации Ni в сплаве  $\Phi_0$  спадает. Но такая тенденция не наблюдается для угла  $\Phi_m$  [59], что указывает на слабое различие между параметрами шероховатости поверхностей этих 3-х лент на неконтактной стороне, поскольку их  $\operatorname{tg}\Psi_m$  находятся почти на одном уровне. При всех значениях у величина  $\operatorname{tg}\Psi_m$  всегда ниже при  $\perp$ -ориентации оси ленты, поэтому в ее плоскости устойчиво и само структурное несовершенство, возможные причины которого рассмотрены выше. Большие изменения в  $\Phi_0$  и  $\Phi_m$  наблюдаются при переходе от одной ориентации оси ленты к другой после кристаллизации сплава (рис. 13), но значения  $\operatorname{tg}\Psi_m$  сплава, в составе которого нет Ni, остаются прежними. Это

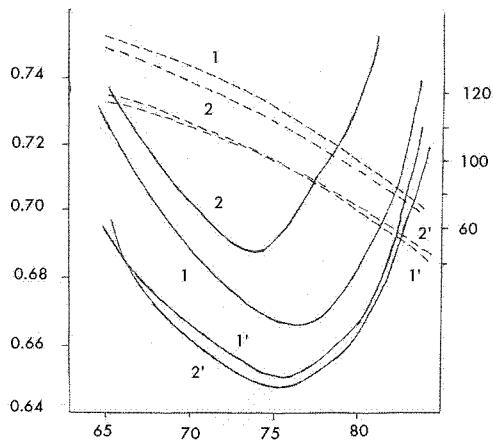


Рисунок 13.

Зависимости  $\Delta(\phi)$  (штрихованная линия) и  $\text{tg}\Psi(\phi)$  (сплошная линия) неконтактной стороны ленты AMC  $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{21}\text{Si}_9\text{B}_{13}$  в а- ( $1', 2'$ ) и к-состояниях (1, 2) при размещении ее продольной оси вдоль (1, 1') и поперек (2, 2') р-направления. Кривые 1 и 2 смещены вверх на  $30^\circ$  ( $\Delta$ ) и 0,08 ( $\text{tg}\Psi$ )

значит, что параметры шероховатости поверхности ленты при преобразовании а → к-состояние не меняются, как это и наблюдалось методами электронной оже-спектроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии в Fe-B [57]. Тогда расхождение между  $\text{tg}\Psi_m$  при двух ориентациях оси ленты закристаллизованного сплава с большим содержанием Ni ( $y = 21$  ат.%) связано, очевидно, со спецификой химического состава и структурного несовершенства образовавшихся фаз с участием Ni.

Чтобы оценить, насколько меняются эллипсометрические параметры лент AMC при произвольной ориентации их продольной оси относительно р-плоскости, на эллипсометре ЛЭФ-3М-1 и малогабаритном гониометре [14] проведены измерения зависимостей  $\text{tg}\Psi(\alpha_\lambda)$  и  $\Delta(\alpha_\lambda)$  ( $\alpha_\lambda$  - угол поворота ленты вокруг нормали п к плоскости предметного столика) ленты AMC  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$  с обеих ее сторон (рис. 14), при повороте продольной оси ленты с р- ( $\alpha_\lambda = 0^\circ$ ) в s-плоскость ( $\alpha_\lambda = 90^\circ$ ). Угол падения φ света на образец составлял  $75^\circ$ . Видно, что отклонение  $\Delta(\text{tg}\Psi)$  от среднего значения составляет  $\pm(4-5)\%$ , причем интервал изменения  $\Delta(\text{tg}\Psi)$  для контактной поверхности шире, чем с неконтактной стороны, обладающей к тому же слабо меняющейся в зависимости от  $\alpha_\lambda$  разностью фаз  $\Delta$ .

Учитывая это, далее внимание обращалось на идентичность угловой ориентации продольной оси ленты на предметном столике эл-

липсометра относительно р-плоскости. Но даже после уточнения пространственного положения ленты AMC и выбора ее неконтактной поверхности как наименее шероховатой, для спектроэллипсометрических исследований оставался открытм вопрос, насколько отличаются между собой измеренные с обеих сторон ленты спектры поглощения. Этот момент очень важен при установлении корректных соотношений между спектральными характеристиками AMC и параметрами его электронной структуры.

В результате оптических измерений лент сплавов  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$  и  $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{40}\text{B}_{10}$ , когда образец находился на предметном столике эллипсометра либо контактной, либо неконтактной поверхностью при одной и той же ориентации продольной оси ленты в s-плоскости, определено, что форма спектра поглощения и положение его структур не изменяются, а поэтому взаимосвязь между оптическими и электронными характеристиками не будет зависеть от того, с какой стороны ленты проводятся спектральные исследования [59].

Таблица 2.  
Эллипсометрические параметры контактной поверхности образцов сплавов  $\text{Fe}_{78-y}\text{Ni}_y\text{Si}_9\text{B}_{13}$  ( $y = 0, 8$  и  $21$  ат.%) в а- и к-состояниях для лент, размещенных продольной осью || и ⊥ к р-направлению

Сплав	$\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{27}\text{Si}_9\text{B}_{13}$			$\text{Fe}_{70}\text{Ni}_8\text{Si}_9\text{B}_{13}$			$\text{Fe}_{78}\text{Si}_9\text{B}_{13}$			
	Состо- яние	а	к	а	а	к	а	к	а	
Ориен- тация Параметр		⊥		⊥		⊥		⊥		⊥
Главный угол, $\phi_0$ , град.	76,8	77	77	75, 3	76,6	77	75,5	76,4	75,8	75,4
$\text{tg}\Psi_m$	0,56	0,56	0,51	0,5 5	0,55	0,55	0,58	0,58	0,58	0,58
Угол падения при $\psi_m$ , $\phi_m$ , град.	75,6	75,2	77	74	76	76,3	75,5	76,2	74	76

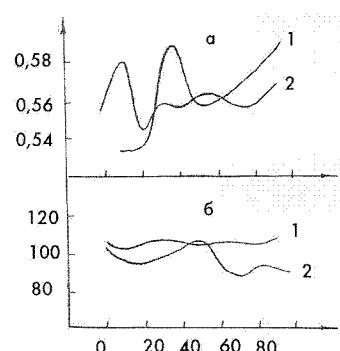


Рисунок 14.  
Зависимости  $\text{tg}\Psi$  (а) и  $\Delta$  (б) неконтактной (1) и контактной (2) поверхностей лент AMC  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{B}_{20}$  от угла поворота  $\alpha_\lambda$  ее продольной оси относительно р-плоскости при падении света на образец под углом  $\phi = 75^\circ$

Очевидно, это связано с тем, что зондовый фотон проникает в объем образца на глубины  $d$  порядка сотен ангстрем (при  $h\nu = 1,96$  и  $2,81$  еВ,  $d = 310$  и  $200$  Å [60]) от поверхности и, соответственно, отклик электронной системы на электромагнитное возбуждение усредняется по этой глубине проникновения света. Поэтому, несмотря на некоторую зависимость концентрации компонентов сплава в а-состоянии по глубине [61], специфика такой зависимости с неконтактной стороны в такой же мере, как и на контактной стороне поверхности, в результате оптического зондирования в отличие от оже-электронного (на глубинах порядка 5 нм [62]), нивелируется.

Следовательно, с учетом более высокого класса чистоты неконтактной поверхности по отношению к контактной и подобия контуров оптических спектров прилегающих к этим поверхностям слоев материала ленты, все спектральные измерения проведены, главным образом, со стороны не контактировавшей с диском поверхности ленты. Будучи, по сути, оперативными методами определения структурного несовершенства лент и оценки параметров шероховатости их поверхностей, разработанные нами методы угловой поляризационной рефлектометрии позволяют соответствующим образом спланировать спектроскопический эксперимент и выбрать конкретную модель приповерхностного слоя.

На этом основании среди известных моделей (рис. 2) часто предпочтение отдается модели беспленочной плоской поверхности, ограничивающей полубесконечную однородную проводящую среду.

## СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СПЕКТРОЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА

В наработке спектроэллипсометрии имеется значительное количество хорошо отлаженных методов измерения  $n$  и  $\alpha$ , которые могут быть реализованы двумя путями: измерением состояния поляризации отраженного света или при нескольких углах падения, или при одном угле  $\phi$ , но с поворотами анализатора [3, 10]. Нами предпочтение отдано бескомпенсаторному ненулевому методу Битти-Конна, относящемуся ко второй группе [120] и применяющемуся без особых осложнений в широкой области спектра, которая ограничена лишь возможностями функционирования материала по-

ляризационной оптики. В качестве ее элементов нами использованы призмы Грана ( $0,24\text{-}1$  мкм) и Аренса ( $1\text{-}5$  мкм), а также решетки-поляризаторы, выполненные на фторопластовых ( $2\text{-}6,5$  мкм) и полиэтиленовых ( $5\text{-}14$  мкм) подложках, покрытых слоем Al, работающих на пропускание. Решетки-поляризаторы - это дифракционные решетки, нанесенные на подложку из CaF<sub>2</sub> или стекла ИКС25 алмазным резцом или методом копирования штриха на полиэтилен (фторопласт) с решетки-эталона с последующим алюминированием. Однако на отдельных длинах волн с ИК диапазона может быть использован и компенсатор, если он создан на основе катоптрической оптики. Нами предложена конструкция одного из таких устройств (рис. 15), работающего в мощном лазерном пучке с  $\lambda = 10,6$  мкм.

Установка состоит из станины 1, на которой закреплено поворотное устройство 2 с кронштейном 3, лимбом 4 и полой осью 5, гoniометр 6 с поворотным столиком 7 и первым анализатором в виде плоского металлического зеркала 8 с нанесенной диэлектрической пленкой, установленным на поворотном диске 9, поворотное плечо 10 гoniометра с поворотным диском 11, изотропный ослабитель 12 излучения, второй анализатор 13, фотоприемник 14, планку 15, диски 16 и 17, стальные ленты 18 и 19. Радиусы дисков 9 и 17 соотносятся как 2:1, и с помощью этих дисков, а также дисков 11 и 16 одинаковых радиусов и стальных лент 18 и 19 осуществляется синхронная кинематическая связь между поворотным столиком 7 и плечом 10 из соотношением углов их поворота 1 : 2 по тому же принципу, что и в устройствах сканирования угла  $\phi$  [121]. O<sub>1</sub>O - ось вращения поворотного устройства 2 с кронштейном 3, O<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - ось вращения гoniометра 6, причем оси O<sub>1</sub>O и O<sub>2</sub>O<sub>3</sub> взаимно перпендикулярны и пересекаются между собой. Угол 1 между нормалью к плоскости зеркала 8 и осью O<sub>1</sub>O - это угол падения излучения на металлическое четвертьволновое (амплитудно-изотропное) зеркало [122]. Изотропный ослабитель 12, анализатор 13 и фотоприемник 14 установлены на поворотном плече 10 гoniометра 6; O O<sub>4</sub> - ось вращения второго анализатора 13. Устройство работает следующим образом. Эллиптически поляризованное излучение направляют вдоль полой оси 5 по направлению O<sub>1</sub>O. Зафиксировав в гoniометре 6

угол  $\Phi = \Phi_1$ , поворотом кронштейна 3 вокруг оси  $O_2O$  и 2-ого анализатора 13 вокруг оси  $OO_4$  минимизируют регистрируемый сигнал на фотоприемнике 14. При достижении минимума сигнала фазовый сдвиг величиной  $\pi/2$ , задаваемый амплитудно-изотропным зеркалом 8 между ортогональными компонентами вектора поляризации скомпенсирован, и мощное эллиптически поляризованное излучение преобразуется в линейно поляризованное. Отсчет угла наклона  $\eta$  большой полуоси эллипса поляризации осуществляется по лимбу 4 поворотного устройства, а отношение величин малой и большой полуосей - по тангенсу угла поворота анализатора 13.

Четвертьволновое устройство изотропно, если одновременно выполняются условия:  $|\tilde{r}_p| = |\tilde{r}_s| \Delta$  и  $= 90^\circ$ . Из расчета параметров зеркала 8 следует, что для любых показателей преломления подложки (металла)  $N$  и диэлектрической пленки  $n_d$  существует лишь одна пара величин толщины пленки  $d_n$  и угла падения 1, для которых выполняется это условие, то есть зеркало 8 - четвертьволновое и амплитудно-изотропное. Соответствующие аппроксимации зависимостей  $d_n(n_d, N)$  представлены в [121] для  $\lambda = 10,6$  мкм. Однако устройство позволяет измерять эллипсометрические параметры и для других  $\lambda$ , включая и вакуумный ультрафиолет, с выбором  $d_n$  и  $\Phi_1$  для зеркала 8. Погрешность отсчета азимутальных углов и угла  $\Phi_1$  составляет  $30''$ , а фазовой компенсации -  $1'$ .

Для повышения точности измерений по методу Битти, часто осуществляемых в ИК области на лазерных длинах волн [123], может быть использован его модифицированный вариант, уже реализованный в видимой области [124]. По алгоритму минимизации критерия оптимальности, предложенному в [124] для никеля как эталона по достигнутому уровню погрешности измерений  $n$  и  $\alpha$ , аналогичным путем проведен поиск величин азимутов поляризатора  $\Psi_n$  и анализатора  $\Psi_a$ , угла падения  $\Phi_{opt}$ , которые минимизируют на длине волны CO<sub>2</sub> лазера  $\lambda = 10,6$  мкм стандартные отклонения показателей преломления  $\sigma_n$  и поглощения  $\sigma_\alpha$  медных зеркал, имеющих на поверхности в нормальных условиях оксидную пленку [125]. Результаты этих расчетов послужили основой для выяснения влияния окисления на оптические свой-

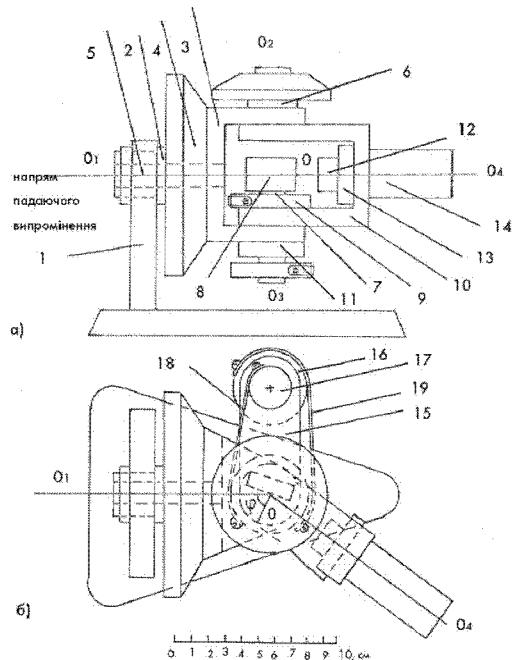


Рисунок 15.

Рис. 15. Оптико-кинематическая схема устройства [121]: а) - вид сбоку, б) - вид сверху

ства аморфных металлических лент в ИК области [126-130]. Оказывается, как и в [127], что толщина оксидной пленки со стороны неконтактной поверхности в 1,5-2 раза меньше, чем со стороны контактной.

Так же, как и в [128] для Ni, на расчетных кривых  $\sigma_n(\phi)$  и  $\sigma_\alpha(\phi)$  для Cu наблюдаются минимумы, которые не соответствуют стандартным азимутам поляризации метода Битти и  $\Phi_0$ , хотя и близки к ним. В нашем случае при  $n = 9$  и  $\alpha = 61$  оптимум составляет:  $\Psi_n = 240^\circ$ ,  $\Psi_a = 370^\circ$ ,  $\Phi_{opt} = 880^\circ$  для  $\sigma_n^{min}$  и  $\sigma_\alpha^{min}$  соответственно, причем в обоих оптимумах  $\sigma_n < \sigma_\alpha$  (при оптимизации по  $n$   $\sigma_n \approx \sigma_\alpha/10$ , по  $\alpha$   $\sigma_n \sigma_\alpha/2$ ). Тем самым подтверждено, что при однократном отражении света от образца достигается максимальная точность метода.

