

# УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 14  
2018  
№ 11 (167)  
ноябрь

Издается с января 2005 г.

Главный редактор  
д.т.н., проф.  
Ю.В. ПАНФИЛОВ

Председатель редакционного  
совета

д.т.н., проф., заслуженный  
деятель науки и техники РФ  
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

Заместитель главного  
редактора  
д.ф.-м.н., проф.  
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя  
редакционного совета:  
д.т.н., проф.  
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН  
д.т.н., проф.  
А.В. КИРИЧЕК  
д.т.н., проф.  
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.  
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.  
В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.  
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.  
А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.  
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.  
В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.  
В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.  
С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.  
Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.  
Н.К. КРИОНИ, д.т.н., проф.  
В.П. КУЗНЕЦОВ, д.т.н., проф.  
В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.  
В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.  
Е.Д. МАКАРЕНКО  
Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.  
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.  
Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.  
Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.  
В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.  
А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.  
Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.  
В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.  
В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.  
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

Редакция:

О.С. ЛУКАШЕНКО  
А.В. ОРЛОВА  
Е.А. СЕРИКОВА

Журнал распространяется по подписке,  
которую можно оформить в любом  
почтовом отделении (индекс  
по каталогу "Пресса России" 39269)  
или в издательстве.  
Тел.: (499) 269-52-98,  
268-47-19.  
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован  
в Роскомнадзоре.  
Свидетельство о регистрации  
П/И № ФС 77-63956 от 09.12.2015 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

Панфилов Ю.В. Упрочняющие технологии в истории МГТУ им. Н.Э. Баумана ..... 483

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

- Адаскин А.М., Сапронов И.Ю. Взаимосвязь макро- и микротвердости материа-  
лов при индентировании пирамидой Виккерса ..... 489
- Грубый С.В., Шавва М.А., Лапшин В.В. Сверхточная обработка поверхностей  
элементов приборов из оптических материалов ..... 496
- Сорокин С.П., Орлик Г.В., Орлик А.Г., Коберник Н.В., Галиновский А.Л.,  
Михеев Р.С. Влияние защитного газа на структуру и свойства стойких против  
абразивного износа покрытий ..... 500

### МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

- Евсюков С.А., Небогов С.М., Алимов А.И. Ультразвуковое упрочнение резьбы  
насосно-компрессорных труб ..... 505
- Лавриненко В.Ю., Лавриненко Ю.А. Разработка математической модели  
упрочнения высоконагруженных пружин сжатия дробеметной обработкой ..... 508
- Соколова О.В., Лагошина Е.В., Миронова М.О. Упрочнение сталей и сплавов  
методом холодной периодической прокатки ..... 512

### ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

- Неровный В.М. Особенности нанесения композиционных покрытий дуговой  
наплавкой в вакууме ..... 514

### ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- Смирнов А.Е., Мохова А.С., Семенов М.Ю., Севальнёв Г.С., Фахуртдинов Р.С.  
Оптимизация режимов комбинированной химико-термической обработки  
высоконагруженных зубчатых колес из дисперсионно-твердеющей теплостойкой  
стали ..... 519

### УПРОЧНЯЮЩИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

- Беликов А.И., Калинин В.Н., Карпунин С.Д., Попова М.Г. Нанокompозитные  
твердосмазочные покрытия, формируемые методом магнетронного распыления  
мишени состава Ti + MoS<sub>2</sub> ..... 523

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов,  
публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются  
со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий  
для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных  
специальностей: 05.02.00 — Машиностроение и машиноведение;  
05.05.00 — Транспортное, горное и строительное машиностроение;  
05.16.00 — Металлургия и материаловедение, в базу данных Chemical Abstracts,  
в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

С.В. Грубый  
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана),  
М.А. Шавва, В.В. Лапшин  
(АО "ВНИИИНСТРУМЕНТ", г. Москва)  
E-mail: grusv\_16@bmstu.ru

## Сверхточная обработка поверхностей элементов приборов из оптических материалов

Приведены результаты исследований, направленных на повышение производительности, точности и качества обработки лезвийным и абразивным алмазным инструментом поверхностей элементов из оптических материалов: дигидрофосфата калия (KDP), ситалла, кварцевого стекла. Рассмотрены примеры обработки оптических поверхностей на сверхточных экспериментальных стандах и достигнутые параметры качества обработанных поверхностей.

