

681.7(075)

1757



**КИЇВСЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**Л.В. Поперенко
Ю.Д. Філатов**

**ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ
ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ**

**Л.В. Поперенко
Ю.Д. Філатов**

Технологія обробки оптичних поверхонь

**Навчальний посібник
для студентів фізичного факультету**

НТБ ВНТУ



448414

УДК 535.521/522(075.8)

ББК 22.343я73

П57

Рецензент

канд. фіз.-мат. наук, доц. В. А. Одарич

*Рекомендовано до друку вченою радою фізичного факультету
(протокол № 1 від 9 вересня 2003 року)*

Поперенко Л.В., Філатов Ю.Д.

П57 Технологія обробки оптичних поверхонь: Навчальний посібник для студентів фізичного факультету. – К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2004. – 166 с.

ISBN 966-594-564-5

Присвячено вивченню широкого кола питань технології оптичного приладобудування, а саме, технології механічної обробки оптичних деталей. Розглянуто основи процесів обробки оптичних деталей. Теоретичний аналіз процесів формоутворення, шліфування та полірування оптичних поверхонь подано з урахуванням усталених підходів і новітніх науково-технічних розробок у галузі оптичної технології.

Розраховано на студентів, які спеціалізуються в напрямі лазерної та оптоелектронної техніки, оптики та спектроскопії, квантової електроніки, а також рекомендовано науковцям, що працюють у галузі оптичного приладобудування.

448414

КНИГОСХОВИЩЕ

ІНТЪ ВНТУ
М. ВІННИЦЯ

УДК 535.521/522(075.8)
ББК 22.343я73

ISBN 966-594-564-5

© Л.В.Поперенко, Ю.Д.Філатов, 2004
© Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ВПЦ "Київський університет", 2004

З М І С Т

ВСТУП	5
Список скорочень.....	6
Розділ 1	
ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ОПТИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ	7
1.1. Базування оптичних деталей при механічній обробці.....	7
1.2. Розмірні ланцюги.....	10
1.3. Креслення оптичних деталей.....	12
1.4. Показники якості оптичних деталей.....	13
1.5. Показники процесу формоутворення оптичних поверхонь.....	16
1.5.1. Продуктивність обробки, інтенсивність зносу та коефіцієнт відносного зносу робочого шару інструменту.....	17
1.5.2. Стан поверхні робочого шару інструменту та оброблюваної деталі.....	17
1.5.3. Параметри мікропрофілю оптичної поверхні.....	18
1.5.4. Класи чистоти оптичних поверхонь.....	20
1.5.5. Точність форми обробленої поверхні оптичної деталі.....	21
1.6. Інструменти та обладнання для обробки оптичних деталей.....	25
1.6.1. Конструкція та характеристика алмазного інструменту.....	25
1.6.2. Особливості застосування алмазного інструменту при обробці оптичних деталей зі скла.....	28
1.6.3. Обладнання для механічної обробки оптичних деталей.....	34
Розділ 2	
ОСНОВИ ФОРМОУТВОРЕННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ	35
2.1. Процеси механічної обробки оптичних поверхонь.....	35
2.2. Технологічні системи процесів механічної обробки оптичних деталей.....	41
2.3. Спосіб вільного притирання.....	45
2.4. Схеми розташування припуску.....	47
2.5. Незалежні параметри керування процесом обробки.....	48
2.6. Елементи налаштування верстатів.....	50
Розділ 3	
ШЛІФУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ	53
3.1. Механізм зняття оброблюваного матеріалу при шліфуванні оптичних поверхонь.....	53
3.2. Алмазний інструмент для шліфування оптичних поверхонь.....	57
3.3. Конструкція робочого шару інструменту.....	57
3.4. Характеристика робочого шару інструменту.....	61
3.5. Вплив режимних і кінематичних параметрів процесу шліфування на точність формоутворення оптичних поверхонь.....	63
Розділ 4	
ПОЛІРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ	69
4.1. Історія розвитку уявлень про процес полірування оптичних поверхонь.....	69

4.2. Кластерна модель зносу оптичної поверхні при поліруванні.....	69
4.3. Взаємодія поверхонь оброблюваної деталі та інструменту в процесі полірування.....	71
4.4. Хімічні та механіко-хімічні процеси при поліруванні оптичних поверхонь.....	79
4.5. Взаємодія диспергованих часток оброблюваного матеріалу та інструменту.....	81
4.6. Адсорбція, хемосорбція та повторна полімеризація кремнезему на поверхні інструменту. Ефект Брауна.....	82
4.7. Особливості полірування поверхонь оптичних деталей у нерівноважному процесі.....	84
4.8. Критерії вибору полірувального порошку та матеріалу зв'язувального полірувального інструменту.....	91
4.9. Критерій вибору мастильно-охолоджувального технологічного середовища.....	93

Розділ 5

МЕХАНІЗМ УТВОРЕННЯ МІКРОРЕЛЬЄФУ ОПТИЧНОЇ ПОВЕРХНІ.....	95
5.1. Розподіл часток зносу за розмірами.....	95
5.2. Механізм утворення мікрорельєфу обробленої поверхні.....	97
5.3. Розрахунки параметрів шорсткості оптичних поверхонь.....	100
5.4. Комп'ютерне моделювання мікрорельєфу обробленої поверхні.....	101
5.5. Мікропрофіль полірованих поверхонь прецизійних оптичних деталей.....	105

Розділ 6

МЕХАНІЗМ ФОРМОУТВОРЕННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ.....	111
6.1. Закономірності утворення макрорельєфу оптичної поверхні.....	111
6.2. Формоутворення плоских поверхонь оптичних деталей при обробці методом притирання.....	112
6.3. Формоутворення сферичних поверхонь оптичних деталей.....	120
6.4. Формоутворення циліндричних поверхонь оптичних деталей.....	129

Розділ 7

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ.....	133
7.1. Технологічні процеси обробки типових оптичних деталей.....	133
7.1.1. Технологічний процес виготовлення плоскопаралельних пластин.....	136
7.1.2. Технологічний процес виготовлення лінз.....	137
7.1.3. Технологічний процес виготовлення призм.....	139
7.2. Обробка поверхонь специфічних оптичних деталей.....	140
7.2.1. Оптичні деталі зі скла.....	141
7.2.2. Оптичні деталі з кристалів.....	144
7.2.3. Оптичні деталі з полімерних матеріалів.....	146
7.2.4. Волоконні елементи.....	148
7.2.5. Оптичні деталі квантових генераторів.....	151
7.2.6. Деталі металооптики.....	155
7.2.7. Деталі інтегральної оптики.....	160
7.3. Перспективи розвитку оптичної технології та впровадження нових наукових розробок.....	160
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	162

ВСТУП

Технологія, як самостійна галузь, набуває все більшого розвитку поряд з наукою і технікою, які вже давно мають чіткі організаційні форми. Якщо раніше технологія входила до сфери техніки і лише в окремих випадках (у лазерній, обчислювальній, електронній і атомній техніці) існувала як самостійна сфера, то зараз вона інтенсивно розвивається і, більш того, є необхідною передумовою подальшого розвитку науки і техніки. З погляду на це, будь-яка, навіть суто наукова проблема може бути вирішена лише за умови розв'язання низки технологічних задач, які все більше ускладнюються і переходять на рівень високих технологій. Саме завдяки досягненням технології було вирішено багато наукових проблем: явище дисперсії світла було відкрито Ньютоном за допомогою виготовленої ним тригранної призми; швидкість поширення світла виміряна Майкельсоном завдяки можливості виготовлення особливо точних плоских дзеркал; лазер, інші напівпровідникові та електронні прилади створено завдяки розробці технології та обладнання для виготовлення матеріалів високої чистоти з точним дозуванням домішок; сучасні ЕОМ розроблено на базі планарних технологій виготовлення інтегральних схем тощо. Безпосередній взаємозв'язок між наукою та технологією (залежна від науки, технологія стає необхідною основою для самої науки) зберігається й сьогодні. Наприклад, розробка фірмою "Optoster AG/Euteils" (США) мініатюрного кристалічного диска з об'ємом інформації 1 Терабайт, що перевищує об'єм 10^7 звичних CD-дисків, теж є наслідком інтенсивного розвитку технології. Створення нового покоління обчислювальної техніки – оптичного комп'ютера на базі оптичних пристроїв пам'яті, оптоелектронних перетворювачів та бістабільних оптичних елементів – стане можливим лише на належно високому рівні технології.

Технологія (від грецьк. "techné" – мистецтво, майстерність, вміння, "logos" – вчення, поняття) – широка й багатогранна галузь науки, яка вивчає і розробляє виробничі засоби і методи отримання й обробки матеріалів, виготовлення машин, механізмів, верстатів, приладів та виробів різного призначення й застосування. Технологія оптичних деталей є одним із розділів загальної науки – технології машинобудування (оптичного приладобудування), а спеціальний курс "Технологія обробки оптичних поверхонь" вивчає ще більш вузьке коло питань технології, а саме, технологію механічної обробки оптичних деталей.