Зависимость  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  дается выражениями [129-133]:

$$\varepsilon_1 = n^2 - \alpha^2 = \sin^2\phi (1 + ((\tan^2\phi(\cos^22\psi - \sin^22\psi \cdot \sin^2\Delta)) / (1 + \sin 2\psi \cos \Delta)^2)), \quad (4)$$

$$2 = 2ne = \sin^2\phi \tan^2 \sin 4\psi \sin \Delta / (1 + \sin 2\psi \cos \Delta)^2, \quad (5)$$

и для их неточных аналогов  $a$  и  $b$  в уравнении (2):

$$a = \sin\varphi \operatorname{tg}\varphi \cos 2\psi / (1 + \sin 2\psi \cos \Delta), \quad (6)$$

$$b = \sin\varphi \operatorname{tg}\varphi \sin 2\psi \sin \Delta / (1 + \sin 2\psi \cos \Delta), \quad (7)$$

или

$$b = a \sin \Delta \operatorname{tg} 2\psi \quad (8)$$

определение которых и является задачей эллипсометрического эксперимента. На их основе по стандартным программам на ЭВМ рассчитывают оптические постоянные  $n$  и  $\varepsilon$  или любые другие пары оптических параметров (например,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ ). Необходимые для расчета  $\Psi$  и  $\Delta$  вычисляют по формулам метода Битти [120]:

$$\operatorname{tg} \Psi = \sqrt{\frac{I_{0^\circ}}{I_{90^\circ}}} \quad (9)$$

$$\cos \Delta = \frac{2I_{45^\circ} - I_{0^\circ} - I_{90^\circ}}{2\sqrt{I_{0^\circ} I_{90^\circ}}} \quad (10)$$

из непосредственно измеренных в регистрирующем устройстве при трех стандартных азимутах, отсчитываемых относительно р-плоскости, поляризатора (анализатора)  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $0^\circ$  значений фототоков  $|90^\circ|, |45^\circ|, |0^\circ|$ , когда анализатор (поляризатор) зафиксирован при азимуте  $\Psi_a(\Psi_p) = 45^\circ$  в зависимости от того, где установлен эллипсометр по отношению к монохроматору, - на его входе (выходе). Для контроля юстировки системы поляризатор-образец-анализатор проводились измерения еще при одном азимуте  $\Psi_a(\Psi_p) = -45^\circ$ , поскольку в методе Битти должно выполняться соотношение:  $|0^\circ| + |90^\circ| = |45^\circ| + |-45^\circ|$ . Отклонения от него не превышали 1-2%. Методические детали эксперимента [1], формулы расчета относительной погрешности в определении  $n$  и  $\varepsilon$  по формулам (4) - (7), способы оперативной обработки данных можно найти в [124]. В нашем эксперименте с образцами АМС разброс значений  $n$  и  $\varepsilon$  от средней величины, полученный в результате нескольких серий измерений, составил в видимой области 1-2%, а со стороны ИК и ближнего УФ не превышал 5%.

В процессе юстировки оптической системы использованы визуализаторы эллипсометрических параметров: угла и квадрата отношения малой и большой полуосей эллипса поляризации [125]. В отличие от разработанного ранее визуализатора на основе синусно-косинусного врачающегося трансформатора [126], в предложенном устройстве [125] нами использована призма Волластона, а также

разработан коммутатор электрических сигналов для изменения полярности при их подаче с фотоприемников на X и Y входы осциллографа С1-19 при повороте призмы Глана на  $180^\circ$ .

Наблюдая по осциллограмме за изменением формы и ориентации полярной зависимости интенсивности прошедшего через врачающуюся призму Глана света при сканировании угла падения и варьировании длины волны света, определяют оптимальные условия для спектроэллипсометрических ненулевых измерений. По визуализируемой картине качественно можно оценить, насколько выбранный угол падения света на образец отличается от главного угла, где достигается наибольшая точность измерений оптических постоянных материалов.

#### Список литературы:

1. Методические указания к практическим занятиям по курсу "Поляризационные методы исследования в кристаллометаллооптике" / Сост. И.А. Шайкевич, Л.В. Поперенко. - Киев: КГУ, 1989. 32 с.
2. Свиташев К.К., Любанская Р.И. Оптическая эллипсометрия. Вып. 1. Эллипсометрия. Новосибирск, 1988. 47 с. (Препр./АН СССР, Ин-т физики полупроводников).
3. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М., 1981. 583 с.
4. Гомоюнова М.В. Электронная спектроскопия поверхности твердого тела // УФН. 1982. 136, №1, с. 105-148.
5. Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. Поляризації методи дослідження в кристалометалооптиці // Наук. праці "Науково-практичної конференції, присвяченій 100-річчю з дня народження засновника кафедри оптики професора Шишловського Олександра Андрійовича. 30 березня - 1 квітня 2005". Київ. С. 93-116.
6. Шварев К.М. Наблюдение и оценка размеров зародышей новой фазы в металлах эллипсометрическим методом // Опт. и спектроскопия. 1988. 65. №6. с. 1286-1288.
7. Антонов В.А., Пшеницын В.И. Оптические свойства поверхностей с глубокими порами // Опт. и спектроскопия. 1989. 67. №3 с. 677-684.
8. Бочко О.В., Дрозд П.И., Поперенко Л.В. и др. Влияние шероховатости поверхности на поляризационные характеристики рассеянного излучения // Тез. докл. IV Всесоюз. Конф. "Фотометрия и ее метрологическое обеспечение". М., 1986. с. 284.

9. Woolam J.A., Shyder F.G., Rost M.C. Variable angle spectroscopic ellipsometry: a nondestructive characterization technique for ultrathin and multilayer materials // *Thin Solid Films*. 1988. 166, №2, p. 317-323.
10. Основы эллипсометрии / Под ред. А.В. Ржанова. Новосибирск. 1979. 424 с.
11. Горбань Н.Я., Дрозд П.И., Поперенко Л.В. и др. Гониометрическая приставка к эллипсометру // Изв.вузов СССР. Физика. 1979. Вып.9. с. 99-100.
12. А.с. 987410 (СССР). Приставка к спектрометру для эллипсометрических измерений / Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. // Открытия, изобретения. 1983. №1, с.178.
13. Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. Спектроэллипсометр для исследования кинетики электрохимических процессов // Тез. докл. Всесоюз. симпозиума "Двойной слой и адсорбция на твердых электродах VII". Тарту, 1985. с. 100-102.
14. Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. Малогабаритный гониометр-эллипсометр и его применение для исследования шероховатой поверхности // Завод. лаб. 1985. Вып. 7. с. 35-36.
15. Топорец А.С. Оптика шероховатой поверхности. Ленинград, 1988. 191 с.
16. Шайкевич И.А. Влияние состояния поверхности на измеряемые спектральные зависимости оптических постоянных и электронные параметры металлов и сплавов: Автореф. дис. доктора физ.-мат. наук. Киев, 1988. 48 с.
17. Антропов Е.Т., Параев П.А. Рефлектометрия лазерных зеркал и высокоотражающих оптических элементов. М., 1987. 87 с.
18. Виноградов А.В., Брытов И.А., Грудский П.И. Зеркальная рентгеновская оптика. Ленинград, 1989. 463с.
19. Васильева Л.К., Дрозд П.И., Мельниченко Л.Ю., Поперенко Л.В. и др. Изменение оптических свойств приповерхностных слоев никеля и меди в условиях бомбардировки низкоэнергетическими ионами аргона // В сб. "Эллипсометрия в науке и технике" / Под ред. К.К. Свиташева, А.С. Мардекова. Новосибирск, 1987. с. 118-120.
20. Kulkarni F., Sathe S., Thube M.G. a.o. XPS and UFS study of amorphous and crystallized Ni81Cr15B4 // Appl.Surf.Sci. 1989. 37, №4. p.419-438.
21. Kolb D.M. Determination of the optical constants of solids by reflectance-ratio measurements at non-normal incidence // JOSA. 1972. 62. №4. p. 599-600.
22. Drozd P.I., Poperenko L.V., Schaikevich I.A. The spectroellipsometry of the metal surface: new methods and their application // Abs. of XXVI Intern. colloq. spectr. Sofia, 1989. v.1. p. 209.
23. Кизель В.А. Отражение света. М., 1973. 351 с.
24. Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. Оптико-поляризационный метод контроля шероховатости поверхности // Тез.докл. Всесоюзн. сем. "Новые поляризационные методы и приборы для исследования напряженно-деформированного состояния и анализа состава и молекулярной структуры вещества". Ленинград. 1988. с. 75.
25. Бочко О.В., Дрозд П.И., Поперенко Л.В. и др. О чувствительности параметров угловой эллипсометрии // Завод. лаб. 1987. Вып. 5, с. 26-28.
26. А.с. 1352201 (СССР). Способ бесконтактного контроля качества обработки поверхности оптических деталей и устройство для его осуществления / Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. // Открытия, изобретения. 1987. №42. с. 138-139.
27. А.с. 1499114 (СССР). Устройство для бесконтактного контроля качества обработки поверхностей деталей / Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. // Открытия, изобретения. 1989. №29. с. 156.
28. А.с. 1712781 (СССР). Устройство для бесконтактного контроля качества обработки поверхностей деталей / Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. // Открытия, изобретения. 1992. №6.
29. Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. Одноосьовий двоканальний рефлектометр-гоніометр // Вісн. Київ. ун-ту. Фізико-математичні науки. 1991. Вип.2. с. 67-69.
30. Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. Эллипсометр для исследования жидких объектов // Завод. лаб. 1981. 47, №1. с. 43-44.
31. Дрозд П.И., Забелин С.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. Спектроэллипсометр со сканированием углов падения // Приборы и техника эксперимента. 1984. Вып. 3. с. 181-182.
32. Ковалев В.И. Габучян В.М., Елинсон М.И., Россуканный Н.М. Эллипсометр с дискретной модуляцией состояния поляризации для экспрессных измерений в видимой и ИК области спектра // Тез. докл. 2 Всесоюз. конф. по эллипсометрии. Новосибирск, 1981. с. 120.
33. Seraphin B.O. Modulated reflectance // In book: "Optical properties of Solids" /Ed. by F. Abeles. Amsterdam, 1972, p.163-276.

34. Bermudez V.M. AIDER (angle-of-incidence derivative ellipsometry and reflectometry)-implementation and application // Surf. Science, 1980, 94, №1. p. 29-40.
35. А.с. 1176219 (СССР). Рефлектометр / Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. // Открытия, изобретения. 1985. №32. с. 174.
36. Adams Дж. Р. Контрольно-измерительные приборы для оценки технических поверхностей // В сб. "Высокоточные методы измерения'83". Госстандарт СССР - Рэнк Тейлор Хобсон, Англия. Киев, 1983. с. 1-12.
37. А.с. AI 1649263 (СССР). Устройство для бесконтактного контроля качества обработки поверхности плоских деталей / Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. // Открытия, изобретения. 1991. №18. с.9.
38. Урывский Ю.И., Чуриков А.А. Экспрессная эллипсометрия // В кн.: "Эллипсометрия: теория, методы, приложения" / Под ред. А.В. Ржанова, Л.А. Ильиной. Новосибирск, 1987. с. 106-108.
39. Sandstrom T. Differential ellipsometry // J.Phys. (Fr). 1983. Colloque. C 10, suppl.№12, 44. p. с 10-75 - с 10-78.
40. Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. Двухканальный поляризационный рефлектометр со сканированием угла падения света // Тез.докл. XV науч.-техн. конф. НПО "Квант". Киев, 1988. с. 240-241.
41. Hunderi O. Optics of rough surfaces, discontinuous films and heterogeneous materials // Surface Sci. 1980. 96. №1-3. p. 1-31.
42. Hecht H.G. The interpretation of diffuse reflectance spectra // U.S. Dep.Commer. Nat.Bur.Stand.Spec.Publ. 1977. №466 p. 57-73.
43. Андриевский В.В., Кураляк В.Ю., Романюк Н.А. и др. Влияние шероховатости на оптические постоянные материалов, полученные из спектров отражения // Поверхность. Физика, химия, механика. 1991. №3. с. 146-148.
44. Кравец В.Г., Мищенко Н.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. Анизотропия оптического поглощения в магнитных аморфных лентах // Тез.докл. XXII науч.-техн.конф. молодых исследователей. Харьков, 1991. с. 51-52.
45. Brunsting A., Dosmann A., Shaffer G. Reflectance measurements from small areas with optical multichannel analyzer // Opt.Eng. 1989. 28. №3. p. 255-260.
46. Папаев А.Ю., Иваницзе В.Н. Влияние предшествующей обработки на оптические свойства отполированных металлических поверхностей // Оптико-механическая промышленность. 1987. 33. с. 30-33.
47. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. М., 1987. 328 с.
48. Шека Е.Ф. Спектроскопия аморфных веществ с молекулярной структурой // УФН. 1990. 160, №2. с. 263-298.
49. Исхаков Р.С., Карпенко М.М., Ионов Г.В. и др. Исследование характеристик локальной анизотропии аморфных сплавов Fe-B // ФММ. 1986. 61, №1 с. 265-272.
50. Salzmann P., Grimm W., Hubert A. Anisotropics and domain structures in metallic glasses // J.Magn. and Magn. Mater. 1983. №31-34. p. 1599-1600.
51. Lin Zhao-hua, Dai Dao-sheng. A theory of internal stress field and configuration of magnetic domain in amorphous ribbons // Ibidem. p. 1540-142.
52. Kraus L., Tomas I., Kratochvilova E. a.o. Magnetic anisotropy caused by oriented surface roughness of amorphous ribbons // Phys.stat.sol. (a). 1987. 100. №1 p. 288-299.
53. Ajao J., Hamar-Thibault S., Thibault-Desseaux J. Structure observations by high-resolution electron microscopy of Ni-B melt-spun alloys (B = 30 at.%) // J.Matter.Sci.1989. 24, №10. p. 3647.
54. Lovas L., Kisdi-Koszo E. Effects of processing conditions on properties of glasses TM-M // Ibidem, 1987. 22, p.1535-1546.
55. Бенгус В.Э., Королькова Е.Б. Анизотропия прочности лент аморфного металлического сплава Co<sub>67</sub>Cr<sub>7</sub>Fe<sub>4</sub>Si<sub>8</sub>B<sub>14</sub> // Тез.докл. V Всесоюз. семинара "Структура дислокаций и механические свойства металлов и сплавов". Свердловск. 1990. с. 11-12.
56. Колобова К.М., Шабанова И.Н., Галахов В.Р. Исследование сплавов системы Fe-Cr-P-C методом рентгеновской эмиссионной спектроскопии // ФММ. 1986. 61, №2. с. 273-283.
57. Huntley D.R., Overbury S.H., Zehner D.M. a.o. Surface characterization of amorphous and crystallized Fe<sub>80</sub>B<sub>20</sub> // Appl. Surface Sci. 1986. 27, №2. p. 180-198.
58. Горицков М.М. Эллипсометрия. М., 1974. 200 с.
59. Поперенко Л.В. Оптико-поляризаційні спектральні дослідження стрічок аморфних сплавів заліз-нікель-металоїд // Вісн. Київ. ун-ту. Фізико-математичні науки. 1991. Вип. 2 с. 69-73.
60. Поносов Ю.С. Болотин Г.А. Комбинационное