**Ключевые слова:** сверхточная обработка поверхностей, алмазное микрофрезерование, алмазное шлифование, обработка оптических материалов.

*The researches results aimed at improving the performance, accuracy and quality of surface treatment of elements made of optical materials: KDP, ceramized glass, quartz glass, by diamond turning and grinding tools are presented. Optical surfaces machining examples on precision experimental machines and the quality parameters of processed surfaces are considered.*

**Keywords:** ultra-precise surface machining, diamond turning, diamond grinding, processing of optical materials.

### Введение

Традиционная технология обработки поверхностей элементов из оптических материалов предусматривает алмазное шлифование с последовательным снижением зернистости и химико-механическое полирование. Основные недостатки традиционной технологии — низкие производительность и стабильность процесса, сложность автоматизации и управления, влияние квалификации полировщика на качество обработки, повреждение поверхностного слоя шаржированными абразивными частицами. МГТУ им. Н.Э. Баумана, АО "ВНИИИНСТРУМЕНТ", ООО "Ресурс точности" совместно с рядом организаций проводят комплекс технологических исследований и конструкторских разработок, направленных на повышение производительности, точности и качества обработки поверхностей элементов из оптических материалов лезвийным и абразивным алмазным инструментом. Технологические экспериментальные исследования проведены в АО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" на сверхточных стандах по схеме фрезерования плоской поверхности алмазной однорезцовой фрезерной головкой и плоского алмазного шлифования с наклоном оси шлифовального круга. Образцы для обработки изготовлены из оптических материалов: дигидрофосфата калия (KDP), ситалла, кварцевого стекла. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что возможно создание условий обработки, обеспечивающих толщину срезаемого слоя в нанометровом диапазоне, при которых механизм хрупкого вза-

модействия "инструмент—обрабатываемый материал" заменяется на пластическое деформирование [1—5]. Переход от хрупкого скалывания к пластичному деформированию позволяет получить поверхность с минимальным поврежденным (имеющим трещины) слоем и параметром шероховатости  $Ra < 0,01$  мкм. Погрешность формы обрабатываемой поверхности при этом обеспечивается кинематикой сверхточного станка [6].

### Лезвийная алмазная обработка

Для обеспечения условий пластичного деформирования оптического материала в зоне резания алмазный монокристаллический резец должен иметь следующие характеристики: передний угол  $0...-35^\circ$  [7]; радиус округления режущей кромки  $50...100$  нм; радиус вершины лезвия  $1...10$  мм; задний угол  $7...15^\circ$ .

Толщина срезаемого слоя при лезвийной обработке зависит от режимов резания и параметров режущего инструмента. На рис. 1 приведены за-

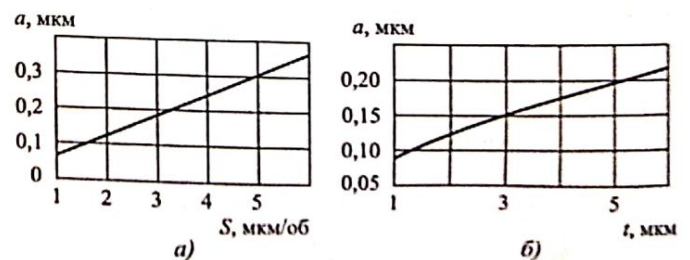


Рис. 1. Зависимость толщины срезаемого слоя: а — от подачи заготовки; б — от глубины резания