З використанням методик підготовки спеціалістів-технологів оптичного приладобудування, перевірених протягом десятиріч у Санкт-Петербурзькому Інституті точної механіки та оптики і МДТУ ім. М.Е.Баумана (м. Москва, Росія), у посібнику представлено матеріали, на основі яких студенти повинні не тільки здобути знання про існуючі технологічні процеси обробки оптичних поверхонь, а й оволодіти теоретичними основами їх розробки. Отже, основна увага курсу

лекцій "Технологія обробки оптичних поверхонь" направлена на вивчення фізико-хімічних закономірностей формоутворення оптичних поверхонь на базі сучасних уявлень про процеси контактної взаємодії твердих тіл при терті і теоретичне обґрунтування існуючих технологій обробки та аналіз явищ, які відбуваються в процесі остаточної обробки оптичних поверхонь. Водночас, зберігається спрямування спецкурсу на інженерну підготовку студентів (завдяки збереженню всього об'єму інформації, який стосується практичного досвіду обробки оптичних поверхонь і використання загальноновживаних в оптичному виробництві понять і термінів, а також стандартів цієї галузі знань).

При упорядкуванні посібника вважалося, що студенти оволоділи знаннями з загального курсу фізики і прослухали спеціальні курси "Основи теорії та методів розрахунку оптичних систем", "Оптичне матеріалознавство" та "Інженерна графіка". У списку рекомендованої для вивчення літератури автори пропонують актуальні дотепер підручники та монографії, написані в 70–80-х роках минулого сторіччя, в яких подано загальні принципи побудови технологічних процесів обробки оптичних поверхонь. Новітні наукові результати і технологічні процеси механічної обробки оптичних поверхонь (наприклад, процеси тонкого і надтонкого алмазного шліфування та полірування за допомогою інструментів зі зв'язаним полірувальним порошком), подано на основі статей, виданих друком у журналах "Оптико-механическая промышленность" ("Оптический журнал"), "Оптика и спектроскопия", "Сверхтвердые материалы", "Трение и износ", "Optical Engineering" та ін.

Список скорочень

АС	марка шліфпорошків із синтетичних алмазів.
АСМ, АСН	марки мікропорошків із синтетичних алмазів.
ВПІД	верстат-пристрій-інструмент-деталь.
МОТС	мастильно-охолоджувальне технологічне середовище.
ОД	оптична деталь.
ОП	оптична поверхня.
НТАШ	надтонке алмазне шліфування.
ТАШ	тонке алмазне шліфування.
$k_i(r)$	коефіцієнт заповнення поверхні інструменту робочим шаром за коловими зонами радіуса r .
K_i	інтегральний коефіцієнт заповнення поверхні інструменту робочим шаром.
σ	коефіцієнт рівномірності зносу робочого шару інструменту.
Q	продуктивність обробки.

Розділ 1

ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ОПТИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

Оптичні поверхні (ОП) відрізняються від поверхонь деталей машинобудування насамперед тим, що вимоги, які до них висуваються, більш жорсткі (на 2-3 порядки). Це пов'язано з функціональним призначенням оптичних поверхонь: якість зображення оптичної системи прямо залежить від якості обробки поверхні (її шорсткості, точності геометричної форми та оптичної чистоти).

Оптичні поверхні – це поверхні, які утворюють оптичну деталь (ОД). Залежно від призначення оптичні поверхні розподіляються на *виконавчі*, *допоміжні* та *вільні*.

Виконавчі поверхні призначені для виконання оптичною деталлю свого службового призначення. Вони пропускають, відбивають пучок світла, змінюють його напрямки чи напрямки збіжності. Виконавчі поверхні — це поліровані сферичні, плоскі і несферичні поверхні тіл обертання. Параметри шорсткості виконавчих поверхонь перебувають у межах 13-14 класів. При зазначеній шорсткості на поверхнях можуть бути припустимі дефекти чистоти, кількість і розміри яких теж регламентуються.

Допоміжні (установочні) поверхні – шліфовані циліндричні та плоскі поверхні, які використовуються для закріплення оптичних деталей в оптичній системі, на них монтують та встановлюють металеві або пластмасові деталі оправ, упорів та плат. До них відносяться циліндричні поверхні лінз, бічні грані призм, торцеві грані пластин тощо. За точністю й якістю обробки допоміжні поверхні характеризуються відхиленнями розмірів і форми по системах посадок і допусків, прийнятих у машино- та приладобудуванні, а також шорсткості оброблених поверхонь.

Вільні поверхні оптичних деталей служать для виконання закінчених конструктивних і технологічних форм. Вільні поверхні – шліфовані плоскі, конічні та сферичні поверхні, які не контактують з поверхнями інших деталей і запобігають руйнуванню оптичних поверхонь за межами їх світлового діаметра (фаски на лінзах, призмах).

1.1. Базування оптичних деталей при механічній обробці

При розробці технологічних процесів механічної обробки ОД одним із основних моментів, з яким пов'язана точність та продуктивність обробки, є їх базування. **Базою** називають сукупність елементів (точок, ліній і поверхонь), щодо яких визначається місце розташування інших деталей оптичної системи. Положення ОД у просторі визначене (оптична деталь має базу), якщо задані її координати.

Для визначення положення твердого тіла в просторі необхідно задати координати 6 точок на його поверхнях. Положення поверхні визначається координатами трьох точок, які їй належать. Оптична вісь має положення, яке ви-

значається двома точками, які на ній розташовані. Положення точки визначається однією координатою.

ОД має **основну** і **допоміжну** бази. **Основна база** визначає розташування виконавчих оптичних поверхонь деталей оптичної системи та являє собою сукупність першої за ходом світлових променів виконавчої поверхні, оптичної осі й точки, у якій вони перетинаються. На схемі, зображеній на рис. 1.1, перша виконавча поверхня закоординована трьома точками 1, 2, 3, оптична вісь $1'-1'$ – двома точками (C і F'), точка перетину оптичної осі з першою виконавчою поверхнею – точкою 6. Ці шість точок однозначно визначають положення першої виконавчої поверхні A . Наступні за ходом світлових променів поверхні закоординовані з першою за допомогою розмірів "а", відкладених по осі $1'-1'$. Допоміжна база визначає положення поверхонь інших деталей по відношенню до ОД та положення оптичної деталі в оптичній системі.

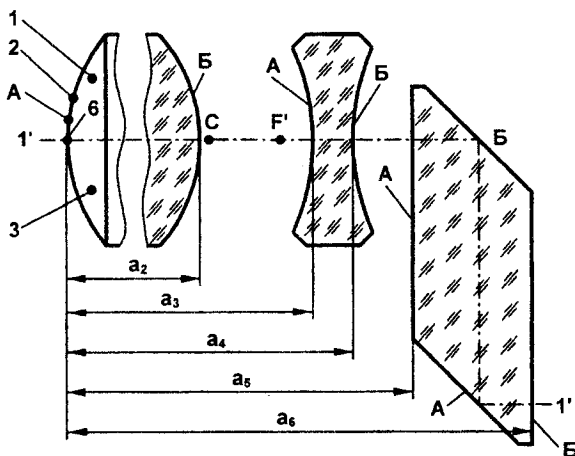


Рис. 1.1. Базування та розмірний ланцюг

Оптична система закоординована загальною оптичною віссю, що може потерпати злами, а також виходити з однієї площини, але обов'язково проходить через точки центрів симетрії по нормалі до першої й останньої по ходу світла виконавчих поверхонь оптичних деталей. Між цими поверхнями розташовані всі інші оптичні деталі. Якщо в системі є лінзи і призми, то оптична вісь може бути прямою і ламаною. Якщо система тільки лінзова, то загальна оптична вісь має бути прямою лінією. Відхилення осі від заданих напрямків указують на нецентричність системи.

Розташування на осі всіх наступних виконавчих поверхонь оптичних деталей залежить від розмірів, відкладених уздовж осі. Ці розміри утворюють ланки розмірного ланцюга, що складається з повітряних проміжків і конструктивних параметрів деталей.

Зміна відстаней між виконавчими діоптрійними поверхнями деталей змінює фокусування оптичної системи.

Відносно малі повороти виконавчих поверхонь оптичних деталей порушують центрування оптичної системи. Для визначення цих поворотів існує свій розмірний зв'язок.

Допоміжна база визначає розташування поверхонь інших деталей стосовно оптичних, а також місце розташування ОД у зібраному приладі. Допоміжні поверхні називають також монтажними чи складальними.

Сукупність неоптичних шліфованих поверхонь і ребер ОД, що визначає положення неоптичних деталей приладу стосовно оптичної системи, є допоміжною складальною базою. Між допоміжною й основною базами завжди є розмірні зв'язки, що визначають із припустимими відхиленнями як відстані, так і повороти елементів допоміжної бази щодо основної.