- рассеяние света в монокристалле рения // ФТГ. 1979. 21, №6. с. 1615-1619.
61. Кравец В.Г., Поперенко Л.В., Якубцов О.А. Електронні та структурні особливості приповерхневого шару аморфного сплаву Fe-V-B // Вісн. Київ. ун-ту. Фізико-математичні науки. 1991. Вип. 1 с. 96-100.
62. Гусева М.Б., Дубинин Е.М. Физические основы твердотельной электроники. М., 1986. 312 с.
63. Weaver J.H., Kafka C., Lynch D.V., Koch E.E. Optical properties of metals, Int.report DESY F41 Hasylab 81/01. 1981. 299 р.
64. Wooten F. Optical properties of solids. New York. 1972, 260 р.
65. Мотулевич Г.П. Оптические свойства непереходных металлов // Труды ФИАН. 1971. 55. с. 30-150.
66. Gilberd P.W. The anomalous skin effect and the optical properties of metals // J.Phys.F:Met.Phys. 1982. 12, №8 р. 1845-1860.
67. Брандт Н.Б., Кульбачинский В.А. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. М., ФИЗМАТЛИТ, 2005. 632 с.
68. Абрикосов А.А. Основы теории металлов. М., 1987. 520 с.
69. Кириллова М.М., Номерованная Л.В. Оптические свойства d-переходных металлов с ОЛЖ решеткой // ФТГ. 1978. 20, №4. с. 984-992.
70. Носков М.М. Оптические и магнетооптические свойства металлов // Свердловск, 1983. 220 с.
71. Halevi P. The optics of metals: an introduction // Revista mexicana de fisica. 1980. 27, №1 р. 97-127.
72. Gadenne M., Lafait J. Optical properties of Ni from 0,03 to 6 eV // J.Phys. (Fr). 1986. 47, №8. р.1405-1410.
73. Kubo R. Solid State Physics. New York, 1969. 828 р.
74. Sasaki N., Itakura K., Miyatake S. Dielectric relaxation spectrum of polychlorophene in a stress relaxation process // Polym. commun. 1986. 27, №3 р. 69-71.
75. Лишин И.М., Азбелль М.Я., Каганов М.И. Электронная теория металлов. М., 1971. 415 с.
76. Cisneros G., Helman J.S., Wagner C.N.J. Dielectric function of liquid tin between 250 and 1100 0C // Phys.Rev. B. 1982. 25, №6. р. 4248-4251.
77. Цишие П., Пааш Г. Электронный газ / В кн.: "Достижения электронной теории металлов / Под ред. П.Цишие. т.1. М., 1984. с. 28-94.
78. Lundqvist S. Many-body effects in spectra of simple metals // In book: "Optical properties of solids: / Ed. by E.D. Haidemenakis. New York. 1970. p. 127-144.
79. Nolting W., Borgiet W., Dose V. a.o. Finite-temperature ferromagnetism of nickel // Phys.Rev. B. 1989. 40, №7. р. 5015-5027.
80. Hufner S., Wertheim G.K. Multielectron effects in the XPS spectra of nickel // Phys.Lett. 1975. 51A, №5. р. 299-301.
81. Bruckner M., Schufer J.H., Uhlenbuch J. Ellipsometric measurements of the optical constants of solid and molten aluminum and copper at  $\lambda = 10,6 \text{ } \mu\text{m}$  // J.Appl.Phys. 1989. 66, №33. р. 1326-1332.
82. Ведяев А.В., Котельникова О.А., Николаев М.Ю и др. Фазовые переходы и электронная структура сплавов. М., 1986. 166 с.
83. Taranko E., Taranko R., Wysokinski K.I. Optical conductivity of substitutionally disordered alloys: relaxation time concept for intraband transitions // J.Phys. C. 1980. 13. №36. р.6659-6669.
84. Валенчик Л., Ганьшина Е.А., Гущин В.С. и др. Оптические и магнетооптические свойства аморфных сплавов на основе железа // Физ.мет. и металловед. 1989. 67. №6. с. 1108-1116.
85. Frigerio J.M., Meddour A., Martin M. a.o. Correlation between optical conductivity and photoemission measurements on Pd-Y amorphous // Z. Phys.Chem. 1988. 157, №2 р. 551-556.
86. Cyrot-Lackmann F., Mayou D., Nguyen Manh D. Electronic structure of amorphous transition metal alloys // Mater. Sci. and Eng. 1988. 99. р. 245-251.
87. Zhao G.-L., Ching W.Y. Microscopic real-space approach to the theory of metallic glasses // Phys.Rev.Lett.1989. 62, №21. р. 2511-2514.
88. Tsoar N. High-frequency high-temperature conductivity binary alloys: intraband transitions in the coherent-potential approximation // Phys Rev.B. 1970. 2, №4. р. 938-947.
89. Parkins G.R., Lawrence W.E., Christy R.W. Interband optical conductivity ( $\omega, T$ ) of Cu, Ag and Au: contribution from electron-electron scattering // Phys.Rev.B. 1981. 23. №12. р. 6408-6416.
90. Velicky B., Levin K. Optical constants of disordered binary alloys: intraband transitions in the coherent-potential approximation // Phys. Rev.B. 1970. 2, №4. р.938-947.
91. Kolley E., Kolley W. Effects of thermal fluctuations on the electronic density of states in disordered binary alloys (Numerical results of CPA model calculations) //

- Phys.stat.sol.(b). 1976. 75, №2. p. 519-525.
92. Brauwers M., Brovers F. Optical relaxations time and effective mass in noble metal alloys // Ibidem. p. 721-730.
93. Hilfer R., Orbach R. Continuous time random walk approach to dynamic percolation // Chem.Phys. 1988. 128, №1. p. 275-287.
94. Jiang Q.I., Gong Chang-de. The method of the beyond CPA in a disordered layered system // Physica (B). 1988. 153, №1-3. p. 205-208.
95. Yadava R.D.S. Electrostatic discontinuous charging of a fractal cluster and variable range hopping in thin discontinuous metal films // J.Phys.Condens.Matter. 1989. 1, №39. p. 7245-7249.
96. Lacour C. Sintering and random structures // Phys.stat.sol. (b). 1979. 96, №2. p. 785-796.
97. Клингер М.И. Автолокализованные состояния электронов и дырок // Успехи физических наук. 1985. 146, 31. с. 105-142.
98. Bergmann G. Weak localization in thin films (a time-of-flight experiment with conduction electrons) // Phys. Rep. 1984. 107, №1. p. 1
99. Bohn J., Baumann F. Ellipsometric in situ measurements during deposition of amorphous Cu<sub>x</sub>Sn100-x films // Z.Phys. B: Condensed Matter. 1989. 77, №1. p.33-39.
100. Shapiro B. Self-consistent calculations of the frequency-dependent conductivity near the Anderson transition // Phys. Rev. B. 1982. 25, №6. p. 4266-4269.
101. Вонсовский С.В., Каунельсон М.И. Квантовая физика твердого тела. М., 1983. 336 с.
102. Ефетов К.Б. Андерсоновский переход металло-диэлектрик в системе металлических гранул: существование минимальной металлической проводимости и максимальной диэлектрической проницаемости // ЖЭТФ. 1985. 88, №3. с. 1032-1051.
103. Cheshnovsky O., Even V., Jortner J. Optical studies of the metal-nonmetal transition in metal-rare-gas disordered system // Phys.Rev.B. 1982. 25, №5 p. 3350-3368.
104. Gold A., Allen S.J., Wilson B.A. a.o. Frequency-dependent conductivity of a strongly disordered two-dimensional electron gas // Phys.Rev.B. 1982. 25, №6. p. 3519-3528.
105. Эфрос А.Л. Локализация электронов в неупорядоченных системах (переход Андерсона) // Успехи физических наук. 1978. 126, №1. с. 41-65.
106. Kolley E., Kolley W. Localization in the CPA frame for alloys // Z.Phys.B: Condensed Matter. 1986. 65, №1. p. 7-14.
107. Sadacata I. The conductivity of strongly disordered systems // J.Phys.Soc.Jap. 1985. 54, №2. p. 736-739.
108. Hillerbrands B., Gunterdt G., Pott R. a.o. Optical conductivity fo GePd3, YPd3 and PrPd3 // Solid State Communications. 1982. 43, №12. p. 891-894.
109. Kaveh M., Mott N.E. Universal dependences of the conductivity of metallic disordered systems on temperature, magnetic fields and frequency // J.Phys.C.:Solid St.Phys. 1982. 15. №4. p. L707-L716.
110. Немошканенко В.В., Романова А.В., Ильинский А.Г. и др. Аморфные металлические сплавы. Киев, 1987. 248 с.
111. Scoles K.J., Christy R.W. Optical conductivity of Mn // J.Appl.Phys. 1982. 53, №12. p. 8999-9001.
112. Mott H., Дэвис Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М., 1974. 472 с.
113. Zallen R. The physics of amorphous solids. New York. 1983. 304 p.
114. Бетгер Х. Принципы динамической теории решетки. М., 1986. 392 с.
115. Кириллова М. М., Номерованная Л.В. Особенности инфракрасного поглощения в хроме и его сплавах с железом // ФММ. 1975. 40, №5, с. 983-992.
116. Номерованная Л.В., Кириллова М.М., Махнев А.А. и др. Оптические свойства металлооксидных сверхпроводников в диапазоне спектра E = 0,03-10 эВ // ФММ. 1989. 67, №6. с. 1124-1127.
117. Raether H. Excitation of plasmons and interband transitions by electrons. Berlin. 1980. 196 p.
118. Ehrenreich H. Electromagnetic transport in solids: optical properties and plasma effects // In: "The optical properties of solids" /Ed. by J.Tauc. Varenna. 1965. p. 106-154.
119. Немошканенко В.В., Антонов В.Н. Методы вычислительной физики в теории твердого тела. Зонная теория металлов. Киев, 1985. 408 с.
120. Beattie J.R. Optical constants of metals in the infrared-Experimental methods // Phil.Mag. 1955. 46, №373. p. 235-245.
121. Шайкевич И.А., Дроzd П.И., Поперенко Л.В., Пророк В.В. Поляризационные устройства для исследования оптических свойств поверхности // Судостроительная промышленность, сер. Радиолокация. 1990. Вып.26. с. 100-109.
122. А.с. 1575664 AI (СССР). Устройство для анализа состояния поляризации света / П.И. Дроzd, Л.В.

- Поперенко, В.В. Пророк, И.А. Шайкевич.* 1990.
123. Мардежов А.С., Свиташиев К.К., Семененко А.И. и др. К вопросу определения оптических постоянных материалов методом эллипсометрии в далекой ИК области спектра // Микроэлектроника. 1977. 6, №5. с. 427-437.
124. Горбань Н.Я., Поперенко Л.В. Оптимизированный вариант метода Битти-Конна в изучении особенностей оптических свойств никеля в видимой области // Журн.прикл.спектроскопии. 1980. 33, №4. с. 706-711.
125. Дрозд П.И., Марусан И.А., Поперенко Л.В. и др. Визуализатор эллипсометрических параметров // Там же. 1984. 40, №5. с. 865-869.
126. Belyi M.U. Poperenko L.V., Shaikevich I.A., Karpusha V.D. The infrared absorption features of the amorphous Fe-B alloys contained 3d-transition element // Collected abs.of International Symp. MASHTEC'90. Dresden. 1990. vol.2. p.390.
127. Пустов Ю.А., Балдохин Ю.В., Колотыркин П.Я., Овчаров В.П. и др. О термической стабильности амфного сплава Fe-Cr-B // ФММ. 1988. 65, №1. с. 159-167.
128. Шайкевич И.А., Дрозд П.И., Мирончук А.Н., Поперенко Л.В. Оптические свойства никеля с деформированным поверхностным слоем, бомбардированным низкоэнергетическими ионами аргона // Журн.прикл. спектроскопии. 1985. 43, №5. с. 857-859.
129. Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. Способ юстировки эллипсометра и критерий ее точности // Вестн. Киев. ун-та. Физика. 1981. №22, с. 32-35.
130. Поперенко Л.В., Філатов Ю.Д. Технологія обробки оптичних поверхонь. - К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2004. - 166 с.
131. Поперенко Л.В. Оптичні властивості опромінених металевих дзеркал: Монографія. - К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2005. - 174 с.
132. Поперенко Л.В., Кисель В.А., Баянкин В.Я. "Спектроэллипсометрия аморфных лент сплава никель-фосфор с использованием ионной бомбардировки поверхности" // Тез. докл. Всесоюз. сем. "Ультрадисперсные и неупорядоченные системы". Пермь. 1991. С. 43-45.
133. Поперенко Л.В., Кравец В.Г. Оптические свойства аморфной структуры лент быстрозакаленных металлических сплавов // Оптика и спектроскопия. 1999. т.86, №4, с. 621-627.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЛЕЙКОСАПФИРА

С.А. ГЕРАСИМОВ - кандидат химических наук; Н.М. ДМИТРИЕВА, Т.А. КОСАРЕВА

Открытое акционерное общество "Научно-производственное объединение «Оптика», Москва

E-mail: teopt @ prooptica.ru

*Рассмотрено влияние технологических параметров и ориентации относительно оптической оси обрабатываемой поверхности на показатели работоспособности алмазного и полировального инструментов при механической обработке деталей из лейкосапфира. Показано, что разработанные в «ОАО «НПО «Оптика» инструменты могут быть использованы в технологических процессах механической обработки изделий из лейкосапфира.*

**Ключевые слова:** механическая обработка, оптическая деталь, алмазный инструмент, металлическая связка, каучуковая связка, показатели работоспособности, лейкосапфир.

Уникальные свойства лейкосапфира ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) обеспечили его широкое применение в целом ряде отраслей науки и техники, и в первую очередь, в оптико-электронных системах изделий специального назначения, микроэлектронике, лазерной технике [1]. Однако, удовлетворение возрастающих потребностей в деталях из лейкосапфира сдерживается низкоПроизводительной технологией их механической обработки.

Традиционные алмазные инструменты, используемые в обработке оптического стекла, не обеспечивают стабильности съема припуска в единичном цикле при шлифовании лейкосапфира, что объясняется его высокой твердостью. Более того, лейкосапфир относится к анизотропным кристаллам, в которых физико-механические свойства, в том числе поверхностная твердость, механическая прочность и хрупкость и, соответственно, обрабатываемость существенно отличаются в различных кристаллографических на-

правлениях. При этом производительность и стабильность процесса шлифования, шероховатость и глубина нарушенного слоя шлифованной поверхности также зависят от ее ориентации относительно оптической оси (плоскости С, А и Р)[2].

Особенности механической обработки лейкосапфира, а также его невысокая доля в общем объеме производства ОД, по-видимому, и определили значительное отставание технологии его механической обработки. Проведенные в ОАО "НПО "Оптика" исследования показали, что кроме высокой твердости, на обрабатываемость поверхностей из лейкосапфира алмазным инструментом решающее влияние оказывают такие факторы, как природа и состав связки, концентрация и размер алмазного порошка, технологические условия обработки и многое другое. Кроме того, установлено, что при контактном взаимодействии алмазного зерна с корундовой поверхностью происходит сильное адгезионное взаимодействие, которое выражается в следующем:

- при использовании шлифпорошков (размер алмазных зерен более 40 мкм) происходит быстрый износ алмазного зерна с образованием площадок износа и, как следствие, потеря решеткой способности инструмента (засаливание);
- при использовании микропорошков, адгезионные силы способствуют вырыву алмаза из связки, что также сказывается на стабильности шлифования. В этом случае, на поверхности обрабатываемой детали появляются царапины, образованные выпавшими из связки алмазами;
- при адгезионном взаимодействии алмаза с лейкосапфиром может происходить вырыв не-

которых объемов поверхностных слоев с образованием каверн и точечных углублений на поверхности обрабатываемой детали;

Площадки износа шлифпорошков алмаза и "дырки" от алмазных зерен микропорошков на поверхности инструментов отчетливо видны под микроскопом.