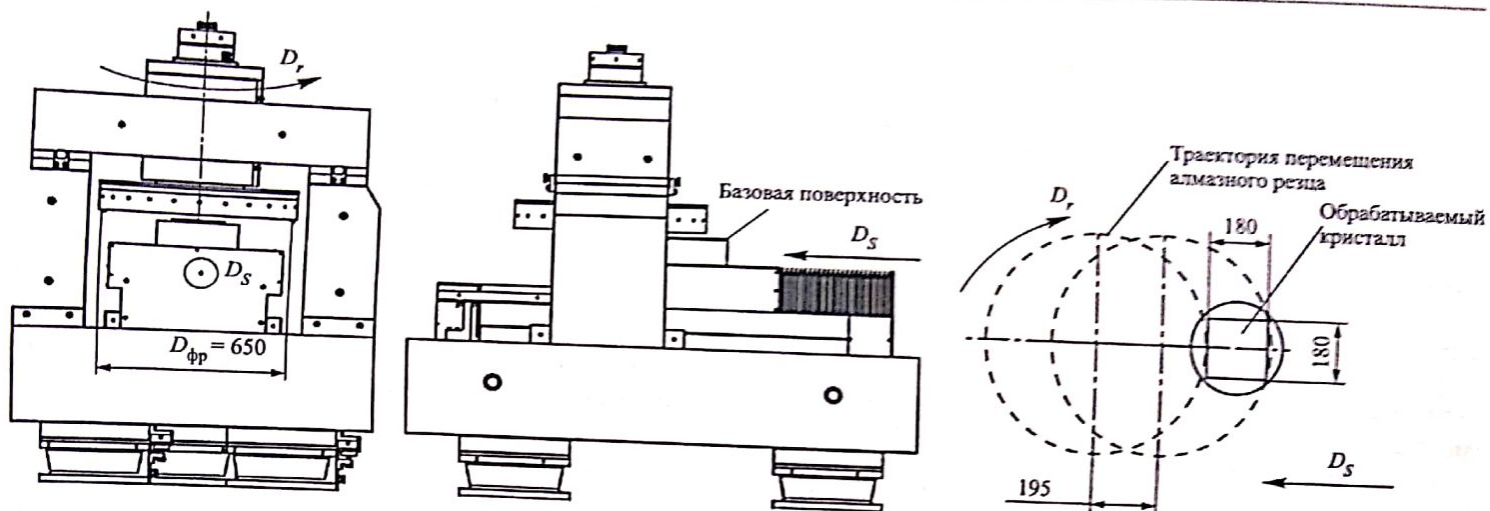


Рис. 2. Кинематическая схема обработки на сверхточном экспериментальном стенде для алмазного микрофрезерования

зависимости толщины срезаемого слоя  $a$  от продольной подачи заготовки  $S$  на один оборот инструмента при радиусе вершины 1 мм и глубине резания 2 мкм и от глубины резания  $t$  при радиусе вершины 1 мм и подаче заготовки 2 мкм/об.

Экспериментально доказано, что для обеспечения условия пластичного взаимодействия алмазного резца и кристалла KDP толщина срезаемого слоя должна составлять не более 100...120 нм [8]. Это ограничение позволяет выбрать глубину и подачу, например, для условий, приведенных на рис. 1.

Экспериментальные исследования процесса обработки однорезцовой алмазной фрезерной головкой проведены на сверхточном экспериментальном стенде для алмазного микрофрезерования, имеющем следующие конструктивные особенности: шпиндельный узел и линейный суппорт стенда выполнены на аэростатических подшипниках, стенд установлен на виброизолирующих опорах, предусмотрена система охлаждения двигателя шпиндельного узла. Основные параметры сверхточного экспериментального стенда приведены ниже.