Елементами допоміжної конструкторської бази можуть бути центри сферичних поверхонь, точки фокусів лінз, центри отворів діафрагм, що розташовуються на оптичній осі системи.

Елементами допоміжної виміральної бази ОД в оптичній системі можуть бути точки фокусів, вузлові точки, головні площини, положення яких визначаються розрахунками згідно з законами променевої оптики. Для контролю розмірів і взаємного розташування допоміжних неоптичних поверхонь (діаметрів лінз, бічних поверхонь, ребер призм тощо) звичайно використовують шліфовані неоптичні поверхні деталей.

Ланки розмірних ланцюгів оптичних систем складаються як із нематеріалізованих розрахункових, так і з матеріалізованих конструктивних параметрів. Наприклад, оптична вісь, головні і вузлові точки, точки фокусів є елементами схованої нематеріалізованої бази, які не можна використовувати як елементи технологічної бази.

Технологічні бази – сукупність поверхонь, ліній і точок, які використовують для визначення положення заготовки в процесі її механічної обробки. Технологічні бази теж поділяються на основні та допоміжні. Основні технологічні бази використовують для визначення положення виконавчих поверхонь у процесі їх обробки або складання оптичної системи. Допоміжні технологічні бази використовують для визначення положення допоміжних поверхонь відносно виконавчих у процесі обробки.

За принципом єдиності баз усі поверхні ОД потрібно обробляти та вимірювати на всіх операціях механічної обробки при використанні однієї й тієї ж технологічної бази, тобто з однієї установки. Зміною баз називають заміну одних елементів бази іншими. Зміна баз призводить до збільшення похибок обробки, але використовується при обробці ОД тому, що, як правило, з однієї установки оптичну деталь обробити неможливо.

У процесі виготовлення деталей проходить стадії від напівфабрикату, який після обробки першої поверхні перетворюється в заготовку, до оптичної деталі, якою стає заготовка після всіх операцій її обробки.

У проектуванні технологічних процесів базування є одним із головних моментів, що визначають можливий ступінь точності виконання розмірів деталі, складність технологічного оснащення та продуктивність обробки.

Специфіка операцій шліфування й полірування виконавчих поверхонь способом вільного притирання і різні способи кріплення заготовок значно впливають на вибір технологічних баз.

1.2. Розмірні ланцюги

Розташування виконавчих поверхонь ОД на оптичній осі (рис. 1.1) задається розмірами "а". Ці розміри і складають ланки *розмірного ланцюга*, який складається з лінійних розмірів ОД, що входять в оптичну систему, та повітряних проміжків між ними. Підкреслимо, що ланки розмірних ланцюгів оптичних систем складаються з матеріалізованих конструктивних параметрів і з нематеріалізованих, які визначаються розрахунками. Оптична ж вісь, головні та вузлові точки, точки фокусів являють собою елементи скритої нематеріалізованої бази, які неможливо використовувати як елементи технологічних баз.

Розмірний ланцюг лінзи

Основна конструкторська база лінзи визначає положення другої виконавчої поверхні даної лінзи і всіх наступних поверхонь інших лінз, які входять в оптичну систему. Елементи цієї бази – оптична вісь і точка фокуса. Обидві точки нематеріалізовані. Конструктивні елементи лінзи, а саме товщина d , та допуск на її величину Δd , замикають оптичний розмірний ланцюг з довжин окремих ланок – фокусних відстаней, відстаней між фокусами та сферичними поверхнями, відстаней між головними площинами. Ланцюги, які визначаються радіусами кривини поверхонь і товщиною лінзи, визначають розміри і взаємне розташування виконавчих поверхонь лінзи в оптичній системі.

Розміри $S_F, S'_{F'}$ і $d \pm \Delta d$ (рис. 1.2) визначають положення другої оптичної поверхні B стосовно першій A . Основні конструкторські елементи лінзи визначають при розрахунку розмірного ланцюга, який складається з оптичних ланок $f', -S_F, S'_{F'}$, що вказують у таблиці вимог до деталі, причому розмір $S'_{F'}$ як замикаючий має припустиме відхилення $\Delta S'_{F'}$.

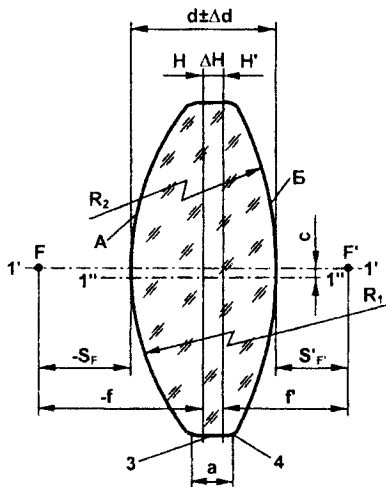


Рис. 1.2. Розмірний ланцюг лінзи

Оптичний розмірний ланцюг, який складається з довжин ланок $|f| + |-f'| + \Delta H - S'_{f'} - |-S_{f'}|$ замикає конструктивний розмір $d \pm \Delta d$. Конструктивні розміри R_1, R_2, d зв'язані залежностями променевої оптики. Відповідні ланки визначають розміри і розташування в оптичній системі матеріалізованих виконавчих поверхонь лінзи, щодо яких визначається положення оптичних поверхонь інших деталей.

Таким чином, розмірний лінійний ланцюг лінзи алгебраїчно точно не замикається. У формули, що наближено визначають ΔH і f , входять значення показника заломлення n . Значення ΔH визначається розміром d , який задають з певним допуском. Положення головних площин H і H' у лінзі також не є точно визначеним, тому що воно залежить від значень n і f' .

У вимірювальній базі лінзи матеріалізовані виконавчі поверхні A і B використовують для контролю значень відхилень кривини N і форми оптичної поверхні ΔN , що вимірюють у напрямку від допоміжної відлікової бази – поверхні оптичного калібру (пробного скла).

Поєднання конструкторської та вимірювальної баз і висока точність обробки оптичних поверхонь дозволяють відмовитись від контролю $S'_{f'}$, як довжини ланки розмірного оптичного ланцюга, і перейти до контролю відхилень розміру матеріалізованої ланки R від її номінального значення, яке визначається радіусом поверхні пробного скла.

Крім похибок, що виникають у лінійному розмірному ланцюзі через неправильне базування лінзи при обробці виконавчих поверхонь, з'являються ті, що пов'язані з їх відносним поворотом, яким створюють нецентричність лінзи. Навіть при заданому значенні d товщина лінзи по краю не однакова. Виміри товщини лінзи як лінійної відстані a між двома краями виконавчих сферичних поверхонь виявляються складними операціями і можуть привести до їх псування

Цю нецентричність лінзи виражають як паралельний зсув осі симетрії циліндричної поверхні відносно оптичної осі й вимірюють оптичними методами. Фокусна відстань f' як лінійна розмірна ланка між нематеріалізованими головною площиною і точкою фокуса лінзи вимірюють тільки оптичними методами. Товщина лінзи по оптичній осі визначається як довжина замикаючої ланки ланцюга $d \pm \Delta d$.

Оптичні виконавчі поверхні лінз зазвичай використовують як технологічну базу для установки і кріплення заготовки в процесі обробки. Для обробки другої поверхні необхідна зміна бази.

Розмірний ланцюг призми

Прямокутна призма розвертається у плоскопаралельну пластинку, її оптична вісь зламана під прямим кутсом і лежить в одній площині. Основна конструкторська база призми містить елементи: перша по ходу світлового променя виконавча ОП, оптична вісь і точки перетину нею граней призми. За величинами довжини ходу променів вздовж оптичної осі та світлового діаметра визначають розміри матеріалізованих ланок розмірних ланцюгів призми: довжини і площі катетних граней.

У головному перетині призми є два розмірні ланцюги: лінійних та куткових розмірів. Якщо ланки розмірного ланцюга куткових розмірів мають похибки, то призма не розгортається у плоскопаралельну пластинку. Ці похибки вносять клиноподібність у форму такої пластинки. Розмір катетів призми визначають після зняття фасок як відстань від поверхні, що утворена катетними гранями, до схованої нематеріалізованої бази деталі – лінії перетину продовження граней. Висоту призми й похибку її виміру визначають як відстань між матеріалізованими базами: гіпотенузою виконавчою поверхнею та ребром прямого кута.

Виконавчі поверхні служать елементами вимірювальної бази при контролі кута призми 90° за допомогою гоніометра чи іншими методами. Неоптичні поверхні служать елементами вимірювальної бази при визначенні ширини призми і установочною базою при складанні оптичної системи. Якщо виконавчі поверхні виконані плоскими, то фокусна відстань призми нескінченно велика. Це з достатньою точністю контролюється пробним склом за відсутністю кривини виконавчих граней призми. Похибки форми цих граней призводять до діоптрійності призми, унаслідок чого погіршується її роздільна здатність.