Исходя из перечисленного, при выборе связки алмазного инструмента для механической обработки лейкосапфира учитывалось следующее: связка должна обладать высокой прочностью, высоким удержанием алмазного зерна, а также повышенной хрупкостью, для того, чтобы рабочий слой инструмента непрерывно обновлялся в процессе работы с обнажением новых алмазных зерен. Концентрация алмазов в инструменте должна быть низкой для увеличения удельной нагрузки на зерно и предотвращения большого количества площадок износа, которые приводят к эффекту подшипника скольжения и потере режущей способности инструмента.

Алмазные инструменты на металлических связках специального состава (обладающие повышенной хрупкостью) и содержащие шлифпорошки алмазов способны обеспечивать достаточно высокий съем материала [2], однако стабильность шлифования остается низкой. Инструменты на металлических связках содержащих микропорошки мгновенно "засаливаются", вероятно, вследствие плохого удержания алмазного зерна. При испытании алмазных инструментов на основе эпоксидных композиций [3], работающих совместно с абразивосодержащими

элементами для непрерывного вскрытия инструмента было отмечено, что при достаточно высокой стабильности работы такого инструмента, он характеризуется низкой производительностью и высоким износом. Проведенные исследования показали, что наиболее приемлемыми связками для шлифования деталей из лейкосапфира являются связки на основе каучуковых композиций, свойства которых можно изменять в широких пределах путем введения большого количества наполнителей различной природы [4]. Такие инструменты обеспечивают высокую стабильность шлифования при невысоком износе и низких значениях шероховатости обработанной поверхности.

При определении оптимальных условий шлифования было рассмотрено влияние технологических параметров станочного оборудования (частоты вращения и усилия прижима инструмента) на производительность шлифования и шероховатость обработанной поверхности. Плоские образцы лейкосапфира диаметром 75 мм, ориентированные по плоскостям С, А и R, обрабатывались на станках ШП-50А при следующих режимах:

- усилие прижима инструмента, Н (кгс) ..... 40; 90; 150 (4; 9; 15)
- частота вращения шпинделя инструмента, с<sup>-1</sup>(об/мин) ... 5,83; 11,67; 20 (350; 700; 1200)

Шлифование деталей производилось алмазным таблеточным инструментом на каучуковой связке. Зернистость инструмента при испытаниях составляла 50/40, количество элементов диаметром 14 мм, наклеенных на планшайбу Ø100

*Таблица 1.*

*Показатели работоспособности алмазного инструмента при шлифовании лейкосапфира (плоскость С) в зависимости от параметров настройки станка*

Частота вращения шпинделя инструмента с <sup>-1</sup> (об/мин)	Показатели работоспособности*	Усилие прижима инструмента, Н		
		40	90	150
5,83 (350)	L	11	23	28
	Ra	0,11	0,13	0,15
11,67 (700)	L	7	15	20
	Ra	0,08	0,06	0,06
20 (1200)	L	9	18	24
	Ra	0,06	0,04	0,04

*Таблица 2.*  
*Показатели работоспособности алмазного инструмента при шлифовании лейкосапфира (плоскость А) в зависимости от параметров настройки станка*

Частота вращения шпинделя инструмента $\text{с}^{-1}$ (об/мин)	Показатели работоспособности*	Усилие прижима инструмента, Н		
		40	90	150
5,83 (350)	L	28	57	84
	Ra	0,20	0,22	0,25
11,67 (700)	L	46	60	90
	Ra	0,13	0,15	0,18
20 (1200)	L	65	77	109
	Ra	0,22	0,17	0,16

*Таблица 3.*  
*Показатели работоспособности алмазного инструмента при шлифовании лейкосапфира (плоскость R) в зависимости от параметров настройки станка*

Частота вращения шпинделя инструмента $\text{с}^{-1}$ (об/мин)	Показатели работоспособности*	Усилие прижима инструмента, Н		
		40	90	150
5,83 (350)	L	33	99	142
	Ra	0,41	0,52	0,68
11,67 (700)	L	51	102	353
	Ra	0,30	0,36	0,65
20 (1200)	L	157	287	471
	Ra	0,35	0,46	0,57

\* L - производительность шлифования, мкм/5мин;  
Ra - шероховатость обработанной поверхности, мкм

мм - 12 шт. (рис. 1). В качестве СОЖ использовался 0,03% раствор фосфората.

Значения производительности шлифования и шероховатости поверхностей, ориентированных по различным плоскостям, приведены в таблицах 1,2,3.

Из полученных результатов, в соответствии с таблицей 1 следует, что при обработке плоскости С лейкосапфира производительность шлифования увеличивается с ростом прилагаемой нагрузки. Частота вращения инструмента оказывает неоднозначное влияние. Увеличение частоты вращения шпинделя инструмента приводит к снижению производительности шлифования, причем она минимальна при среднем значении числа оборотов шпинделя - 700 об/мин.



*Рисунок 1*

Наблюдаемое снижение производительности определяется заметной потерей режущей способности инструмента в цикле шлифования и, очевидно, связано с повышением склонности к "засаливанию" рабочей поверхности инструмента при высоких значениях линейных скоростей относительно обрабатываемой поверхности. На склонность инструмента к потере режущей способности при больших значениях частоты вращения инструмента указывают также полученные данные об изменении шероховатости обработанной поверхности. Значения  $R_a$  заметно уменьшаются с ростом частоты вращения инструмента. Уменьшение величины шероховатости поверхности имеет место и с ростом усилия прижима инструмента при частотах вращения инструмента 700 и 1200 об/мин.

Обрабатываемость лейкосапфира по плоскости A и R (таблицы 2, 3) в большей степени зависит от параметров настройки станка. Увеличение усилия прижима, как и частоты вращения инструмента, приводит к резкому, в двадцать раз, росту производительности шлифования. Шероховатость обработанной поверхности в 4 - 10 раз превышает значения  $R_a$  для шлифованной поверхности по плоскости C, но в меньшей степени зависит от усилия прижима и частоты вращения инструмента. Производительность шлифования, также как и значения шероховатости при обработке поверхности по оси R значительно выше, чем поверхностей с направлением ориентации A и характеризуются более грубой поверхностью и большей глубиной царапин.

При использовании алмазных инструментов на каучуковых связках было отмечено, что при шлифовании плоскостей лейкосапфира, перпендикулярных оси роста кристалла (C), или срезов под углом к оси роста (R) на обработанной поверхности наблюдаются дефекты - царапины и выбоины. Причем, царапины имеют хрупкий характер с трещинами, направленными в стороны от царапин. Царапины наблюдаются и при обработке инструментами, содержащими микропорошки алмазов - 20/14 - 2/1.

При обработке плоскостей лейкосапфира, ориентированных вдоль оси роста (A) царапины, образованные инструментами, содержащими шлифпорошки, имеют менее выраженный хруп-

кий характер, а при шлифовании инструментами с микропорошками алмазов, на обработанной поверхности видимые дефекты практически отсутствуют.

Завершающая стадия обработки деталей из лейкосапфира состояла из двух этапов:

- предполировка в два перехода алмазами марки RDDM зернистостью 4÷8 и 2÷4;

- окончательная полировка алмазами RDDM 0,25÷0,5.

Алмазный материал марки RDDM имеет поликристаллическую структуру, каждая частица состоит из большого количества наноразмерных монокристаллических блоков с высокой плотностью дислокаций. В процессе применения при разрушении частиц режущие кромки воспроизводятся, что обеспечивает сочетание высокой абразивной способности и чистоты обрабатываемой поверхности в широком диапазоне твердости обрабатываемого материала.

Полирование осуществлялось инструментом диаметром 200 мм, состоящим из металлического корпуса и наклеенной на него специально разработанной полировальной подложкой из металлонаполненной каучуковой композиции (рис. 2), а также полировальником из модифицированной пекоканифольной смолы. Такой полировальник может быть использован в тех случаях, когда к деталям из лейкосапфира предъявляются повышенные требования к геометрической точности формы и чистоте поверхности.

Полирование производилось на станке ЭПД-

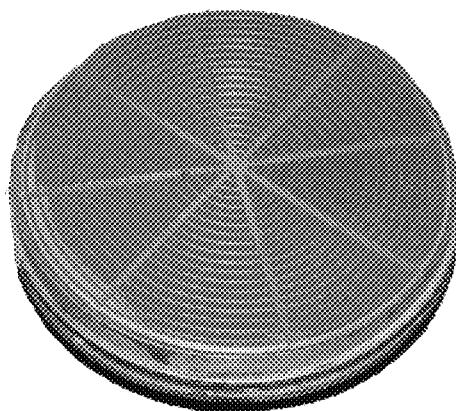


Рисунок 2

Таблица 4.

*Производительность полирования лейкосапфира и шероховатость полученной поверхности Ra в зависимости от зернистости алмазного порошка и ориентации плоскости (C, A и R) обрабатываемой поверхности*

Полировальны й материал	Зернистост ь алмаза, мкм	Производительность полирования, кг/30мин·10 <sup>-6</sup>			Шероховатость обработанной поверхности, Ra, мкм			Класс чистоты
		C	A	R	C	A	R	
Каучуковый поли- ровальный материал	RDDM 4-8	21,1	28,6	30,2	0,054	0,018	0,022	
	RDDM 2-4	15,3	17,8	20,8	0,028	0,0091	0,0098	
	RDDM 0,25-0,5	3,8	6,4	7,1	0,0075	0,0054	0,0062	Р IV
Модифициро- ванная пекоканифоль- ная смола	RDDM 4-8	18,6	20, 5	23,5	0,029	0,010	0,0103	
	RDDM 2-4	12,5	13,7	15,7	0,0110	0,0087	0,0096	
	RDDM 0,25-0,5	0,9	1,4	1,8	0,0063	0,0038	0,0040	Р III

350 со следующими параметрами настройки:  
 скорость вращения детали, об/мин ..... 100;  
 число двойных ходов ..... 20;  
 удельное давление на деталь, г/см<sup>2</sup> ..... 100;  
 Результаты испытаний приведены в таблице 4.  
 Проведенные испытания показали, что каучуковый полировальный материал, как наиболее производительный, целесообразно применять на первых переходах полирования после тонкого шлифования. Полировальник из модифицированной пекоканифольной смолы - на операции окончательного полирования.

В результате выполненных работ получены следующие результаты:

- разработан алмазный инструмент на основе композиционной каучуковой связки для тонкого шлифования деталей из лейкосапфира, имеющий высокую производительность и стабильность шлифования и позволяющий существенно сократить продолжительность полирования;
- исследовано влияние технологических режимов обработки и ориентации относительно оптической оси обрабатываемой поверхности на показатели работоспособности исследованных инструментов;

- специально разработанный для полирования лейкосапфира полировальник на основе металлонаполненной каучуковой композиции позволяет, во-первых, на первом этапе полирования (после шлифования) получать бездефектные поверхности в течение 30 - 60 минут и, во-вторых, при финишной полировке получать поверхности со следующими значениями шероховатости:

- для плоскости С - Ra=0,0075 мкм;
- для плоскости А - Ra=0,0054 мкм;
- для плоскости R Ra =0,0062 мкм;

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку алмазных инструментов для супертонкого шлифования деталей из лейкосапфира, обладающих высокой стабильностью работы и позволяющих получать бездефектные поверхности с минимальными значениями шероховатости (Ra < 0,1 мкм). Также необходимо проведение работ по модификации металлонаполненных каучуковых композиций с целью получения полировального материала для финишного полирования деталей из лейкосапфира с высокими значениями точности формы и класса чистоты.

*Список литературы:*

1. Довгань М.Е., Зайцева В.И., Карпенко М.Т. Монокристаллы и техника. //1972, №6 с. 169-174.
2. Альтшуллер В.М., Герасимов С.А., Терентьева О.Ю. Алмазный инструмент на каучуковой связке для тонкого шлифования оптического стекла. // Оптический журнал, 1994, №6, 53-55 с.
3. Кондратенко В.С. Состав для алмазного инструмента // Патент России №2169658. 2000 г.
4. Альтшуллер В.М., Герасимов С.А., Духовской О.И., Подобрянский А.В. Состав алмазного инструмента // Патент России №2356852. 2007 г.

# НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ОПТИЧЕСКИХ НАУК

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ ЛАНДШАФТА

МАРКОВ А.В., ГРИГОРЬЕВА О.В., ЖУКОВ Д.В., БРОВКИНА О.В.

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

E-mail: markov\_av69@mail.ru, alenka12003@mail.ru, spb\_pilligrim@mail.ru, olgabrovkina@mail.ru

*Создание гиперспектральной (ГС) аппаратуры наблюдения за поверхностью Земли послужило толчком разработки нового программно-алгоритмического обеспечения, позволяющего эффективно обрабатывать поступающий массив данных. В статье описаны основы решения тематической задачи распознавания природно-техногенных объектов по данным ГС аэрокосмической съемки. Методика решения задач включает учет особенностей используемой аппаратуры, состава фона, на котором производится распознавание объекта, свойства формирования полей уходящего излучения самим объектом и критерии принятия решений для отнесения элемента ГС параллелепипеда к объекту в информативной области спектральных признаков. Показаны примеры прикладного использования рассмотренной методики и необходимость разработки оригинального подхода для решения каждой тематической задачи.*

**Ключевые слова:** гиперспектральная съемка, методы классификации, информативные признаки, база данных спектральных характеристик.

При использовании ГС съемок поверхности Земли формируется многомерное спектральное пространство, которое за счет высокого спектрального разрешения позволяет выявить наиболее характерные детали объектов на снимках.

Однако, если для многоспектральных систем решение задачи ограничено максимум восьмью каналами, то для ГС данных задача становится оптимизационной. Как показала практика обработки ГС данных, максимальная эффективность идентификации объектов достигается путем оптимизации следующих основных параметров:

$$\mathcal{E} = f(\Delta\lambda, n_\lambda, M, I, L),$$

где  $\Delta\lambda$  - информативные спектральные интервалы, в которых объект в наибольшей степени выделяется на фоне;  $n_\lambda$  - количество спектральных каналов, используемых в классификации;  $M$  - критерии принятия решения в методе классификации;  $I$  - информативные признаки идентификации объекта;  $L$  - пространственное разрешение ГС данных.

Эффективность обработки, в первую очередь, существенно зависит от качественной спектральной и радиометрической калибровки ГС приборов, а также от первичной подготовки, связанной с учетом атмосферных искажений и калибровкой данных в коэффициенты яркости или отражения. Поэтому было предусмотрено два вида атмосферной коррекции ГС данных: по наземной тестовой мишени обстановке и с помощью физических моделей переноса излучения в атмосфере, используемых в пакете Modtran.

Учитывая указанные параметры эффективнос-

ти обработки, был предложен общий методический подход к решению тематических задач мониторинга по данным ГС съемки в диапазоне 0,4...2,5 мкм низкого (30 м) и высокого (2 м) пространственного разрешения. Апробация изложенной методики проводилась с использованием результатов съемки опытными образцами авиационных видеоспектрометра "Фрегат" разработки СПбГИТМО и аналогичного прибора НПО "Лептон", а также материалов космической ГС съемки КА EO-1 Hyperion.