Наибольшие габаритные размеры обрабатываемой детали, мм	450×450
Диапазон частот вращения шпинделя, мин <sup>-1</sup>	50...600
Число осей (ось X — поперечный суппорт; ось C — вращение шпинделя)	2
Ход поперечного суппорта, ось X, мм	800
Разрешающая способность по оси X, нм	1
Диапазон подач по оси X, мм/мин	0,002...150

Кинематическая схема обработки алмазным лезвийным инструментом на экспериментальном стенде приведена на рис. 2. Объекты исследования — заготовки из монокристалла дигидрофосфата калия (KDP) размерами 180×180×10 мм. Параметры алмазного резца, режимы резания и соответствующая толщина срезаемого слоя приведены ниже.

Радиус однорезцовой фрезерной головки $R_{фр}$ , мм	325
Радиус алмазного резца $r$ , мм	1
Глубина резания $t$ , мкм	2
Подача на оборот $S$ , мкм/об	2
Частота вращения шпинделя $n$ , мин <sup>-1</sup>	340
Толщина срезаемого слоя $a$ , нм	124

Для контроля шероховатости обработанных поверхностей использован 3D-профилометр Leica DCM3D. Профилограмма обработанной поверхности приведена на рис. 3. Параметры шероховатости обработанной поверхности составили  $Ra = 3$  нм,  $Rz = 12$  нм.

Измерение точности формы плоской обработанной поверхности кристалла KDP выполнено на лазерном интерферометре ИПФ РАН (г. Нижний Новгород). На рис. 4 (см. обложку) приведена интерферограмма обработанной поверхности. Отклонение от плоскостности составило 280 нм и определяется отклонением от прямолинейности направляющих станка, недостаточной точностью юстировки и вибрациями, возникающими при обработке.

Результаты экспериментальных исследований процесса алмазной лезвийной обработки показывают, что элементы оптики и микроэлектроники из дигидрофосфата калия, кремния, германия при условии пластичного характера взаимодействия пары "алмаз—кристалл" могут быть обработаны с параметром шероховатости  $Ra \leq 5$  нм.

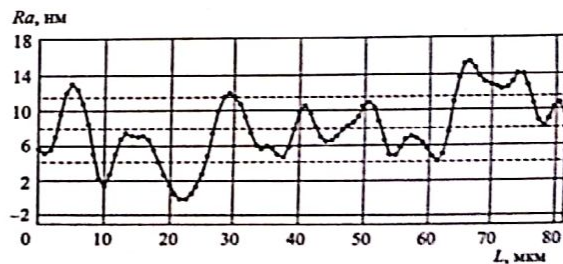


Рис. 3. Профилограмма обработанной поверхности заготовки из KDP

### Алмазное шлифование

Для обеспечения условий пластичного характера взаимодействия "алмазное зерно—обрабатываемый материал" при алмазном шлифовании толщина срезаемого слоя должна находиться в нанометровом диапазоне, алмазный круг на органических связках должен иметь зернистость 2...3 мкм, концентрацию зерен в алмазоносном слое не менее 100 %. Кроме того, шлифовальный круг должен подвергаться периодической правке. Для обеспечения необходимых режимных параметров и толщин среза на единичное зерно предложено использовать схему плоского шлифования с наклоном оси круга относительно оси вращения планшайбы с закрепленными заготовками [9]. На рис. 5 показан шлифовальный круг с радиусом  $R$ , который наклонен на угол  $\beta$  и вращается с частотой  $n_1$ . Круговая подача заготовки выполняется со скоростью  $S_{prod}$  и задается частотой вращения  $n_2$  поворотного стола диаметром  $D_{zag}$ . Поперечная подача круга выполняется со скоростью  $S_{pop}$ . Изменение угла наклона оси шлифовального круга позволяет изменять направление распространения трещин и таким образом уменьшать глубину поврежденного слоя. Оптимальный угол наклона оси круга, обеспечивающий пластическое деформирование материала в зоне резания и глубину поврежденного слоя менее 50 нм, подтвержден экспериментально и находится в диапазоне 1...3°.

На рис. 6 показан график зависимости толщины срезаемого слоя единичным зерном от продольной подачи. Параметры для расчета толщины срезаемого слоя единичным зерном при шлифовании с наклоном оси круга приведены ниже.