1.3. Креслення оптичних деталей

Креслення ОД є вихідним документом для розробки технологічного процесу її виготовлення й контролю. Оптичні деталі на кресленнях зображуються згідно з загальними правилами, прийнятими в машино- та приладобудуванні, з тією відмінністю, що на них додатково показують особливі нормативні вимоги. Особливості креслень ОД такі:

- деталі розташовуються по ходу світлових променів, які мають напрямок "зліва–направо";
- числові значення радіусів сферичних виконавчих поверхонь позначають літерою "R";
- числові значення радіусів циліндричних поверхонь позначають літерою "R", перед якою вказують "циліндр";
- асферичні поверхні визначають рівнянням кривої профілю поверхні обертання;
- праворуч, у верхній частині креслення розташовують таблицю, в якій вказують вимоги до оптичного матеріалу і до ОД, а також дані розрахунків;
- внизу (у штампі) обов'язково вказують найменування деталі, марку скла чи іншого оптичного матеріалу, масу ОД;
- поверхні, які з'єднуються за допомогою клею, позначаються лініями подвійної товщини з літерою "K".

На рис. 1.3, як приклад, наведено креслення лінзи із скла марки Ф1. З нього видно й числові значення радіусів сферичних поверхонь, і товщину лінзи, і розміри та кут нахилу фасок тощо. У таблиці наведено дані про матеріал, з якого виготовляється ОД, гранично допустимі відхилення показників якості деталі, фокусну відстань і значення світлових діаметрів обох сферичних поверхонь.

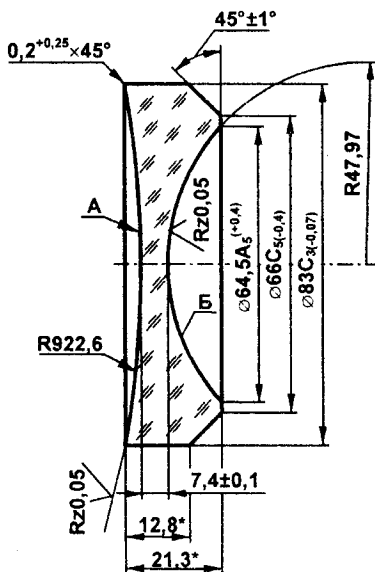
За кресленням деталі розробляють креслення заготовки для прийнятого технологічного процесу механічної обробки. На цьому кресленні вказують припуски на обробку, чистові розміри деталі і вимоги до матеріалу. Креслення заготовки необхідне для замовлення напівфабрикату.

1.4. Показники якості оптичних деталей

До показників якості ОД відносять гранично допустимі відхилення кривини і форми виконавчих ОП, гранично допустимі дефекти чистоти полірованих поверхонь, гранично допустиме відхилення від центричності лінз, пірамідності або різниці кутів призм, клиноподібності тощо.

Гранично припустимі відхилення стрілки кривини N_A , N_B виконавчих оптичних поверхонь A і B від стрілки кривини поверхні пробного скла виражають у числах інтерференційних кілець чи смуг ($N_A = 5$ і $N_B = 3$), що укладаються на діаметрі чи меншому розмірі деталі при контролі пробним склом (рис. 1.4).

У виробничих умовах інтерференційну картину зазвичай називають "кольором", тому що при освітленні білим світлом лінії мають райдужне забарвлення.



Однорідність	3
Світлопоглинання	0
N_A	5
ΔN_A	0,5
N_B	3
ΔN_B	0,3
C_A	1,0
C_B	0,02
P_A	V
P_B	VI
ΔR_A	$\pm 0,1\%$
ΔR_B	$\pm 0,05\%$
f'	-75,12
$S_{f'}$	78,66
$S'_{f'}$	$-75,35 \pm 2,12$
Св. \varnothing_A	76
Св. \varnothing_B	61

Рис. 1.3. Лінза зі скла

Радіус кривини сферичної поверхні, заданий на кресленні як $R \pm \Delta R_A$, вимірюють непрямым методом, через відхилення кривини полірованої оптичної поверхні деталі від вимірювальної бази – робочої поверхні пробного скла (оптичного калібру).

Виміри N надійні, якщо оброблювана поверхня має правильну сферичну форму. Показники N_A і N_B прямо пропорційні відхиленню кривини поверхонь від заданих радіусів.

У деяких випадках N_A і N_B вказують зі знаками плюс чи мінус. Це означає, що спостерігається повітряний проміжок на краю, а торкання в центрі (+) і пові-

тряний проміжок у центрі, а торкання на краю (–) (рис. 1.4). У виробничому побуті відхилення першого випадку прийнято називати "загальний бугор", а другого – "загальна яма". Для плоскої поверхні це означає, якщо знак "плюс", вона злегка опукла, а якщо "мінус" – злегка ввігнута.

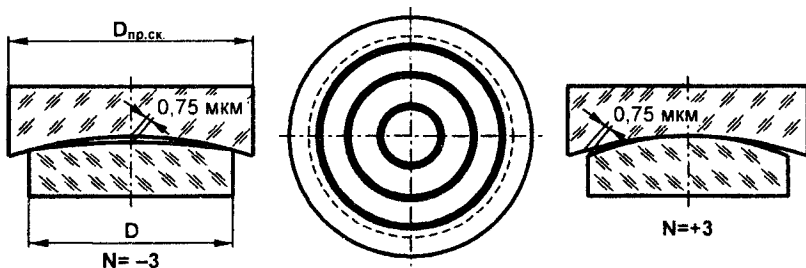


Рис. 1.4. Вимір відхилень кривини за допомогою пробного скла

Показники N_A і N_B при знаку плюс чи мінус можуть бути чисельно рівні, але інтерференційна картина буде різна. При знаку плюс лінії сходяться до точки прикладання сили натиску P , зберігаючи опуклість усередину, а червоне фарбування розташовано зовні лінії. Таку картину часто називають "широкий колір".

При знаку мінус лінії розходяться від точки прикладання сили натиску P , зберігаючи опуклість зовні, а червоне фарбування розташовано всередині ліній. Таку картину часто називають "вузький колір". Для плоских поверхонь загальні поняття "бугор" і "яма" зберігають своє значення.

Виміри значень показників N_A і N_B не залежать від того, замикаються інтерференційні лінії в кільця чи являють собою скривлені смуги, і не залежать від симетричності розташування інтерференційної картини відносно центра деталі.

Значення N_A і N_B визначають за кількістю кілець, які спостерігаються на площі контакту деталі з пробним склом чи за величиною відношення $\Delta t / t$, яке визначає ступінь зігнутих ліній (рис. 1.5).

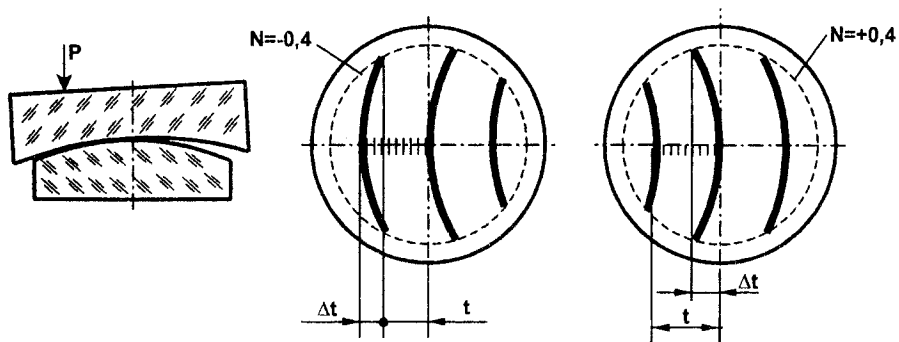


Рис. 1.5. Виміри відхилення кривини за смугами

Якщо на інтерференційній картині кільця витягнуті в одному й стиснуті в іншому напрямку чи вигнуті смуги не складають частину кола, то має місце загальне відхилення форми поверхні від сферичної.

Це відхилення називають астигматичністю поверхні. Геометрично це означає, що оптична поверхня стала сфероциліндричною. Значення астигматичності визначається як різниця кривості кілець, які спостерігаються у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Гранично припустимі відхилення форми виконавчих оптичних поверхонь. Гранично припустимі відхилення форми виконавчих оптичних поверхонь обчислюють для діаметра деталі D за формулою

$$\Delta N_D = (D/l)^2 \Delta N_M = (D/D_M)^2 \Delta N_M,$$

де l , D_M , ΔN_M – довжина, діаметр та значення місцевої похибки форми відповідно.

Похибки форми оброблених оптичних поверхонь ΔN поділяються на два типи: загальні й місцеві.

Загальні похибки форми – це звичайне утворення сфероциліндричної поверхні, яка в кожній точці має подвійну кривину. Це призводить до появи астигматизму, а під пробним склом з'являються витягнуті кільця або дуги, що не складають частини кола. Місцеві похибки форми бувають зональними, тобто симетричними відносно вершини сферичного сегмента, чи несиметричними в різних місцях поверхні. Зональні похибки визначаються як зміна відстані між інтерференційними кільцями, тобто як місцевий вигин кілець (рис. 1.6).