На рис. 1 представлена структурная схема обработки изображений гиперспектрального параллелепипеда, справедливая для решения любой тематической задачи и реализованная в специальном программном обеспечении (ПО). Как видно из схемы, тематическая обработка ГС данных имеет итеративный характер. Каждая итерация направлена на уменьшение зоны интереса, в пределах которой будет производиться сегментация пикселей изображения по какому-либо из алгоритмов классификации. Идентификация классов производится после каждой итерации. Для этого в ПО реализованы методы выбора наборов информативных признаков, а также фильтрации элементов изображения по определенному для каждой тематической задачи правилу. В результате такой фильтрации пиксели либо исключаются из дальнейшего анализа, и тогда происходит уменьшение зоны интереса, либо выделяются как объекты поиска, и тогда

цикл тематической обработки завершается.

Таким образом, во всех алгоритмах предусмотрено аналитическое описание образов посредством набора признаков I при классификации, выбор решающего правила классификации M и фильтрация неинформативных объектов.

**В качестве информативных признаков** используются как непосредственные значения яркостей в спектральных каналах, так и производные признаки, такие как вегетационные индексы, главные компоненты и другие комбинации исходных значений яркости. Последние применяются как на начальном этапе алгоритма обработки в качестве индексного изображения при кластеризации (классификации) ГС параллелепипеда, так и на этапе окончательной идентификации объекта ландшафта.

Выбор набора информативных признаков или спектральных каналов, участвующих в классификации определялся типом обнаруживаемого объекта, составом фона (например, виды почвенно-растительных формаций), характерным для района исследования и фенологическим периодом наблюдения. В ПО реализован следующий набор признаков:

- статистические характеристики (математическое ожидание значений яркости в спектральных каналах, среднеквадратическое отклонение, модуль вектора яркости в спектральном пространстве, спектральная корреляция);

- узкоспектральные индексы, основанные на



Рисунок 1.  
Обобщенная структура обработки ГС данных

смещений спектров яркости объектов на несколько нанометров и изменении уровня поглощения в отдельных спектральных зонах;

- признаки, описывающие форму спектров яркости объекта;

- пространственно-морфометрические признаки (энтропия, показатели автокорреляционной функции пространственного профиля яркости, пространственная фильтрация импульсов яркости), используемые в основном на последних этапах для исключения нетипичных объектов и выделения неоднородных по структуре объектов в один полигон при высоком пространственном разрешении данных.

Наиболее перспективным для ГС данных является использование устойчивых узкоспектральных индексов ( $NDVI_{0.705}$ , PSRI, WBI и др.), а также корреляционных мер сходства спектральных характеристик элементов изображения и эталонов, содержащихся в специальной базе данных спектральных характеристик. Например, появление в приповерхностном слое воды оптически активных пленок и примесей фиксируется по изменению спектрального состава уходящего излучения водной толщи. При этом для каждой примеси подобные изменения регистрируются на разных участках длин волн, которые в свою очередь могут быть достаточно узкими (до 5...10 нм). Наблюдаемые изменения были положены в основу расчета специальных индексов, отра-

жающих зависимость количественных параметров состояния объектов (концентрации фитопланктона, взвеси, уровня загрязнения нефтепродуктами и т.п.) от яркости в отдельных интервалах спектра или их совокупности:  
 $I_{oil} = r_{400 \dots 405} / r_{550 \dots 580}$ ;  $R = \lg(r_{510} / r_{555})$ ;  
 $r_{cp.BB} = a \cdot \ln(C_{bb}) - b$  [4]. Следовательно, при анализе неоднородностей водной поверхности рекомендуется регистрировать излучение с достаточным высоким спектральным разрешением, что обеспечивает ГС приборы (рис. 2).

Устойчивость таких производных признаков определяется шириной и границами спектральных каналов, в пределах которых происходит регистрация анализируемой величины яркости, а также пространственным разрешением ГС данных в связи с образованием смесей спектральных классов в одном пикселе и изменения структуры изображения объекта при уменьшении разрешения на местности. В этом случае предусмотрено моделирование эталонных значений признаков по БД спектральных характеристик объектов, учитывая спектральные характеристики прибора и условия наблюдения.

Для реализации функции анализа сходства спектральных характеристик элементов изображения и эталонных спектров из БД разработан метод, основанный на следующих критериях, учитывающих форму спектров яркости и коэффициенты вариации значений сигналов. В мето-

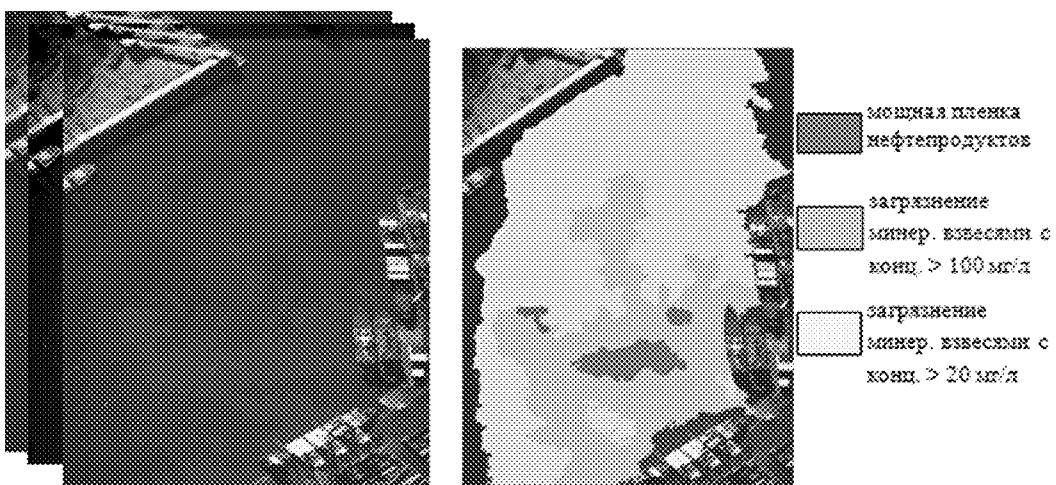


Рисунок 2.

Результат использования узкоспектральных признаков, полученных по данным ГС НПО "Лептон",  
для описания состояния акватории

де первоначально осуществляется определение кластера, спектр которого наиболее близок к эталонному с использованием различных мер расстояния (Евклидово расстояние, расстояние Махалонобиса и другие). Далее используются критерии сходимости спектра яркости выборки и эталона на основе следующих оценок:

- 1) коэффициент вариации значений яркости в спектральных каналах;
- 2) коэффициент корреляции эталонного спектра  $j$ , полученного из спектральной библиотеки, и спектра  $k$ -го класса (или его фрагмента):

$$R = \mu_k^N \mu_j / (\|\mu_k\| \cdot \|\mu_j\|), \text{ где } \mu - n\text{-мерный}$$

вектор средних значений яркости класса и яркости эталона;

- 3) показатели автокорреляционной функции сигнатур.

При этом коэффициент корреляции использовался только в совокупности с другими признаками идентификации, поскольку он позволяет оценить только характер распределения яркости по спектру и не учитывает величину модуля спектральной яркости спектра.

В итоге осуществляется оценка принадлежности фрагмента кластера (или класса) к искомому объекту по частоте выполнения условий сходимости в пределах всего спектра:

$$\rho = v_{M_r} 0,95/n \text{ (рис. 3).}$$

При использовании в качестве набора признаков исходных значений спектральной яркости, в первую очередь, осуществляется определение наиболее информативных спектральных каналов,

участвующих в сегментации сцены. Подобная оптимизация каналов ГС наблюдений позволила минимизировать ошибки идентификации объектов при использовании стандартных методов классификации, распознавать объекты на любом встречающемся в районе съемки фоне и устранить корреляцию между каналами, минимизировав затраты машинного времени на обработку.

В качестве критериев выбора наиболее информативной комбинации спектральных каналов использовались следующие подходы:

- сравнительный анализ яркостного контраста искомого объекта и фона с пороговыми значениями;
- метод, основанный на оценке разделения плотности распределения яркостей объекта и фонов на обучающих данных (за исключением, когда признаком является показатель формы спектра);
- исключение сильно коррелированных спектральных каналов.

В качестве мер разделимости может быть использован широкий ряд показателей: Евклидова, угловая, городской квартал, Махalanобиса, дивергенция, Бхаттачария, Джейфриса-Матусита [5]. В наибольшей степени учитывают статистические особенности распределения яркости объектов такие меры, как дивергенция и Джейфриса-Матусита:

$$J_{ij} = \left[ 2(1 - e^{-\infty}) \right]^{1/2},$$

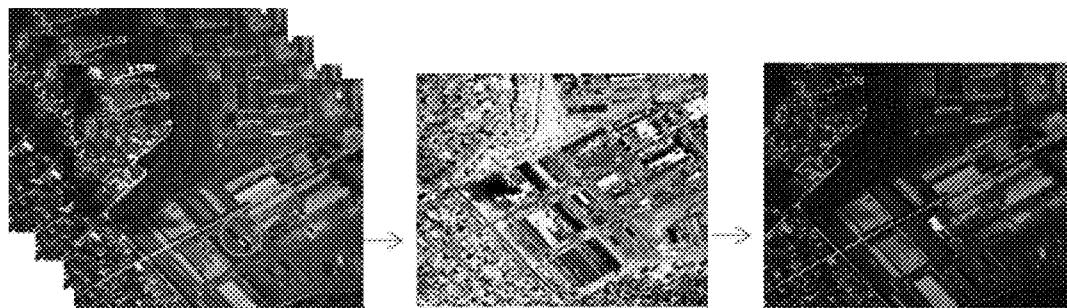


Рисунок 3.

*Метод идентификации объектов ландшафта по критерию сходимости спектра КСЯ с эталонными из БД*

$$\propto = \frac{1}{8} (U_i - U_j)^T \left( \frac{(U_i + U_j)}{2} \right)^{-1} (U_i - U_j) + \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{(U_i + U_j)}{2(|\Sigma_i| |\Sigma_j|)^{1/2}} \right]$$

$U$  - средние значения яркости  $i$  и  $j$  объектов,  
 $\Sigma$  - ковариационная матрица  $i$  и  $j$  объектов.

На рис. 4 приведены примеры плотности распределения яркостей, построенные в каналах с максимумами 455 и 663 нм для разных участков лесного покрова, а в таблице 1 представлены значения мер расстояний между парой распределений этих же объектов в пространстве признаков. Анализ всех возможных пар распределений и их комбинаций показал, что для оценки состояния лесной растительности наиболее эффективно использование спектральных каналов 0,47-0,55, 0,58-0,63, 0,54-0,56, 0,64-0,68 и 0,7-0,8 мкм. Эти выводы согласуются с физическими закономерностями формирования излучения в этих диапазонах спектра. Для растительного полога интервал с максимумом 0,65 мкм характеризует относительное содержание хлорофилла, а диапазон 0,7-0,8 мкм отражает слоистость структуры лесного полога. Аналогичные исследования были проведены и для других объектов, поиск которых осуществлялся по ГС данным. Так для выделения в водных объектах участков распространения макрофитов наиболее эффективно использование спектрального интервала с максимумом в районе 0,48 мкм, для которого характерно минимальное ослабление различными примесями (кроме феопигментов) и интервала 0,70-0,74 мкм, кото-

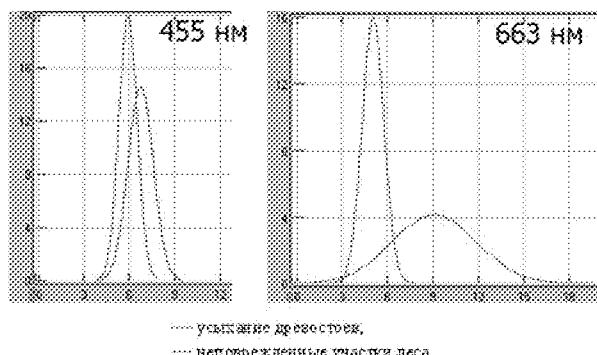


Рисунок 4.  
 Плотности распределения яркости поврежденных  
 и неповрежденных участков лесов

рый соответствует максимуму отражения высшей водной растительности.

При разработке алгоритмов обработки ГС данных помимо оценки мер разделимости проводился анализ корреляции между значениями яркости в разных спектральных каналах, в результате которого часть каналов исключалась из дальнейшей классификации:

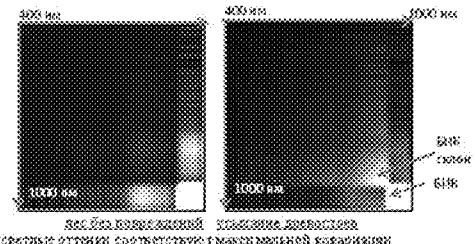
$$k_{B_{\lambda_1, \lambda_2}} = K_{\lambda_1, \lambda_2} / \sigma_{\lambda_1} \sigma_{\lambda_2}$$

$\sigma_{\lambda}$ , где - стандартное отклонение гистограммы яркости,  $K$  - ковариация для каналов  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Такая корреляция возникает из-за спектральных свойств самого объекта, а также по причине высокого уровня затенения при съемке местности при низких высотах Солнца в гористой или застроенной местности. Наибольшую корреляцию спектральных свойств можно наблюдать у растительности (рис. 5) в ближней инфракрас-

Таблица 1.

Меры расстояний между парой распределений (см. рис. 4) в пространстве спектральных каналов  
 (серым выделены столбцы длин волн, расположенные в порядке убывания расстояний)

Бхаттачария		Преобразованная дивергенция		Дивергенция		Среднее Бхаттачария	
750	1,07	675	1956	675	31	750	0,88
675	0,92	663	1895	663	24	663	0,5
663	0,87	750	1763	750	17	675	0,5
496	0,42	496	988	496	5	496	0,29
610	0,36	610	915	610	5	610	0,2
510	0,34	510	862	510	5	510	0,19
709	0,29	709	753	709	4	455	0,16
455	0,19	455	372	455	2	709	0,13
556	0,03	556	52	556	0	556	0,01
567	0,01	567	10	567	0	567	0



*Рисунок 5.*

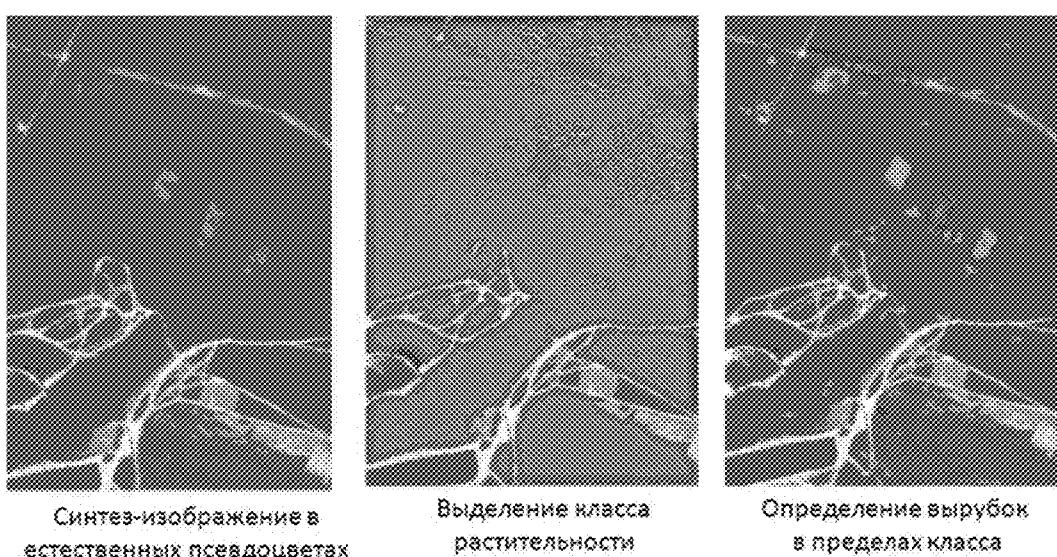
*Изображения матриц ковариации для поврежденных и незатронутых нарушениями участков леса. Отмечено, что высокие значения ковариации у поврежденных древостоев наблюдаются не только в БИК области, но и в области БИК склона*

ной области. Выделение каналов, для которых наблюдалась наименьшая корреляция, осуществлялось визуально непосредственно по матрице коэффициентов корреляции между яркостями объекта в спектральных каналах, а также, используя преобразования фрагментов анализируемой сцены методом главных компонент [5], позволяющим определить весовой коэффициент каждого канала  $j$  (элементы собственного вектора ковариационной матрицы) при расчете наиболее информативных главных компонент  $i$ .