Коэффициент, учитывающий заделку зерна в связку $\epsilon$ .....	0,5
Средний диаметр алмазного зерна $\bar{x}$ , мкм .....	2
Концентрация зерен в алмазоносном слое $K$ , % ..	100
Частота вращения круга $n_1$ , мин <sup>-1</sup> .....	1000
Глубина резания $t$ , мкм .....	5
Ширина алмазоносного слоя $B$ , м .....	0,01
Радиус шлифовального круга $R$ , м .....	0,05
Угол наклона оси круга $\beta$ , ° .....	1,5

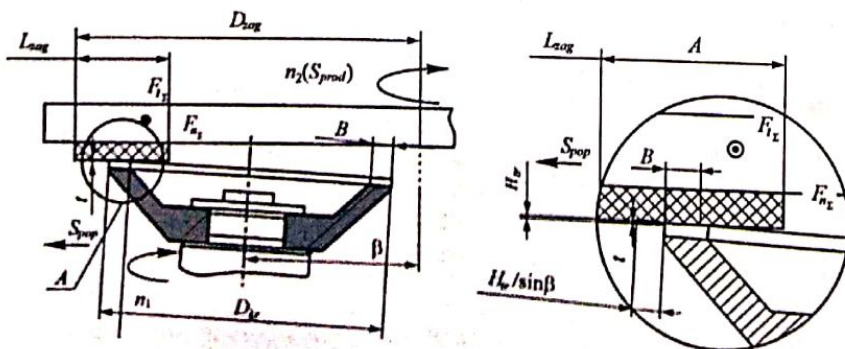


Рис. 5. Схема алмазного шлифования с наклоном оси круга

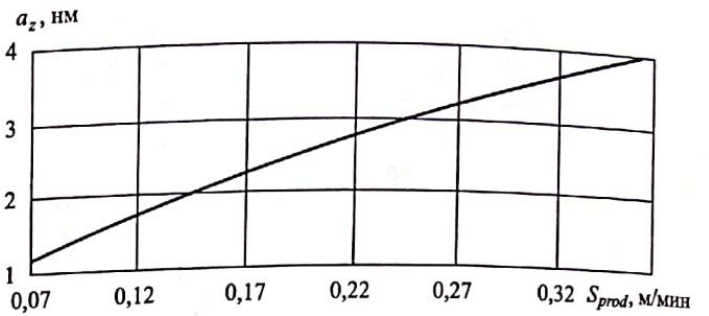


Рис. 6. Зависимость толщины срезаемого слоя единичным зерном от продольной подачи при плоском шлифовании с наклоном оси круга

Расчеты показывают, что толщина срезаемого слоя зависит от режимов резания, параметров режущего инструмента и угла наклона шлифовального круга.

Кинематическая схема плоского шлифования алмазным кругом с наклоном оси по рис. 5 была реализована на сверхточном экспериментальном стенде. Параметры стенда приведены ниже.

Диапазон частот шлифовального шпинделя $n_1$ , мин <sup>-1</sup> .....	50...3000
Диапазон частот вращения шпинделя заготовки $n_2$ , мин <sup>-1</sup> .....	0,01...100
Ход продольного суппорта, ось Z (суппорт врезания), мм .....	100
Ход поперечного суппорта, ось X, мм .....	200
Число осей (ось X — поперечный суппорт; ось Z — продольный суппорт (суппорт врезания); ось S — вращение шлифовального круга; ось S1 — вращение заготовки) .....	4
Рабочая подача продольного суппорта, мм/мин ..	5...200
Дискретность перемещения поперечного суппорта, мкм .....	0,1
Мощность электродвигателя шлифовального круга, кВт .....	1
Биение шпиндельного узла, мкм .....	0,5

Конструктивные особенности стенда: шпиндель заготовки и шлифовальный шпиндель выполнены на базе подшипников с газовой смазкой, что обеспечивает радиальное биение исполнительных поверхностей не более 0,5 мкм и жесткость не менее 100 Н/мкм; продольный и поперечный суппорты выполнены с пористым дросселированием для подачи газовой смазки и имеют дополнительное демпфирование сверхвязкой жидкостью; система индикации станка позволяет оценить глубину врезания инструмента с точностью до 0,1 мкм.