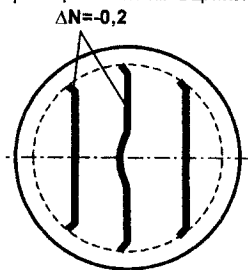


Рис. 1.6. Місцеві похибки форми

Ці вимоги настільки жорсткі, що обумовлюються кругові центральна, середня та крайова зони, у яких дефекти окремо регламентуються. Дуже важко не допустити появи подряпин і точок на полірованих оптичних поверхнях у зв'язку з тим, що головними причинами їхнього утворення є забруднення середовища, що оточує робоче місце оптика, і забруднення порошкоподібних шліфувальних і полірувальних матеріалів.

Гранично припустиме відхилення від центричності лінз C вказує на величину паралельного зсуву геометричної осі симетрії допоміжної циліндричної поверхні від оптичної осі виконавчих поверхонь лінзи. Це допуск на взаємне розташування двох виконавчих і одної допоміжної поверхонь лінз, їх відносний поворот чи зсув.

Децентричну лінзу можна уявити як комбінацію правильної лінзи і сферичного клина, що обумовлює різну товщину краю лінзи (рис. 1.7).

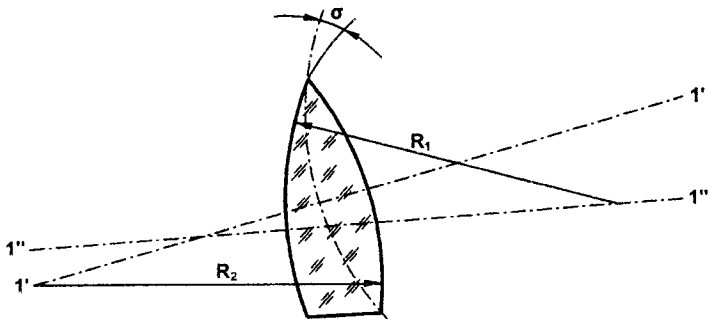


Рис. 1.7. Децентрована лінза

Нецентричність лінз викликає появу аберацій коми, астигматизму і поперечного хроматизму. Виникає нецентричність на перших операціях поштучної обробки і при блокуванні лінз через помилки базування під час установки заготовок.

Гранично припустиме значення пірамідальності призми – це непаралельність ребер призми чи непаралельність ребра одного з кутів до зовнішніх виконавчих граней у головному перетині призми. Для прямокутної призми це непаралельність ребра прямого кута гіпотенузній грані.

Пірамідальність являє собою допуск на взаємне розташування виконавчих оптичних поверхонь призми (їх відносний поворот) і виникає через наявність похибок обробки та технологічного базування.

Поряд із наведеними в оптичному виробництві використовують показники якості – гранично припустиме значення різниці кутів призми, припустиме значення роздільної здатності, довжину ходу променя в призмі, кут відхилення променя, світловий діаметр деталі, гранично припустиме значення клиноподібності.

1.5. Показники процесу формоутворення оптичних поверхонь

Формоутворення оптичних поверхонь при механічній обробці нерозривно пов'язане з процесами, що одночасно протікають: процесом зняття оброблюваного матеріалу, зносу робочого шару інструменту, процесами утворення мікропрофілю (шорсткість) і макропрофілю (точність форми) обробленої поверхні.

Для оцінки ефективності процесу формоутворення поверхонь оптичних деталей зі скла при їхній фінішній обробці алмазним інструментом використовуються наступні показники:

- продуктивність обробки Q ;
- інтенсивність зносу робочого шару інструменту в кожній точці його поверхні V ;
- коефіцієнт відносного зносу $-f$;
- рівномірність зносу робочого шару інструменту;
- стан поверхні робочого шару інструменту;
- стан обробленої поверхні деталі.

1.5.1. Продуктивність обробки, інтенсивність зносу та коефіцієнт відносного зносу робочого шару інструменту

Продуктивність процесу обробки поверхонь оптичних деталей визначається із співвідношення:

$$Q = \frac{\Delta h}{T_0}, \quad (1.1)$$

де Δh – величина знімання матеріалу з оброблюваної поверхні деталі; T_0 – час обробки.

Величина знімання матеріалу з оброблюваної поверхні деталі визначається за допомогою індикаторної голівки годинникового типу, що дозволяє виконувати виміри з точністю до 5 мкм.

Інтенсивність зносу робочого шару інструменту визначається за формулою

$$V = \frac{\Delta S}{T_0}, \quad (1.2)$$

де ΔS – величина зносу робочого шару інструменту.

Величина зносу робочого шару інструменту вимірюється за допомогою приладів "ИЗВ-1" (довжиномір) або "ИКВ-3" (оптиметр) і визначається за зменшенням товщини робочого шару за час обробки. Похибка вимірювань не перевищує 1 мкм.

Для вимірювання величини зносу інструменту в різних точках його поверхні, тобто для оцінки рівномірності його зносу, використовується вимірювальна скоба, доведена за плоскопаралельністю з нульовим відхиленням, яка встановлюється на інструментальному столі над інструментом. Індикаторна голівка, яка переміщується по вимірювальній скобі, може встановлюватися над будь-якою ділянкою робочого шару інструменту. Величину зносу робочого шару інструменту в десятих точках, що лежать уздовж його радіуса, визначають шляхом усереднення результатів виміру товщини до і після роботи.

Коефіцієнт відносного зносу визначається за формулою

$$f = \frac{V}{Q} = \frac{\Delta S}{\Delta h}. \quad (1.3)$$

Величина коефіцієнта відносного зносу показує, наскільки зношується інструмент при зніманні одиниці об'єму (у даному вигляді – одиниці лінійного зняття), залежить від характеристики робочого шару інструменту, його конструкції, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, параметрів процесу обробки і може бути використана для оцінки працездатності інструменту.

1.5.2. Стан поверхні робочого шару інструменту та оброблюваної деталі

Стан поверхні робочого шару інструменту використовується для оцінки його ріжучих властивостей. При зміні режимів обробки і характеристики шару інструменту істотно міняється і його працездатність. Засалювання інструменту негативно впливає на стан поверхні його робочого шару.

Крім того, рівномірність розподілу алмазних зерен або зерен полірувально-го порошку у зв'язці інструменту визначає не тільки стабільність його роботи, але й характер його зносу, що є вагомим фактором, який впливає на точність формоутворення оптичних поверхонь.

Стан поверхні робочого шару інструменту (алмазного шліфувального або полірувального) оцінюється за допомогою скануючого мікроскопа-аналізатора ("Камебакс" або "Кемскан-4ДВ"). Поверхня робочого шару інструменту досліджується до його роботи й після.

На рис. 1.8 представлено розподіл алмазних зерен АСН 20/14 у металевій зв'язці шліфувального інструменту та загальний вигляд робочого шару, з якого виступають окремі алмазні зерна.

Таким станом робочої поверхні характеризуються інструменти з високою працездатністю. Засалювання поверхні робочого шару інструменту не спостерігається, що обумовлює стабільне в часі й високе за величиною знімання оброблюваного матеріалу. Стан поверхні оброблюваної деталі в процесі тонкого, надтонкого шліфування й полірування оцінюється її мікро- та макропрофілем, за допомогою профілометричних, інтерферометричних, оптичних та інших методів.

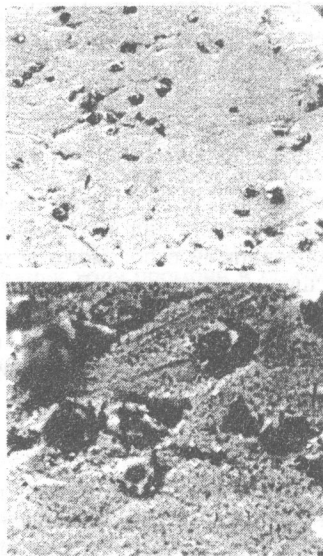


Рис. 1.8. Стан робочої поверхні алмазного шліфувального інструменту

1.5.3. Параметри мікропрофілю оптичної поверхні

До теперішнього часу для оцінки параметрів шорсткості ОП (параметрів мікропрофілю) користуються ГОСТ 2789-73, згідно з яким вводяться висотні та крокові параметри шорсткості й відносна опорна довжина профілю (6 параметрів). Цей стандарт поширюється на довільні поверхні, які використовують в усіх галузях промисловості. Винятком є шорсткість ворсистих матеріалів, матеріалів з раковинами, порами, тріщинами, подряпинами, вм'ятинами тощо.