Исключение избыточных каналов посредством анализа корреляции проводилось только в комплексе с оценкой мер разделности между всеми парами объект/фон. Это связано с тем, что при исключении каналов с высокой корреляцией

при решении некоторых тематических задач можно было исключить спектральные интервалы, в пределах которых наблюдаются максимальные различия между обнаруживаемым объектом и фоном, что привело бы к ошибке классификации. При этом в некоторых случаях, например, при анализе нефтезагрязненных земель, величина корреляции может выступать в качестве достоверного признака обнаружения пораженных углеводородами участков местности [6].

Для определения наилучшей комбинации признаков меры разделности рассчитывались для всех возможных пар классов и для всех комбинаций признаков. Однако зачастую необходимо было обнаружить объект среди разнородного ландшафта, в результате чего информативным оказывался чуть ли не весь спектральный диапазон, что затрудняло обработку. В этом случае использовался следующий подход: сначала анализировались только те спектральные каналы, где наблюдаются максимальные различия; далее этап классификации разбивается на два, на каждом из которых используются различные интервалы спектра для последовательного исключения элементов фона. Например, проведение простой сегментации изображений на класс растительного покрова и других природных и антропогенных объектов по производному спектральному индексу с последующей классифика-



*Рисунок 6.  
Сегментация изображения на два класса для регистрации вырубок*

цией только этих фрагментов позволяет исключить влияние достаточно высоких значений метрических показателей в пространстве признаков на сегментацию остальных кластеров (рис. 6).

В алгоритмах используемая при выборе информативных спектральных признаков мера разделимости согласуется с критериями принятия решения отнесения элемента изображения к классу в методе классификации. Например, при выборе расстояния Махalanобиса рекомендуется использовать гауссов алгоритм максимального правдоподобия.

**В качестве основных методов кластеризации и классификации** в разработанных алгоритмах используются методы Isodata, максимального правдоподобия Maxlike, спектральной угловой корреляции SAM, метод нечетких множеств Fuzzy и др.

При этом для каждой тематической задачи был определен свой наиболее оптимальный метод. Общими входными параметрами для всех алгоритмов, реализующих методы классификации являются: зона интереса, в пределах которой будет работать алгоритм, и информативные каналы, учитываемые при классификации.

Так при использовании алгоритма Isodata были выбраны каналы, где между спектральными сигнатурами объекта и фона не наблюдается инверсии, поскольку в качестве критерия принадлежности пикселя к кластеру используется сумма квадратов разностей (исследования водных объектов). Для анализа состояния растительного покрова, представляющего собой сложные комплексы объектов с различными спектральными отражательными свойствами на изображениях с пространственным разрешением порядка 2 м на пиксель, эффективными оказались методы максимума правдоподобия или квадратичное расстояние Махalanобиса.

В процессе реализации алгоритмов тематической обработки гиперспектральных данных для каждого из используемого метода классификации были определены оптимальное число каналов и некоторые закономерности разбиения изображения на классы.

Метод Isodata применялся для кластеризации изображений в 4...15 информативных каналах, в которых наблюдается наибольший контраст

объекта с фоном. Дальнейшее увеличение числа каналов не приводит к существенным изменениям результатов классификации, однако при этом значительно увеличивается время обработки. При применении метода для решения конкретной задачи учитывался также тот факт, что результаты классификации в большей степени зависят от модуля вектора классифицируемого пикселя в спектральном пространстве, чем от его направления.

Метод максимального правдоподобия MaxLike применялся при выборе небольшого числа спектральных каналов (менее 40), количество которых должно было быть меньше объема обучающей выборки. При увеличении числа каналов (или признаков) возникала вероятность вырождения обратных матриц ковариации, которые рассчитываются для определения меры Махalanобиса, что приводило к ошибкам классификации. К тому же метод достаточно чувствителен к яркостным искажениям ГС данных и может применяться только при условии качественной первичной обработки классифицируемого участка. Особое внимание при использовании метода уделялось корректному заданию обучающих выборок, с которыми сравнивается анализируемый элемент изображения, что может быть обеспечено наличием объемной базы данных спектральных признаков объектов.

Напротив, метод SAM эффективно использовался для классификации объектов в более чем двадцати спектральных каналах или для сегментации территории только на два разнородных класса (например, воду и сушу, территории с растительным покровом и без него) при незначительном числе спектральных каналов (до 4). При заданном большом числе спектральных каналов (например, при идентификации объекта по форме спектральной сигнатуры) метод SAM использовался для классификации объектов в условиях неравномерной освещенности сцены.

Метод Fuzzy рассматривали в основном на последних итерациях алгоритма обработки, поскольку для предотвращения ошибок классификации необходимо было предварительно максимально уменьшить зону интереса. Реализация метода в ПО позволяет использовать в качестве меры разделения классов как метрику

Махалонобиса, так и Евклидову метрику или диагональную норму. В этом случае вероятность отнесения класса к искомому объекту увеличивается путем выбора оптимальной величины невязки и количества спектральных признаков, участвующих в классификации. Опытным путем было установлено, что оптимальное значение невязки при использовании не более 15 спектральных каналов составляет 0,05. При этом если увеличивается число анализируемых каналов, то значение невязки должно быть уменьшено.

Методы субпиксельного анализа использовались только при условии линейного характера смешивания спектральных характеристик объекта. Моделирование линейного перемешивания предполагает единый коэффициент спектрального отражения в пределах мгновенного поля обзора и во многих случаях является приближенным к реальности (в основном, техногенные объекты). Нелинейное смешивание имеет место всякий раз, когда излучение проходит через один из материалов (таких как растительный покров) и после этого отражается вторым материалом (таким как почва), или, если имеют место многочисленные отражения внутри материала или между объектами.

К одним из основных этапов алгоритмов обработки относится комплексирование методов контролируемой и неконтролируемой классифи-

кации с введением реклассификаций, позволяющей назначить обучающие выборки без привлечения дешифровщика с использованием библиотеки спектральных признаков, интегрированной с программным комплексом. Для автоматизированного сравнения спектральных сигнатур полученных образов со спектрами яркости, содержащимися в БД [1], использовался тот же метод, что и при критериях сходимости. В этом случае наибольшая эффективность решения тематической задачи достигается полнотой и достоверностью БД спектральных признаков объектов ландшафта.

Результаты практического применения разработанного методического подхода обработки ГС данных. Разработанный методический подход был реализован при решении задач выявления и определения степени лесовозобновления на вырубках и гарях, идентификация нефтезагрязненных земель [2] и свалок [3], разбиении водной поверхности по классам неоднородностей, обусловленных присутствием в воде оптически активных примесей [4] и др. При этом в зависимости от решаемой задачи и объекта идентификации методическая схема (рис. 1) варьировалась и позволяла разработать свой оригинальный алгоритм интерпретации ГС данных.

Например, для решения задач лесного хозяйства оптимальным является последовательное использование методов Isodata и MaxLike, а

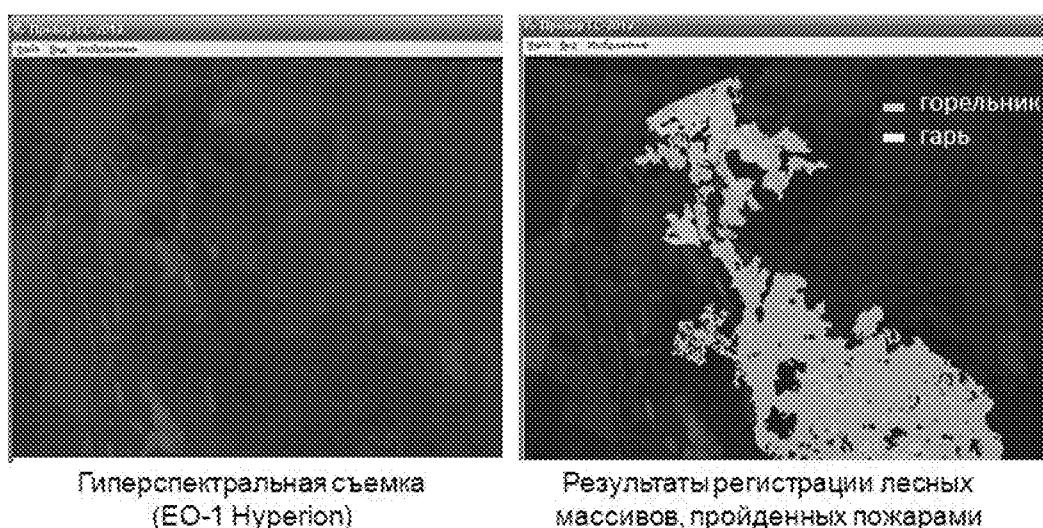
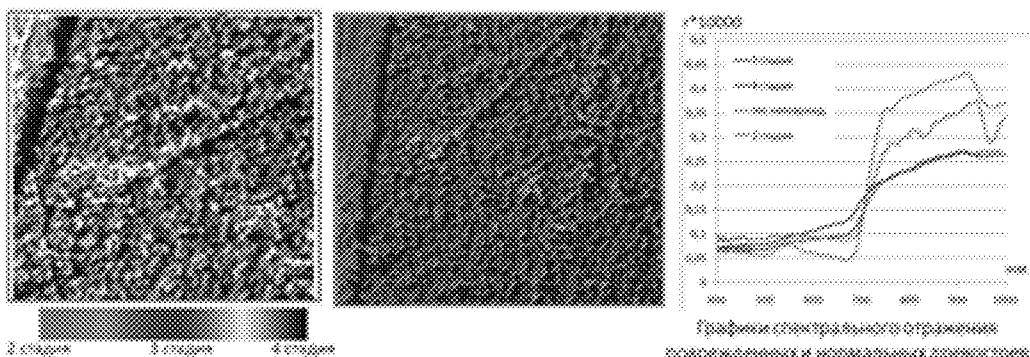


Рисунок 8.

Рисунок 8 - Пример реализации алгоритма регистрации пройденных пожарами лесных массивов по ГС данным КА Hyperion



*Рисунок 8.  
Пример реализации алгоритма идентификации участков деградации лесов  
по данным ГС аэросъемки прибором НПО "Лептон"*

также сегментации вырубок по показателям текстуры (энтропии) полигона, отражающим пространственно неоднородную структуру вырубок по сравнению с незатронутыми участками леса. Принятие решения о принадлежности объекта к классу "рубка" осуществляется по эталонным значениям КСЯ из БД спектрально-яркостных характеристик объектов ландшафта с учетом фенологического периода растительности, характерного для исследуемой местности на дату проведения съемки. Степень лесовозобновления оценивалась по нормализованному разностному вегетационному индексу и индексу NIR/RE [7]. Однако при регистрации лесных массивов, пройденных пожарами, по ГС данным с пространственным разрешением 30 м наилучшим является использование метода "нечетких множеств" с разбиением пространства минимум на 8 классов и идентификацией класса гарей по индексу водного стресса растительности SWVI и по модулю вектора эталонных значений КСО в интервалах спектра 0,78...0,89; 1,58...1,75 и 2,09...2,35 мкм (рис. 9).

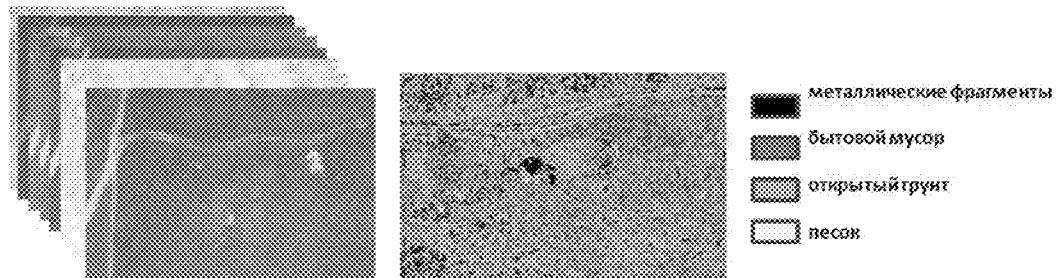
При распознавании участков сухостойных явлений в районе вымокания и аэрогенного загрязнения лесов наибольший акцент делался на определение информативных признаков, в качестве которых помимо производных индексов были выбраны характеристики "вектора смещения" вдоль оси длин волн 702-732 нм и показатели автокорреляционной функции спектра в области 530-600 нм (рис. 9).

При расчете эталонных пространственно-стаци-

тических признаков и признаков, полученных по гиперспектральным отношениям, учитывалось пространственное разрешение ГС данных в связи с образованием смесей спектральных классов в одном пикселе и изменения структуры изображения объекта при уменьшении разрешения на местности.

Метод обнаружения нефтепродуктов на почве базируется на распознавании уровня загрязнения с помощью индекса IS [2] по экспоненциальному кривым, описываемым функцией Ричардса, для всех типов почв с различным содержанием гумуса в чистом образце. В задаче применяются алгоритмы классификации ГС данных методами Isodata и SAM [6]. Для идентификации свалок достаточно применение одного метода "нечетких множеств" в комплексе с признаком текстуры изображения свалок, полученным по коэффициентам Фурье-спектра, модулем вектора яркости и эталонными значениями КСЯ свалок твердых бытовых отходов (рис. 10).

Рассмотренные в статье методические подходы позволяют проводить комплексные исследования для картографического информационного обеспечения природоресурсного назначения и перейти к разработке отечественного программного обеспечения для тематической обработки ГС данных, основанного на понимании параметров формирования энергетических величин интенсивности уходящего излучения от поверхности Земли при взаимодействии с излучения с исследуемым объектом, и получении устойчивых результатов обработки за счет:



*Рисунок 10.*

*Пример классификации морфологического состава свалок по данным ГС аэросъемки "Фрегат"*

- выбора оптимального некоррелированного набора информативных спектральных каналов, в пределах которых осуществляется распознавание объекта;
- наилучшей комбинации методов сегментации и классификации изображений;
- определения оптимальной последовательности этапов реализации алгоритма;
- использования информативных (спектрально-энергетических и пространственно-морфологических) признаков объекта;
- учета пространственного и спектрального разрешения данных, в том числе границ спектральных каналов при расчете признаков объекта;
- пополнения БД спектральных характеристик объектов с учетом сезонно-суточных изменений их характеристик съемочной аппаратуры.

Одной из основных задач дальнейшего развития рассмотренных в статье исследований является моделирование спектральных характеристик объектов ландшафта и количественное восстановление их параметров, используя знания спектральных характеристик объектов ландшафта и параметры аппаратуры.