Объектами исследований при алмазном шлифовании были заготовки из ситалла марки СО115М и кварцевого стекла марки КУ1. Обработку заготовок при алмазном шлифовании осуществляли на следующих

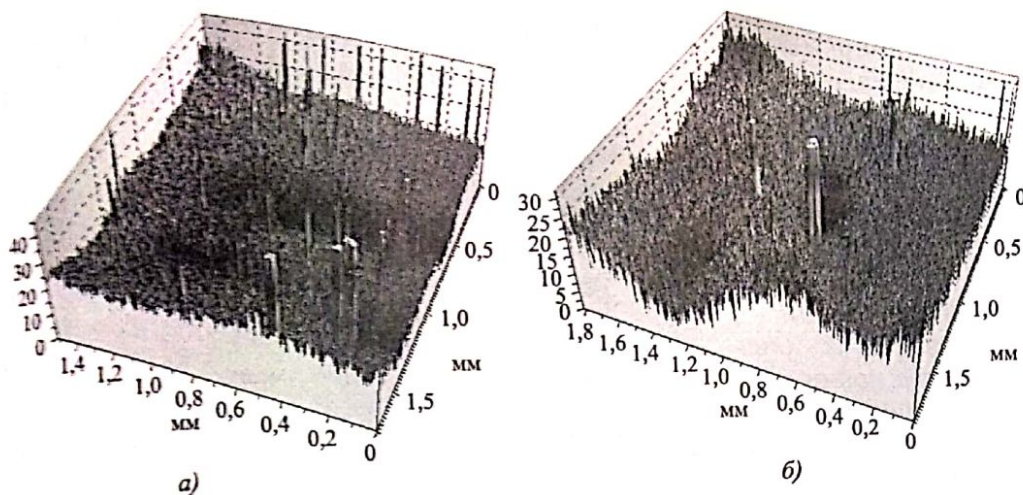


Рис. 7. Топограммы обработанных оптических поверхностей: а — ситалла CO115M; б — кварцевого стекла КУ1

режимах: глубина резания  $t = 1...2$  мкм, частота вращения шлифовального круга  $n_1 = 1000$  мин<sup>-1</sup>, частота вращения шпинделя заготовки  $n_2 = 0,2$  мин<sup>-1</sup>, продольная подача заготовки  $S_{prod} = 0,0075$  м/мин. Диаметр вращения заготовки составил 120 мм. Для шлифования использован алмазный круг со следующими характеристиками: форма 12A2 45°, размеры круга — диаметр 100 мм, высота — 21 мм, посадочный диаметр — 20 мм, ширина алмазносного слоя — 6 мм,

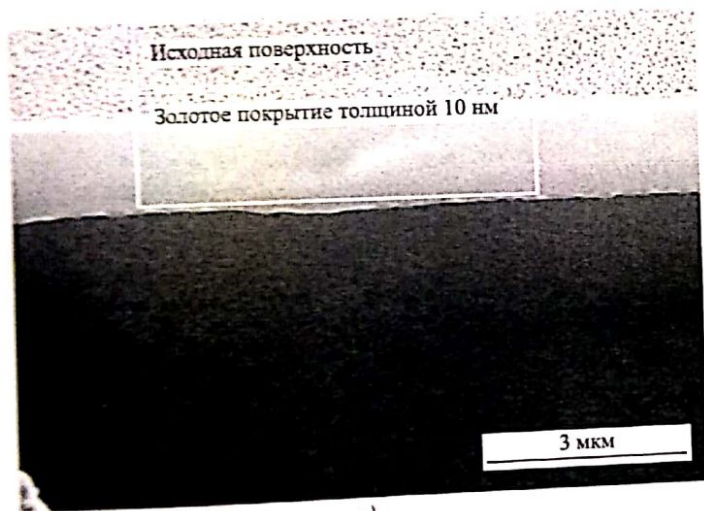
высота алмазносного слоя — 3 мм, алмазный порошок марки АСМ зернистостью 3/2 мкм, концентрация 100 %, марка связки — Б1.