На рис. 1.9 наведено мікропрофіль поверхні. Графік функції $y = y(x)$ являє собою залежність відхилення профілю y від координати x . Середня лінія m називається базовою лінією. Лінія виступів – це лінія, яка проходить через вершину найбільшого з виступів. H_{\max} паралельно базовій лінії. Лінія западин – це лінія, яка проходить через вершину найбільшої із западин H_{\min} паралельно базовій лінії. Область визначення функції обмежена лінією виступів (зверху) і лінією западин (знизу). Користуються відрізком базової лінії l – базовою довжиною, на якій виділяються нерівності для характеристики мікропрофілю.

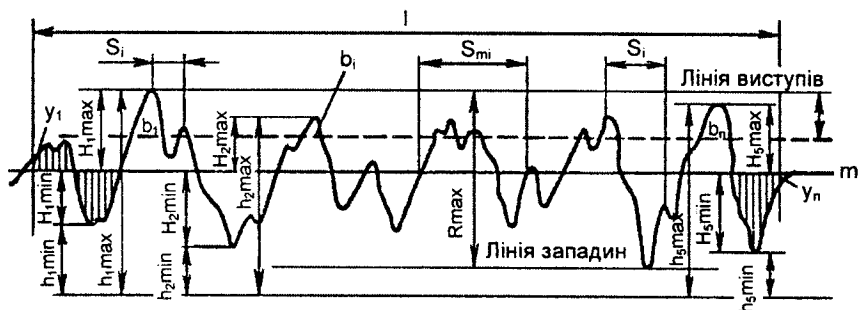


Рис. 1.9. Мікропрофіль поверхні

До висотних параметрів шорсткості відносять:

- середнє арифметичне відхилення профілю R_a , яке визначається при $x \in [0, l]$, тобто в межах базової довжини, за формулою

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx ; \quad (1.4)$$

- висота нерівностей профілю за 10 точками:

$$R_z = \frac{1}{10} \left[\sum_{i=1}^5 H_{i,\max} + \sum_{i=1}^5 H_{i,\min} \right] \quad (1.5)$$

- найбільша висота профілю R_{\max} – відстань між лініями виступів та западин.

Крокові параметри шорсткості:

- середній крок нерівностей профілю, визначається як середня величина S_m з n нерівностей по середній лінії m :

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi} ; \quad (1.6)$$

- середній крок місцевих виступів профілю (нерівностей за вершинами):

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i . \quad (1.7)$$

Відносна опорна довжина профілю

$$t_p = \frac{1}{l} \sum b_i, \quad (1.8)$$

де b_i – ширина виступу на рівні перерізу профілю p .

Позначення шорсткості поверхонь на кресленнях і в технологічній документації здійснюється згідно з ГОСТ 2.309-73 за допомогою символу $\sqrt{\quad}$, ліворуч від якого зверху вказують параметр R_a (іноді вказують і інші параметри, тоді їх значення записують стовпчиком), праворуч – значення базової довжини і напрямком нерівностей (стовпчиком). Для напрямку нерівностей використовуються позначки: "=" – при напрямку нерівностей паралельному напрямку обробки, " \perp " – при напрямку нерівностей, перпендикулярному напрямку обробки, "x" – при напрямку – перехрестя, "M" – при довільному напрямку, "c" і "R" – коловому і радіальному напрямках нерівностей.

При контролі шорсткості оброблених поверхонь оптичних деталей залежно від якості обробки поверхні (рівень шорсткості) базову довжину l вибирають відповідно до табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Базова довжина, середнє арифметичне відхилення профілю R_a
і рівень шорсткості оптичних поверхонь

Базова довжина, l (мм)	0,08	0,25	0,8	2,5	8,0
Середнє арифметичне відхилення профілю R_a (мкм)	< 0,025	0,025–0,4	0,4–3,2	3,2–12,5	12,5–100
Рівень шорсткості	13–14	9–12	6–8	до 5-го	до 3-го

Іноді для оцінки параметрів шорсткості поряд із вказаними використовуються значення параметрів $R_q(rms)$ – середнього квадратичного відхилення профілю і PV (аналогічного R_{max}), які введені відповідним американським стандартом.

1.5.4. Класи чистоти оптичних поверхонь

Класи чистоти оптичних поверхонь встановлюють за допустимими розмірами, кількістю й розташуванням дефектів (подряпин і точок) на поверхні ОД (у межах світлового діаметра) відповідно до ГОСТ 11141-84. Згідно з діючим стандартом дефекти на ОП поділяють на *подряпини*, *точки*, *скупчення дефектів* і *сітки подряпин*.

Подряпина – витягнута западина поверхні з співвідношенням розмірів більшої осі до меншої $b/a \geq 3:1$.

Точка – западина або виступ з $b/a < 3:1$. Діаметр точки визначається як $d = (a+b)/2$.

Скупчення дефектів – така сукупність точок і подряпин, в якій відстань між двома точками або точкою й подряпиною не більше 10 розмірів максима-

льного дефекту, а відстань між подряпинами не більше $100a$ (a – максимальна ширина подряпин).

Сітка подряпин – множина хаотично розташованих подряпин.

Залежно від розташування ОД в оптичній системі встановлюють такі класи оптичної чистоти (14 класів, позначаються Р):

- 1) 0–10; 0–20; 0–40 – для оптичних поверхонь, які розташовані у площині дійсного зображення або у площині предметів оптичної системи. Числа 10, 20 і 40 відповідають середнім значенням фокусної відстані оптичної системи, яка розташована за нормованою поверхнею. Для класу 0–10 у межах світлового діаметра $\varnothing_{\text{св}}$ виділяють центральну (діаметром $\varnothing_{\text{св}}/3$), середню ($\varnothing_{\text{св}}/3 < d < 2\varnothing_{\text{св}}/3$) і крайню ($d > 2\varnothing_{\text{св}}/3$) зони. У центральній зоні подряпин і точок з розмірами більшими 1 мкм взагалі не допускається, у середній – допускається наявність подряпин шириною 2 мкм при їх загальній довжині 0,2 мм і точок діаметром 4 мкм при кількості 1 ($\varnothing_{\text{св}} = 5\text{--}20$ мм), 3 ($\varnothing_{\text{св}} = 20\text{--}60$ мм) і 5 ($\varnothing_{\text{св}} > 60$ мм), а в крайній зоні – допускається наявність подряпин шириною 4 мкм при їх загальній довжині 0,3 мм і точок діаметром 6 мкм при кількості 3 ($\varnothing_{\text{св}} = 5\text{--}20$ мм), 6 ($\varnothing_{\text{св}} = 20\text{--}60$ мм) і 10 ($\varnothing_{\text{св}} > 60$ мм). Для класу 0–20 у межах світлового діаметра допускаються подряпини шириною 4–6 мкм і точки діаметром 10–15 мкм. Для класу 0–40 у межах світлового діаметра допускаються подряпини шириною 6–8 мкм і точки діаметром 15–25 мкм;
- 2) I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, VIIIa, IX, IXa – для оптичних поверхонь, які розташовані поза площинами дійсного зображення. Для класів PI–PIII допускаються подряпини шириною 4–6 мкм при загальній довжині 2 мм, точки діаметром 20–100 мкм і скупчення дефектів площею 0,004–0,020 мм². Для класів PIV–PVI допускаються подряпини шириною 2–6 мкм при загальній довжині 2 мм, точки діаметром 30–70 мкм і скупчення дефектів площею 0,1–3,0 мм². Для класів PVII–PIXa допускаються подряпини шириною 100–400 мкм при загальній довжині 1,5–2,0 мм і точки діаметром 1–3 мм (скупчення дефектів не нормуються).

Контроль ОП з метою визначення класу оптичної чистоти виконується за допомогою косо направленої пучка світла від лампи 60–100 Вт на фоні чорного екрана. При цьому, для визначення класів 0–10 – 0–40 користуються приладом з таким збільшенням, як в оптичній системі, але не менше 6^x . Для класів PI–PIII використовується лупа або мікроскоп зі збільшенням $\geq 6^x$. Визначення класів PIV–PIXa здійснюється візуально.

Для позначення класу оптичної чистоти іноді використовують запис типу PV/PIV, в якому окремо враховується клас чистоти за подряпинами (перше число – PV) і точками (друге число – PIV).

1.5.5. Точність форми обробленої поверхні оптичної деталі

Форму обробленої поверхні деталі контролюють декількома способами. Точність форми (відхилення від площини) тонкошліфованих поверхонь контролюється за допомогою оптиметра "ИКВ-3", ціна поділки якого становить 1 мкм. Виміри здійснюються вздовж двох перпендикулярних один одному діаметрів обробленої поверхні. Площинність полірованих поверхонь контролюється за допомогою пробного скла. Такий спосіб визначення похибок форми полірованих поверхонь не може застосовуватися при неплоскостинності поверхні більше ніж 2 мкм у зв'язку з тим, що

повітряний проміжок при накладанні поверхні, яка контролюється, на поверхню пробного скла стає таким, що інтерференційні смуги не спостерігаються.