#### *Список литературы:*

1. Григорьева О.В., Чапурский Л.И. Проблемы создания и информационного наполнения базы данных по коэффициентам спектральной яркости объектов наземных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. Том 9. Номер 3. - М.: ООО "ДоМира", 2012. - С.18-25
2. Григорьева О.В., Саидов А.Г., Панин А.В. Индикатор состояния почво-грунтов в районах обращения нефти и нефтепродуктов, полученный неконтактными средствами наблюдений // Экология и промышленность России. - 2010. - № октября. - С.50-53
3. Бровкина О.В., Скорописов Д.Ю. Мониторинг свалок твердых бытовых и промышленных отходов (на примере территории Кронштадского района г. Санкт-Петербург) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. Том 9. Номер 1. - М.: ООО "ДоМира", 2012. - С.153-155
4. Григорьева О.В., Шилин Б.В. Опыт оценки экологических характеристик акваторий морских портов по данным видеоспектральной аэросъемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. Том 9. Номер 1. - М.: ООО "ДоМира", 2012. - С.156-166
5. Шовенгердт В.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера.2010. - 560 с.
6. Григорьева О.В., Панин А.В. Автоматизированная идентификация нефтезагрязненных почвогрунтов по данным много-и гиперспектральной оптико-электронной аэросъемки // Экологический вестник России. -2011.-№2,3. - с 24-31.
7. Марков А.В., Григорьева О.В., Бровкина О.В., Мочалов В.Ф., Жуков Д.В. Автоматизированные методы оценки состояния окружающей среды по данным мульти- и гиперспектральной космической съемки // Геоматика. - 2012. - №4(17). - с. 102-106.

# ИСТОРИЧЕСКИЕ ОЧЕРКИ

## ОПТИКИ КРАСНОГОРСКА – ЛАУРЕАТЫ ЛЕНИНСКОЙ ПРЕМИИ

(К 65-летию Научно-технического центра ОАО КМЗ)

ФАТХУДИНОВ Р.Х. - заслуженный испытатель космический техники, ветеран космонавтики России

E-mail: contenant@zenitts.ru

Напомню, как все начиналось. Впервые в истории страны и в мире в 1957 году фотоаппаратом АФА-39, изготовленным на Красногорском механическом заводе и установленным на геофизической ракете Р-2А сделаны первые снимки земной поверхности на высотах до 280 километров и тем подтверждена возможность фотографирования Земли из космоса.

Затем конструкторам завода было доверено участвовать в претворении в жизнь идеи главного теоретика космонавтики М.В.Келдыша о получении снимков обратной, невидимой с земли, стороны Луны.

Специалисты КМЗ успешно справились с этой задачей, создав фотоаппарат АФА-Е1, который в автоматическом режиме с борта межпланетной станции сфотографировал лунную поверхность и информация была передана на Землю.

С тех пор и до сегодняшнего дня деятельность предприятия, связанная с космосом продолжается, углубляется и расширяется.

Достижения в этой области отождествляются с именами людей, составивших славу завода, как ведущего предприятия оптического приборостроения. Их умом и талантом созданы и создаются уникальные изделия.

Далее рассказ о наших семи лауреатах Ленинской премии и первом лауреате Государственной премии Российской Федерации.

СОБОЛЕВ ФЕДОР ЕВГЕНЬЕВИЧ

1912 - 1988

Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской  
и двух Государственных премий



Выдающийся конструктор, под чьим руководством на КМЗ были разработаны, изготовлены и поставлены на полигоны оптические средства внешнетраекторных измерений - кинофототеодолиты, в том числе уникальный теодолит - радиометр "Соболь", названный в честь главного разработчика.

Соболев Ф.Е. родился в 1912 году в Башкирии. В 1936 году окончил физико-математический факультет Казанского университета по специальности "геодезия", работал в ЦНИИГАиК, на заводе "Аэрогеоприбор".

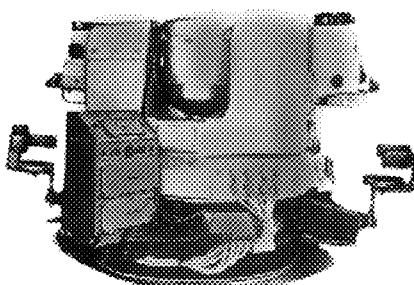
С 1942 года судьба навсегда связала его с Красногорским механическим заводом, где он прошел путь от инженера сборочного цеха до главного конструктора кинотеодолитной и астрономической техники.

В эти годы проявился талант Соболева Ф.Е. как инженера и руководителя.

Незаурядный талант конструктора, глубокие знания механики, оптики, геодезии, огромная

трудоспособность, которой об обладал сам и заражал своих сотрудников, позволили в короткий срок создать приборы, обеспечившие решения насущных оборонных задач.

Измерительные пункты полигонов ракетных войск и авиации оснащены кинотеодолитами КФТ, КТ - 50, КТС - 1 для точного измерения траектории летящих объектов.



Кинотеодолит КТ-50

Кинотеодолит КТ-50 был уникальным прибором с наведением на летящий объект как от радиолокационной станции или прибора программного наведения, так и вручную операторами.

Соболевым было предложено оригинальное схемно-конструкторское построение осевой системы теодолита, которая позволила повысить точность измерения координат. Для этого теодолита был впервые рассчитан и разработан крупногабаритный зеркально - линзовый объектив с диаметром главного зеркала 600 мм и фокусным расстоянием 3 метра.

В кратчайшие сроки этот же коллектив создает новую модель кинотеодолита КТС - 1, воплотивший лучшие технические решения.

До сегодняшнего дня эти кинотеодолиты в строю на всех космодромах.

За выдающийся вклад в развитие отечественного приборостроения главному конструктору теодолитной техники Соболеву Ф.Е. в 1957 году было присвоено высокое звание Лауреата Ленинской премии в области науки и техники.

Запуск первых ИСЗ потребовал создания, по заданию Астросовета СССР, высокоточной астрономической установки для фотографирования ИСЗ по их естественному блеску с целью определения их текущих координат и траектории. Главным конструктором стал Ф.Е. Соболев.

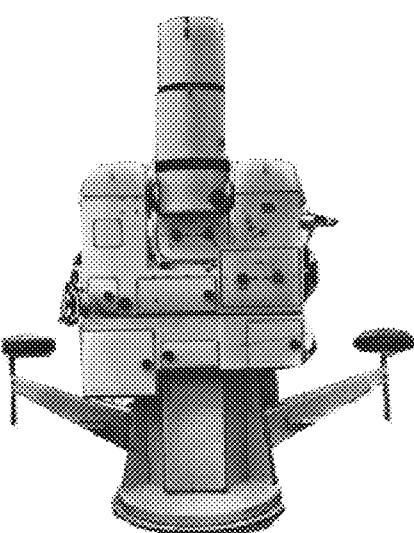
Созданная ВАУ обладала целым рядом преимуществ по сравнению с аналогичными установками в Германии и США.

В 1973 году главному конструктору Соболеву Ф.Е. и авторскому коллективу была присуждена Государственная премия СССР. Часть этих установок работает до сих пор.

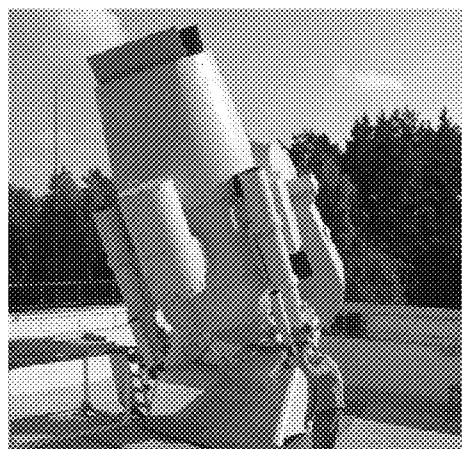
Под руководством Соболева Ф.Е. к 1970 году было успешно выполнено 30 крупных опытно-конструкторских работ.

Так был разработан и изготовлен первый в СССР мобильный инфракрасный теодолит - радиометр. Этот оптико-электронный прибор нового поколения "Соболь" обеспечивал не только автоматическое сопровождение ракет на активном участке траектории полета, но и регистрацию угловых координат и передачу их по линиям связи на вычислительные центры в реальном масштабе времени.

Высшую награду страны за труд - звание Героя Социалистического Труда, Федор Евгеньевич Соболев получил в 1966 году.



Кинотеодолит КТС-1



Высокоточная  
астрономическая установка

Уважение к нему и память о нем передается в поколениях конструкторов научно - технического центра КМЗ и это помогает воспитывать молодых специалистов.

Известный конструктор НТЦ Борис Петрович Майков так говорит о Соболеве:

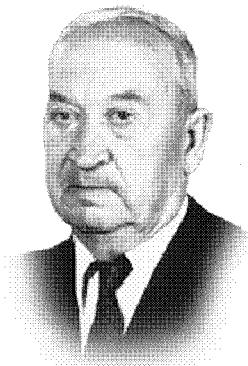
"Как инженер и руководитель Ф.Е. Соболев умел убедить в правильности своей точки зрения, горячо поддерживал и идеи других, своей активной творческой работой увлекал нас, молодых инженеров. Как главный конструктор он обладал аналитическим умом, обширными знаниями физических законов и математики, знаниями в смежных с приборостроением областях техники.

Я горжусь тем, что более 10 лет работал под его руководством".

### БЕШЕНОВ ВАСИЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

1906 - 1993

*Лауреат Ленинской премии, кавалер орденов Ленина (дважды),  
Отечественной войны II степени, Красной Звезды, "Знак Почета"*



Основатель космического фотографирования Бешенов В.А. родился в 1906 году в селе Александровка Воронежской области. В 1934 году окончил МИИГАиК и начал работу на КМЗ инженером - конструктором. В годы войны занимался разработкой дневных иочных аэрофотоаппаратов.

С 1952 года, будучи начальником СКБ - 1, начал работать с С.П. Королевым в экспериментах по фотографированию Земли из космоса через толщу атмосферы, с целью изучения физических явлений, происходящих в околоземных слоях. С этим предложением первым выступил В.А. Бешенов и сумел защитить его необходимость.

1958 год был объявлен Международным геофизическим годом и потому Физический институт АН СССР согласился с этими экспериментами. За основу был взят малоформатный кадровый аэрофотоаппарат завода АФА-39, но для него был разработан новый программный механизм, пульт управления и источник питания.

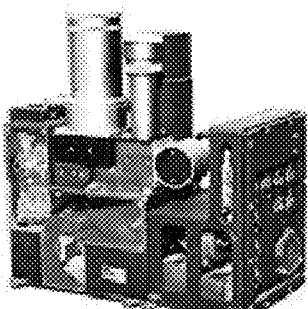
Использовалась геофизическая ракета Р-2А. Аппаратура располагалась в специальных углублениях ракеты, наклонно под углом 30° между осью ракеты и аппарата.

Съемка начиналась со старта и продолжалась до нулевой скорости на высоте 200-280 километров.

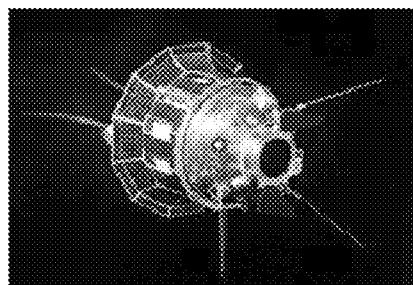
Впервые в мире были получены фотоснимки земной поверхности из космоса, а с ними и четкое изображение предметов земной поверхности и линии горизонта.



АФА Е-1



Енисей - 1



Луна - 3

Получен вывод о том, что с больших высот, через слои атмосферы можно получать хорошее изображение земных предметов, а также появилась возможность начала больших работ на десятилетия вперед для КМЭ в области дистанционного зондирования Земли и изучения других планет.

Слова Бешенова В.А. о С.П. Королеве:

"Как велико было внимание ученого к моему предложению. Ведь он согласился на проведение такого эксперимента, несмотря на то, что это требовало значительных затрат".

В конце 1957 года АН СССР, С.П. Королев, М.В. Келдыш приняли решение о посылке в сторону Луны АМС, осуществляя идею С.П. Королева - создание автоматической межпланетной станции для облета Луны и фотографирования ее обратной стороны, невидимой с Земли.

ЦКБ КМЭ были поручены работы по разработке и изготовлению фотоаппаратуры для фотографирования обратной стороны Луны.

Задачи фотографирования:

- получение изображения невидимой стороны Луны;
- получение на снимках деталей рельефа лунной поверхности;
- фотографирование одновременно на два кадра - обзорный и детальный для привязки рельефа.

Запуск АМС "Луна-3" состоялся 4 октября 1959 года.

Для приема телевизионного сигнала с АМС были выделены и оснащены два наземных измерительных пункта. Один, основной, в Крыму в Симеизе, другой на Камчатке в Елизово. НИПы были оснащены специально разработанной приемной аппаратурой "Енисей - II".

7 октября АМС "Луна-3" достигла Луны и в 6 часов 30 минут московского времени фотоаппарат Красногорского завода АФА Е-1 в составе бортовой аппаратуры "Енисей-1" начал 40-минутную съемку невидимой стороны Луны, через два объектива одновременно с фокусными расстояниями 200 и 500 миллиметров.

После окончания съемки бортовая аппаратура "Енисей - 1" автоматически осуществила проявку пленки и перемотку в специальный накопитель.

Сразу после запуска АМС С.П. Королев, М.В. Келдыш, Б.Е. Черток прилетели в Симеиз и своими глазами увидели снимки обратной стороны Луны, переданные АМС при пролете ее мимо Земли.

Первую карту поверхности невидимой с Земли стороны Луны создали, используя полученные фотографии, в Пулковской обсерватории.

Обратная сторона Луны была впервые сфотографирована в 1959 году советской автоматической станцией "Луна-3", но увидели ее своими глазами первыми из землян члены экипажа космического корабля "Аполлон", который совершил облет спутника Земли.

За создание АФА - Е1 В.А. Бешенов в 1960 году был удостоен звания Лауреата Ленинской премии. Орденом Трудового Красного Знамени была награждена конструктор Барацкова Галина Ивановна. С этой работы началась целенаправленная работа завода по исследованию космического пространства и зондированию земной поверхности из космоса для различных целей.

В дальнейшем с целью выявления деталей рельефа и построения полного атласа Луны, обратная сторона фотографировалась с различных расстояний от 1 до 10 тысяч километров. Съемки велись с АМС "Зонд-6" и "Зонд-8" серийными фотоаппаратами КМЭ АФА-5А, приспособленных для работы в условиях космоса (конструктор Рябушкин Ю.В.)

Подробная карта обратной стороны Луны явилась одним из выдающихся достижений XX века.

## РЯБУШКИН ЮРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

(1917 - 1996)

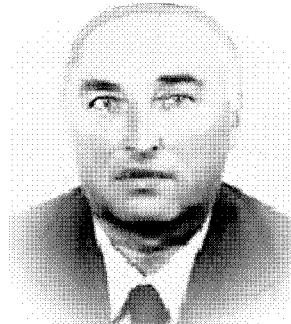
Лауреат Ленинской премии

В 1939 году окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана, факультет точного машиностроения. С 1945 года работал в ЦКБ КМЗ.

Из характеристики:

"Прекрасный специалист и хороший руководитель. Под его руководством в СКБ-1 создано много конструкций новых приборов, он пользуется авторитетом у своих подчиненных".

С начала пятидесятых годов под руководством Рябушкина Ю.В. велись работы по созданию дневных иочных кадровых аэрофотоаппаратов перспективного бокового наблюдения для первых беспилотных летательных аппаратов.



За разработку и освоение в серийном производстве аэрофотооборудования для БПЛА Рябушкину Ю.В. было присвоено звание лауреата Государственной премии СССР.

Ю.В. Рябушкин стал в ЦКБ первым главным конструктором космической фотоаппаратуры.

17 марта 1966 года ракета - носитель Р-7 вывела на орбиту космический фотографический комплекс "Зенит-2" на базе КА "Восток".

Большинство космических аппаратов дистанционного зондирования Земли комплектовались средствами видового наблюдения Красногорского механического завода.