Измерения шероховатости обработанных поверхностей проведены на оптическом профилометре модели Talysurf CCL 660. На рис. 7 приведены топограммы обработанных оптических поверхностей. Параметры шероховатости обработанных поверхностей составили  $Ra = 9...11$  нм,  $Rz = 44...65$  нм.

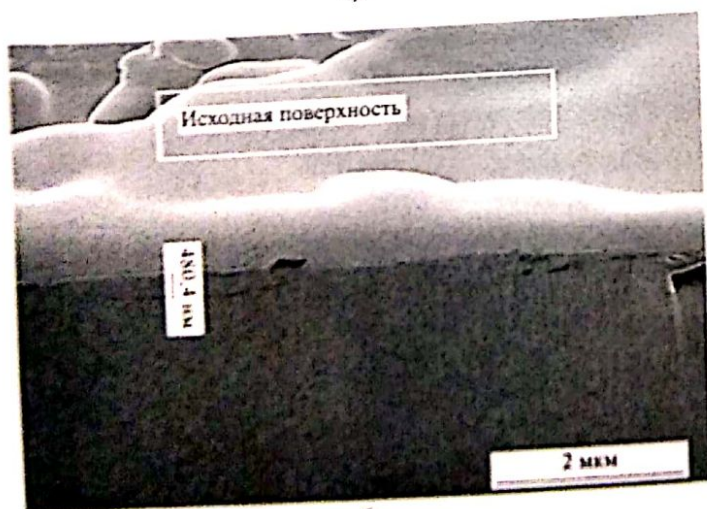
Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что при алмазном шлифовании оптических материалов по рекомендованным режимам можно создать условия для пластичного характера взаимодействия алмазного зерна и материала в зоне резания, что в совокупности обеспечивает шероховатость обрабатываемой поверхности по параметру  $Ra < 10$  нм. Кроме того, использование схемы шлифования с наклоном оси круга обеспечивает уменьшение глубины поврежденного слоя до 50 нм и менее. Минимальная глубина поврежденного слоя позволяет уменьшить величину рассеяния излучения, направленного на обработанную оптическую поверхность, эффективность, долговечность и добротность работы прибора в целом.

Глубина поврежденного слоя измерена методом ионно-лучевого травления. Используются нанотехнологический комплекс HeliosNanolab и электронный микроскоп TescanMira 3 LM. Измерения проведены в МИРЭА. Процесс измерения глубины поврежденного слоя образца, обработанного алмазным шлифованием, включает несколько этапов: очищение образца в ультразвуковой ванне; ионно-лучевое травление образца с постепенной увеличивающейся глубиной; исследование поверхностной структуры образца [10, 11].

На рис. 8 приведены изображения поврежденного слоя для образца ситалла CO115M, обработанного на рекомендованных режимах алмазного шлифования. Травление поверхности проведено



а)



б)

Рис. 8. Результаты контроля глубины поврежденного слоя образцов ситалла CO115M (масштаб 25 000:1): а — поверхность образца при пластичном деформировании; б — поверхность образца при хрупком скалывании

под углом 30° к обработанной поверхности на глубину 4 мкм. На рис. 8, б видна трещина глубиной 480 нм, которая образовалась в поверхностном слое. На рис. 8, а визуально трещины не наблюдаются, а значит, глубина поврежденного слоя составляет не более нескольких десятков нанометров.