Відомі способи контролю площинності й клиноподібності оптичних деталей, які полягають у тому, що про них судять за інтерференційною картиною променів, відбитих від деталі з прозорого матеріалу, товщина якої через похибку форми оброблених поверхонь неоднакова. Такий вид інтерференції (інтерференція рівної товщини) можна використовувати для контролю клиноподібності ОД і неплоскості її оброблених поверхонь. Для їх одночасного визначення використовується метод, суть якого полягає в наступному.

Відстань між інтерференційними смугами, які утворюються променями, відбитими від клиноподібної пластинки з кутом клина α_{kl} , визначається за формулою

$$\tilde{l} = \frac{\lambda}{2n\alpha_{kl}}, \quad (1.9)$$

де \tilde{l} – відстань між смугами інтерференції; n – показник заломлення матеріалу пластинки; λ – довжина хвилі світла.

З (1.9) випливає, що за відстанню між інтерференційними смугами можна визначити клиноподібність пластини.

Оброблена деталь являє собою клиноподібний диск з поверхнями, які в перетині визначаються кривими другого порядку. З невеликою похибкою їх можна розглядати як конічні. Переріз обробленої деталі (у діаметральному напрямку) представлено на рис. 1.10.

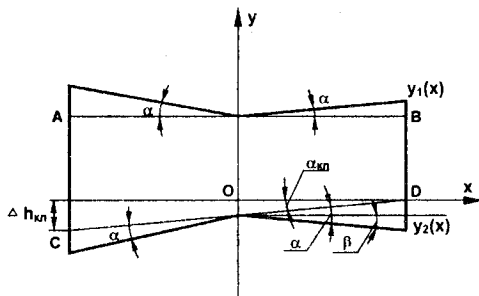


Рис. 1.10. Діаметральний переріз ОД

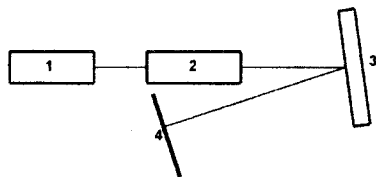


Рис. 1.11. Схема експериментальної установки для визначення клиноподібності та відхилення від площинності ОД

Оскільки з формули (1.9) випливає, що відстань між інтерференційними смугами не залежить від координати x (рис. 1.10), то при $x = 0$ (при відбиванні променів, які інтерферують, від геометричного центру поверхні деталі) вона буде визначатися кутом клина α_{kl} . При зміні x відстань між смугами інтерференції буде визначатися й клиноподібністю деталі (внесок клиноподібності) і неплоскості оброблених поверхонь (внесок неплоскості). Тобто відстань

між смугами інтерференції несе в собі інформацію відразу про два параметри – клиноподібність деталі і неплосцинність її поверхонь.

Величина клиноподібності на діаметрі D обробленої деталі визначається за відстанню між смугами інтерференції променів, відбитих від її центру, згідно з формулою

$$\Delta h_{kl} = \frac{\lambda}{2nl_0} \cdot D. \quad (1.10)$$

Для визначення неплосцинності оброблених поверхонь N , припускаючи, що форма обох оброблених поверхонь деталі однакова (рис. 1.10), використовують формулу

$$N = \frac{\lambda}{2n} \left[\frac{2}{l_R} - \frac{1}{l_0} \right] \frac{D}{2}, \quad (1.11)$$

де l_0 , l_R – відстань між смугами інтерференції променів, відбитих від центру деталі та її краю відповідно.

Переміщуючи деталь у напрямку перпендикулярному напрямку відбитих від її поверхні променів, можна визначати її клиноподібність і неплосцинність, причому координати центру й краю визначати немає потреби, оскільки мінімальна відстань між інтерференційними смугами відповідає l_0 , а максимальна – l_R .

Для визначення зазначених параметрів зазвичай використовують установку, схему якої наведено на рис. 1.11. Пучок світла діаметром порядку 2 мм з довжиною хвилі $\lambda = 6328 \text{ \AA}$, який генерується гелій-неоновим лазером, проходить телескопічну систему й направляється на поверхню досліджуваної деталі. На екрані (4) спостерігаються інтерференційні смуги, відстань між якими визначається за кількістю ліній, які розташовані на ділянці довжиною 10 мм.

Використовується також методика контролю клиноподібності й неплосцинності поверхонь ОД без їх розблокування, тобто в процесі обробки (рис. 1.12).

Установка містить: джерело монохроматичного когерентного випромінювання (лазер) 1; телескопічну систему 2, оптична вісь якої збігається з віссю джерела 1; блок оптичних деталей 3, розташований у такий спосіб, щоб поверхня, яка контролюється, була паралельна цій же осі; екран 4, розташований під кутом близьким до прямого стосовно оптичної осі системи. Для поділу променів і одночасного спрямування їх у центр і на край контрольованого блоку ОД установка містить дві однакові призми АР – 90° , зміщені одна відносно одної на відстань, яка дорівнює довжині ребер.

Світловий потік, що виходить із телескопічної системи, направляється в центр контрольованого блоку (через призму 6) і на його край (через призму 5). Відбившись від обох поверхонь оптичних деталей, світлові пучки інтерферують, утворюючи інтерференційні смуги рівної товщини на екрані 4. При відбиванні променів від центру на екрані спостерігається інтерференційна картина, відстань між смугами на якій l_0 . При відбиванні променів від поверхні оптичної деталі, яка розташована на краю блоку, спостерігаються інтерференційні смуги, відстань між якими l_R .

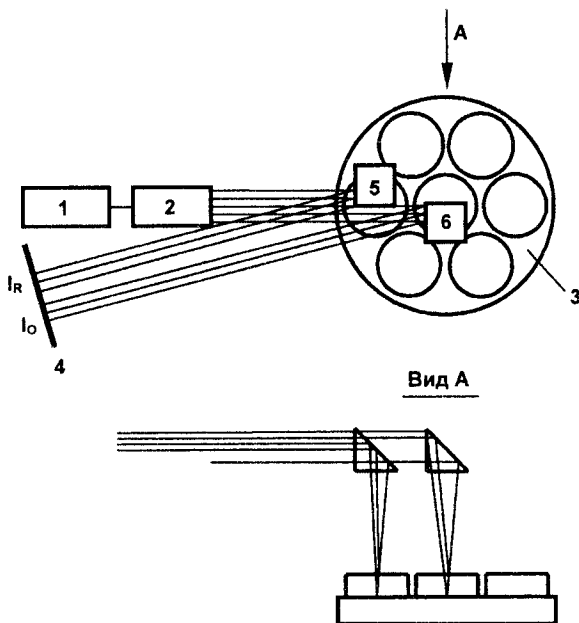


Рис. 1.12. Установка для контролю блоків ОД

Визначаючи товщину оптичних деталей, розташованих на блоці, залежно від координати x (уздовж радіуса блоку) і визначаючи значення кутів клина і неплочинності обробленої поверхні за відстанню між інтерференційними смугами, розраховують відхилення площинності обробленої поверхні блоку оптичних деталей:

$$N = \frac{\lambda}{4n} \left[\frac{1}{l_R} - \frac{1}{l_0} \right] D_{bl}, \quad (1.12)$$

де N – відхилення від площинності обробленої поверхні блоку ОД; D_{bl} – діаметр блоку ОД.

Таблиця 1.2

Класи точності оптичних поверхонь

Клас точності	Характеристика	Відхилення стрілки кривини, N , інтерференційних кілець	Відхилення форми ΔN , інтерференційних кілець
1	найвища	0,05–1,00	0,01–0,05
2	висока	1,0–3,0	0,1–0,3
3	середня	3–10	0,3–2,0
4	низька	більше 10	не визначається

Параметри макропрофілю ОП характеризують точність її формування й визначаються як показники якості – гранично допустимі відхилення стрілки кривини (N) і форми (ΔN) (див. 1.4). Залежно від цих параметрів оптичні поверхні поділяються за класами точності (табл. 1.2).

1.6. Інструменти та обладнання для обробки оптичних деталей

У сучасних умовах висока ефективність процесів механічної обробки різних матеріалів, у тому числі й оптичних, визначається технічним рівнем інструменту з синтетичних алмазів. Різноманіття технологічних операцій, виконуваних при механічній обробці оптичних деталей, високі вимоги до продуктивності обробки та якості оброблених поверхонь, а також специфіка обробки різних видів ОП, обумовлюють необхідність використання алмазного інструменту різних форм, характеристик і типорозмірів. Залежно від вимог, які висуваються до оптичних деталей, їх призначення й виду оброблюваного матеріалу виконуються різні операції механічної обробки (різання, свердління, грубе шліфування, тонке шліфування, надтонке шліфування, полірування тощо) за допомогою алмазного інструменту різних конструкцій.

1.6.1. Конструкція та характеристика алмазного інструменту

Алмазний інструмент будь-яких форм і розмірів має корпус і алмазоносний шар, що складається з алмазних зерен, закріплених у зв'язці. Конструкція алмазного інструменту визначається конструкцією корпусу й конструкцією алмазоносного шару. Залежно від конструкції алмазний інструмент для обробки ОП поділяється на групи:

- ✓ відрізні круги;
- ✓ свердла;
- ✓ шліфувальні круги і головки;
- ✓ гнучкі та еластичні інструменти.