В период с 1964 по 1979 год разработан целый ряд новых космических оптико - электронных систем, создана линейка аппаратуры "Жемчуг":

"Жемчуг - 3", "Жемчуг - 3М" - аппаратуры широкозахватного детального наблюдения.

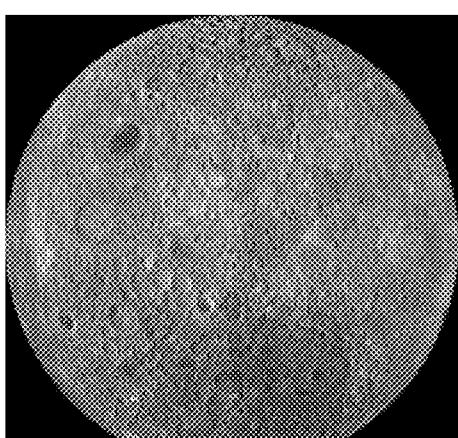
"Жемчуг - У" - космическая фотоаппаратура детального наблюдения на базе длиннофокусного объектива.

Линейка этой аппаратуры стала базовой для дальнейшего развития космической техники. В эти годы были созданы обзорно - топографические аппараты для создания топографических карт недоступных территорий и их координатной привязки.

В 1973 года "за разработку и создание космического объекта в единой схеме с длиннофокусным светосильным фотоаппаратом для оперативного наблюдения земной поверхности" Юрий Васильевич Рябушкин стал Лауреатом Ленинской премии.



Первая фотография обратной стороны Луны



Последующая фотография обратной стороны Луны

## МЕНЬКОВ АЛЕКСАНДР КОНСТАНТИНОВИЧ

1912 - 1983

*Лауреат Ленинской премии, кавалер ордена "Знак Почета"*



В ЦКБ Красногорского завода работал с 1959 года. Занесен в книгу Почета завода в 1971 году.

Под решение новых задач видового наблюдения Земли из космоса в 1960 году было организовано самостоятельное конструкторское бюро КБ-10 во главе с Меньковым А.К.

Новый коллектив в кратчайшие сроки обеспечил разработку нескольких модификаций фотоаппаратуры для космических аппаратов обзорно - топографического и детального видового наблюдения Земли из космоса.

В 1960 году были получены первые фотоснимки земной поверхности высокого качества.

Базовым для фотоаппаратуры топографического и обзорного наблюдения в те годы использовался КК "Восток", переоборудованный под новые требования.

С 1962 года было освоено на заводе серийное производство космической фотоаппаратуры, поскольку срок работы космических аппаратов составлял в среднем четырнадцать суток, и затем следовала посадка для доставки фотопленки на Землю.

Были получены высококачественные фотоснимки земной поверхности, которые развеяли все сомнения о возможном влиянии плазмы, атмосферы на получение и передачу изображения объектов на поверхности Земли и заложили прочные основы в изучение Земли оптическими и оптико - электронными средствами.

В 1966 году за создание и серийное освоение первых образцов фотографической аппаратуры топографического и детального наблюдения земной поверхности Менькову Александру Константиновичу присвоили звание Лауреата Ленинской премии.

Разведка наземных объектов вероятного противника в последующем дала огромный объем информации с точным определением координат целей. Это большое достижение в дальнейшем укреплении обороноспособности страны.

Дистанционное зондирование Земли в интересах науки было и будет перспективным направлением деятельности конструкторов и всего коллектива Красногорского завода.

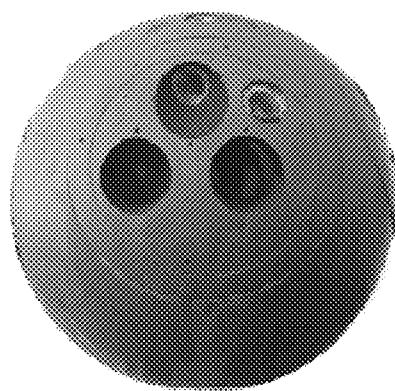
## СУЧКОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСЕЕВИЧ

*Лауреат Ленинской премии*



Ведущий специалист, участвовавший в разработке и создании большого количества фотоаппаратуры для исследования Земли и решения оборонных задач для спутников видовой, детальной разведки и картографии - семейств "Зенит", "Янтарь", "Комета", "Неман" и других.

Когда была создана новая платформа "Янтарь", на заводе создали для нее линейку особо детальной аппаратуры "Жемчуг".



*Зенит - 2 на базе КК «Восток»*

Изготавливались и специальная оптическая аппаратура для картографических космических аппаратов.

В Красногорске был разработан, при активном участии Сучкова А.А., многозональный фотокомплекс "Природа", позволяющий проводить исследования природных ресурсов Земли, оценивать состояние сельскохозяйственных угодий, лесов, оценивать экологическую обстановку территории любой площади.

Снимки аппаратурой "Природа" дали возможность археологам увидеть следы исчезнувших поселений и городов - памятников древних цивилизаций. Экономический эффект от использования фотоснимков комплекса "Природа" существенно превышал затраты на их получение.

На станции "Мир" также устанавливался комплекс "Природа - 5" и успешно работал до последних дней станции.

В 1983 году Александру Алексеевичу Сучкову было присуждено звание Лауреата Ленинской премии за "разработку и создание космического объекта с фотографической аппаратурой, обеспечивающей информативность наблюдения деталей земной поверхности в интересах обороноспособности страны".

Все годы до сегодняшнего дня Александр Алексеевич активно участвует в создании различной фотоаппаратуры зондирования земной поверхности из космоса.

И сегодня выполняют задачи на околоземной орбите космические аппараты "Ресурс ДК-1" и "Монитор - Э", находится в разработке новая фотоаппаратура для КА "Ресурс - П", участие в разработке которых он принимает.

### КУДИНОВ ВАЛЕРИЙ ДМИТРИЕВИЧ

*Лауреат Ленинской премии, Лауреат премии СМ СССР,  
кавалер ордена "Дружбы народов"*



На заводе с 1966 года. После окончания физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова прибыл на КМЗ, прошел путь от рядового инженера до заместителя начальника СКБ-1

Из служебной характеристики:

"Один из самых высококвалифицированных специалистов НТИ. Имеет собственное мнение по любому научно-техническому вопросу, относящемуся к его профессии, отстаивает свое мнение, причем в ряде случаев бескомпромиссно".

Из воспоминаний Кудинова В.Д.:

«К началу семидесятых ресурсы, имевшиеся в то время космической платформы, были исчерпаны. Срок нахождения на орбите первых спутников не превышал 14 суток, поэтому завод выпускал по 2-3 аппарата в месяц. Перед разработчиками платформ было поставлена задача нарастить качественные характеристики с тем, чтобы увеличить срок существования спутника вдвое. Следовательно, и наша аппаратура должна стать принципиально иной. До этого информация, полученная с помощью нашей аппаратуры, поступала на Землю либо в спускаемом аппарате, либо в капсулах, которые, естественно, также приземлялись с каким-то интервалом».

Чтобы исключить задержку, требовалось создать новую элементную базу, высокоразрешающие пленки, более светосильную оптику, а также увеличить ресурс пленки.

Задача была решена.

За создание первого оптико - электронного комплекса с оперативной (задержка не более тридцати секунд) передачей информации по радиолинии через спутниковый транслятор Валерий Дмитриевич Кудинов получил звание Лауреата Ленинской премии".

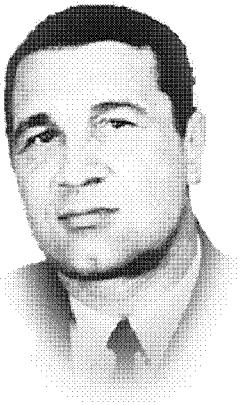
Аппаратура серии "Жемчуг" эксплуатируется и развивается до сих пор. Первые образцы создавались в интересах обороны, но затем стала выпускаться аппаратура двойного назначения.

Аппаратура "Геотон" ведет съемку в трех зонах спектра. В космосе работает и аппаратура "Гамма", она тоже многозональная.

С помощью полученных цветных снимков Земли можно определить состав воды в растениях, состояние почвы, урожайность, степень налива плодов и т.д. Можно найти нефтяные разломы, обнаружить течь в нефтепроводах. Незаменимы они и при составлении земельного, водного и лесного кадастров и позволяют вовремя заметить лесной пожар.

## НЕКРАСОВ ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ

(1931 - 1995)



*Генеральный конструктор страны по бортовым фотографическим и оптико-электронным системам для космических комплексов специального и народно-хозяйственного назначения. Лауреат Ленинской, двух Государственных премий СССР, Государственной премии РФ. Кавалер ордена Трудового Красного Знамени.*

Некрасов В.В. родился в г. Зубцове, Тверской области. В 1957 году окончил МВТУ им. Баумана, факультет "Приборостроение", был распределен на Красногорский механический завод, где прошел путь от инженера - конструктора до начальника ЦКБ (НТЦ), которое он возглавлял почти двадцать лет.

Глубокие теоретические знания, целеустремленность, организаторский талант позволили ему превратить 5-тысячный коллектив ЦКБ в команду единомышленников.

Он был становым хребтом коллектива ЦКБ. Виктор Васильевич обладал уникальной способностью предвидеть стратегические перспективы развития науки и техники, что позволяло создавать приборы, поддерживающие высокий имидж нашей страны.

При Некрасове во всех тематических направлениях ЦКБ были созданы совершенно уникальные системы, не имеющие зарубежных аналогов. Это "Бирюза", "Топаз", "Жемчуг", "Созвездие", тепловизоры "Агава" и многие другие.

Виктор Васильевич, работая начальником многопрофильного ЦКБ, много внимания уделял всем направлениям, но особенно выделял первое тематическое направление - космическое. Он автор почти 200 научных печатных работ, 63 изобретений. Заслуженный изобретатель РСФСР, доктор технических наук, профессор МГТУ им. Баумана. В.В. Некрасов был действительным членом Академии инженерных наук РФ, Академии технологических наук РФ, Международной Академии наук Евразии, Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, председателем регионального отделения Всероссийского оптического общества им. Д.С. Рождественского. На заводе в память Виктора Васильевича Некрасова учреждены две премии. Одна для лучшего студента красногорского филиала МГТУ им. Баумана, другая - для лучшего студента оптико-электронного колледжа. На заводе чтят память Виктора Васильевича. Мемориальная доска в его честь установлена на здании ЦКБ.

В 2011 году к 80-летию генерального конструктора Некрасова В.В. учреждена медаль "За выдающийся вклад в научно-техническое развитие ОАО КМЗ".

Этой медалью были награждены около ста сотрудников завода и ветеранов КМЗ.



Медаль  
им. В.В.Некрасова

## ЧЕРНОВ ВЛАДИМИР СЕМЕНОВИЧ



В 1971 году в ЦКБ были развернуты работы по созданию комплекса контроля космического пространства "Окно" для оперативного получения сведений о космической обстановке, каталогизации космических объектов искусственного происхождения, определения их класса, назначения, текущего состояния, государственной принадлежности, что позволяет получить в автоматизированном режиме своевременную информацию о соблюдении международных договоров и соглашений по использованию космоса, об аварийных и нештатных ситуациях на космических аппаратах, оценивать техногенное засорение космоса.

Для проведения этих работ в ЦКБ было создано направление под руководством В.С. Чернова, и он же назначен главным конструктором для координации работ по этой тематике предприятий и организаций.

Для проведения научных исследований на Бюраканской астрофизической обсерватории была организована лаборатория практической астрономии.

Для красногорского завода и всей оптической отрасли это была новая грандиозная задача и с технической и с организационной стороны.

О масштабности работ говорит то, что "Окно" состоит из 10 телескопов с диаметрами зеркал от 0,5 до 1,5 метров, объединенных в единую автоматизированную систему, управляемую электронным вычислительным комплексом.

В работе участвовали свыше 700 предприятий страны.

Огромную роль в разработке идеологии, организации необходимых исследований, разработке составных частей комплекса сыграл главный конструктор Чернов Владимир Семенович. Развал Советского Союза остановил работы по монтажу оборудования на месте дислокации комплекса "Окно" под Нуреком в Таджикистане. И только в середине девяностых монтаж возобновился.

В конце 1999 года комплекс "Окно" был поставлен на опытное боевое дежурство

В связи с уходом на заслуженный отдых Чернова В.С., главным конструктором комплекса стал Колинько Валерий Иванович

Эксплуатация СНКП "Окно" показала, что по сравнению с традиционными радиолокационными системами и обычными телескопами комплекс имеет значительно большую дальность действия (до 40 тысяч километров), более высокую точность измерения параметров космических объектов на любых орbitах.

В 2002 году комплекс "Окно" был поставлен на боевое дежурство в космических войсках.

Помимо военной функции комплекс способен исполнять и сугубо мирную службу: астронома - наблюдателя за объектами земного и неземного происхождения.

За вклад в создание и развитие комплекса контроля космического пространства "Окно" главный конструктор Колинько Валерий Иванович в 2004 году был удостоен звания Лауреата Государственной премии РФ в области науки и технологий - первым на заводе и в Красногорске.



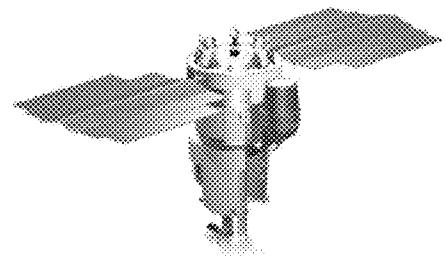
Колинько  
Валерий Иванович



*Красногорский механический завод им. С.А. Зверева, его научно - технический центр продолжает свою деятельность, сохраняя направления работы, принесшие ему заслуженную славу:*

- космическая аппаратура дистанционного зондирования Земли;
- авиационная аппаратура дистанционного зондирования Земли;
- наземные средства внеинетраекторных измерений и оптико
- электронного контроля космического пространства;
- обзорно - прицельные комплексы, системы наведения, системы управления огнем бронетанковой и авиационной техники;
- фотокинотехника;
- медицинская техника.

*И сегодня в околоземном космическом пространстве на КА "Ресурс - ДК1", "Монитор - Э" работает аппаратура Красногорского завода.*



*Ресурс ДК-1*

**25 июня 2013 года Российский космический аппарат дистанционного зондирования Земли «Ресурс-П» успешно выведен на орбиту.**

**КА «Ресурс-П» предназначен для получения высокодетальных снимков поверхности Земли с разрешением до 70 сантиметров. Он пришел на смену КА «Ресурс-ДК».**

**Фотографическая аппаратура обоих аппаратов разработана и изготовлена на ОАО КМЗ. Дела лучших конструкторов завода - Лауреатов Ленинских премий продолжаются.**

---

**Ленинские премии в СССР** - одна из высших форм поощрения граждан за наиболее крупные достижения в области науки, техники, литературы, искусства и архитектуры.

**Премии имени В.И.Ленина были учреждены 23 июня 1925 года по постановлению ЦК ВКП(б) и СНК. Первоначально присуждались лишь за научные труды.**

**С 1935 по 1957 годы не присуждались. В 1941-1952 годах вручались Сталинские премии трех степеней. 15 августа 1956 года ЦК КПСС и Совет Министров СССР приняли постановление восстановить премии имени В.И.Ленина и присуждать их ежегодно ко дню рождения вождя - 22 апреля. В 1957 году было восстановлено присуждение Ленинских премий за выдающиеся научные труды, архитектурные и технические сооружения, изобретения, внедренные в народное хозяйство, технологические процессы и др. Были также учреждены Ленинские премии за выдающиеся произведения литературы и искусства. В марте 1960 года были учреждены Ленинские премии в области журналистики и публицистики.**

---