Полученные параметры качества обработанных поверхностей кристаллов KDP, ситалла и кварцевого стекла доказывают, что при обработке рассматриваемых материалов на сверхточных станках, можно значительно сократить трудоемкость операции полирования, а в ряде случаев исключить эту операцию из технологического процесса. Погрешность формы обработанной оптической поверхности обеспечивается кинематической точностью оборудования и составляет не более 0,3 мкм при габаритных размерах заготовки 180×180 мм.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Saurav Goel, Xichun Luo, Paul Comley. Brittle-ductile transition during diamond turning of single crystal silicon carbide // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2013. Vol. 65. № 2. P. 15–21.
2. Blackley W.S., Sacttergood R.O. Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials // Precision Engineering. 1991. Vol. 13. № 2. P. 95–103.
3. Liu K., Li X.P., Liang S.Y. The mechanism of ductile chip formation in cutting of brittle materials // International

Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2007. Vol. 33. Iss. 9–10. P. 875–884.

4. Xianqun H., Chaoshui X. Specific Energy as an Index to Identify the Critical Failure Mode Transition Depth in Rock Cutting // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2015. Iss. 4. Vol. 49. P. 1461–1478.

5. Masahiko Y., Sivanandam A., Matsumura T. Critical depth of hard brittle materials on nano plastic forming // Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing. 2008. Vol. 2. № 1. P. 59–70.

6. Ультразвуковая обработка хрупких оптических материалов / Г.В. Боровский, М.А. Шавва, С.В. Грубый, А.Р. Маслов // Вестник машиностроения. 2015. № 91. С. 1–7.

7. Patten J.A., Gao W. Extreme negative rake angle technique for single point diamond nano-cutting of silicon // Precision Engineering. 2001. Vol. 25. Iss. 2. P. 165–167.

8. Экспериментальное определение границ хрупко-пластичного перехода при резании хрупких материалов / Е.М. Захаревич, В.В. Лапшин, М.А. Шавва, С.В. Грубый // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 7 (676). С. 64–71.

9. Шавва М.А. Методика расчета сил резания при алмазном шлифовании хрупких оптических материалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 2 (683). С. 61–69.

10. 3D mapping of subsurface cracks in alumina using FIB/ В.И. Inkson et al. // Materials Research Society. 2001. Vol. 649. P. Q.7.7.1–Q.7.7.6.

11. The effect of eigenstrain induced by ion beam damage on the apparent strain relief in FIB-DIC residual stress evaluation / E. Salvati et al. // Materials and Design. 2016. № 92. P. 649–658.

УДК 621.791.927.5

С.П. Сорокин, Г.В. Орлик, А.Г. Орлик, Н.В. Коберник, А.Л. Галиновский, Р.С. Михеев  
(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)  
E-mail: koberniknv@bmstu.ru

## Влияние защитного газа на структуру и свойства стойких против абразивного износа покрытий

Рассмотрено влияние состава защитного газа на структуру и износостойкость покрытий. Показано, что для обеспечения максимальной износостойкости необходимо ограничивать содержание углекислого газа в защитных смесях на базе аргона. Наибольшей износостойкостью обладают покрытия, выполненные с применением в качестве защитного газа 100 % Ar и 95 % Ar + 5 % CO<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** порошковые проволоки, наплавка, микроструктура, твердость, износостойкость, легирующий элемент, абразивный износ.

The influence of the protective gas composition on the structure and wear resistance of coatings is considered. It is shown that to ensure maximum wear resistance, it is necessary to limit the content of carbon dioxide in protective mixtures based on argon. The coatings made with the use of 100 % Ar and 95 % Ar + 5 % CO<sub>2</sub> as shielding gas have the highest wear resistance.

**Keywords:** flux-cored wires, surfacing, microstructure, hardness, wear resistance, alloying element, abrasive wear.

### Введение

Большая часть изделий, применяемых в различных отраслях промышленности, подвержены

абразивному износу. Такие изделия изнашиваются вследствие контакта с абразивом, что требует совершенствования технологий их производства и восстановления. При этом ведущую роль играют