Технічні вимоги на алмазні інструменти, які застосовуються для обробки ОП, регламентуються загальними вимогами до алмазного інструменту згідно з ГОСТ 16181-82Е, а також правилами та нормами безпечної роботи зі шліфувальним інструментом (ГОСТ 12.3.023-80).

Корпуси алмазних шліфувальних кругів виготовляються зі сталі марок Ст3, 45 чи з алюмінієвого сплаву марок АК6, Д16. Корпуси відрізних кругів виготовляються з листової холоднокатаної сталі, сталі 9ХФМ чи 50М, 60М, 65М. При виготовленні відрізних сегментних кругів сегменти напаяються на корпус срібним припоєм ПСР-40.

Характеристика алмазоносного шару інструменту визначається маркою, зернистістю й концентрацією алмазних порошоків, а також зв'язкою.

Марка алмазного порошку визначається природою та властивостями алмазних зерен (природного або синтетичного алмазного порошку). Вибір марки

алмазного порошку визначається його працездатністю та ефективністю при виконанні того чи іншого виду обробки.

Зернистість алмазного порошку, що міститься в шліфувальному крузі, визначає продуктивність і чистоту обробки та встановлюється залежно від його призначення. Через те, що властивості алмазно-абразивного інструменту поліпшуються зі збільшенням розмірів зерен, а чистота обробки підвищується зі зменшенням цих розмірів, зернистість алмазного порошку є важливою характеристикою інструменту і правильність її вибору визначає ефективність його застосування.

Концентрація алмазного порошку в інструменті визначає об'ємний чи ваговий його вміст в алмазоносному шарі. В інструменті зі звичайними абразивними порошками їх вміст за об'ємом становить від 40 до 60 %. В алмазному інструменті через більш високі абразивні властивості алмаза вміст порошку може бути значно меншим і становить величину порядку 25 %. Умовно концентрація порошку в алмазоносному шарі виражається у відсотках, причому за 100% концентрацію прийнято вважати вміст алмазного порошку з масою 0,88 мг у мм^3 чи 4,4 карати в 1 см^3 алмазоносного шару, що відповідає 25 % за об'ємом.

Зв'язка, основним призначенням якої є забезпечення необхідної міцності закріплення зерен алмаза в алмазоносному шарі, має властивості, що визначають працездатність алмазного інструменту. Вибір зв'язки залежить від властивостей оброблюваного матеріалу, вимог до продуктивності і якості обробки, а також до стійкості інструменту.

Для виготовлення алмазного інструменту, який застосовується для обробки ОД, зазвичай використовують шліфпорошки із синтетичних алмазів АС4, АС6 і АС15, а також мікропорошки АСМ і АСН. Зернистість алмазних порошків визначається операцією обробки. Обробку оптичних деталей доцільно здійснювати в два і більше переходи (операції грубого шліфування, тонкого алмазного шліфування (ТАШ), надтонкого алмазного шліфування (НТАШ)), тому зернистість алмазного порошку в алмазоносному шарі інструменту встановлюється залежно від вимог за шорсткістю оброблених поверхонь. Концентрація алмазів в інструменті, звичайно, становить:

- 25–100 % – для грубих операцій обробки;
- 5–25 % – для ТАШ і СТАШ.

Інструмент для обробки ОД випускається на металевих, органічних, керамічних і еластичних (каучуковмісних) зв'язках. Найбільш широке поширення в інструментах для обробки ОД зі скла знайшли металеві зв'язки М2-01, М1-04, М3-01, органічні – В2-01, В1-02, В3-01 і керамічні – К2-01, К3-01. Порівняльну оцінку властивостей деяких металевих зв'язок приведено в табл. 1.3.

Як органічні зв'язки застосовують фенолформальдегідні смоли (бакеліти) різних марок у вигляді порошків або лаків, епоксидні смоли, деякі інші види синтетичних смол і гуми у вулканізованому стані (вулканіт). Для підвищення механічної міцності й зносостійкості алмазоносного шару у зв'язку вводять наповнювач. Для обробки оптичних матеріалів на операціях, зв'язаних з необхідністю інтенсивного знімання великих припусків, інструмент на органічній зв'язці

непридатний через низьку розмірну стійкість, що знижує точність обробки і викликає підвищення витрат алмазного порошку.

Таблиця 1.3

Антифрикційні властивості зв'язок і показники працездатності інструментів для обробки оптичних деталей зі скла

Марка зв'язки	Антифрикційні властивості зв'язок		Показники працездатності	
	Коефіцієнт тертя	Відносна зносостійкість	Продуктивність шліфування, см ³ /хв	Питомі витрати алмазного порошку, мг/дм ³
M6-14	0,26	0,75	6,3	0,048
M1-04	0,28	1,12	7,9	0,058
M6-15	0,33	0,60	5,6	0,068
M2-01	0,34	1,00	4,5	0,073
M1-05	0,42	0,38	5,0	0,200

Керамічні зв'язки для виготовлення алмазного інструменту застосовують у вигляді з'єднань оксидів, глинистих речовин з температурою спікання не вище 800° С. Крім того, при виборі складу зв'язки звертається велика увага на забезпечення достатньої механічної міцності й зносостійкості. Стійкість інструменту на керамічних зв'язках при обробці оптичних поверхонь низька, унаслідок чого його використання обмежене.

Металеві зв'язки для алмазного інструменту являють собою метали чи їх сплави, виготовлені шляхом пресування й спікання методами порошкової металургії. Після затвердіння металу в результаті охолодження, рівномірно розподілені в ньому алмазні зерна міцно закріплюються. Особливий вид металевих зв'язок являють собою зв'язки, одержані шляхом гальванічного осадження металу з електроліту, завдяки чому на корпусі інструменту закріплюються зважені в електроліті алмазні зерна. Круги на металевих зв'язках мають найбільш високу міцність і зносостійкість. Склад металевих зв'язок може бути різним і, залежно від нього, забезпечується відповідний ступінь міцності закріплення зерен в алмазозносному шарі.

Алмазні круги виконуються у вигляді 17 основних типових форм (більш як 200 різних типорозмірів).

Основні форми кругів:

- ◆ алмазні відрізни круги з зовнішньою ріжучою кромкою форми 1A1R;
- ◆ алмазні відрізни сегментні круги форми 1A1RSS;
- ◆ алмазні відрізни круги з внутрішньою ріжучою кромкою форми АКВР;
- ◆ свердла алмазні кільцеві АКС;
- ◆ круги плоскі прямого профілю форми 1A1;
- ◆ круги плоскі прямого профілю без корпусу форми А8;
- ◆ круги плоскі прямого профілю тристоронні форми 14U1;

- ◆ круги плоскі з двобічним конічним профілем форми 14EE1X;
- ◆ круги плоскі з напівкруглоопуклим профілем форми 1FF1X;
- ◆ круги плоскі з виточкою форми 6A2;
- ◆ круги плоскі форми 6A2Т;
- ◆ круги алмазні кільцеві форми 2A2;
- ◆ круги чашкові конічні форми 12A2 з кутом 45° ;
- ◆ круги плоскі з напівкругловвігнутим профілем форми 2F6V і 2FF6V;
- ◆ алмазні еластичні;
- ◆ алмазні еластичні круги для обробки екранів кінескопів форми АЭТ;
- ◆ алмазні збірні таблеткові інструменти (з алмазних таблеток АТ6).

1.6.2. Особливості застосування алмазного інструменту при обробці оптичних деталей зі скла

При виготовленні деталей різного призначення і конструктивного виконання значне місце займає операція різки, яка може виконуватися як вручну за допомогою алмазного склорізу, так і на спеціальних відрізних верстатах за допомогою алмазних відрізних кругів (рис. 1.13).

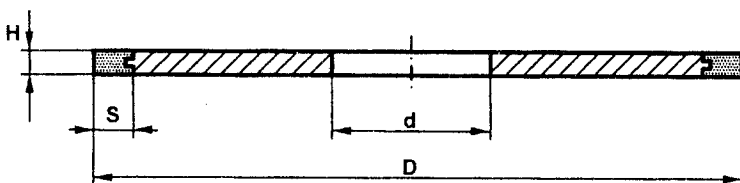


Рис. 1.13. Алмазний круг із зовнішньою ріжучою кромкою форми 1A1R

Особливості ручного різання скла склорізом, що складається з корпуса й алмазного різця (у вигляді чотиригранної піраміди з криволінійною ріжучою кромкою), полягають у тому, що процес різання має здійснюватись при вертикальній установці різця за швидкості його переміщення 0,3–0,4 м/с і величини сили натиску порядку 10 Н.

Різання напівфабрикатів для одержання заготовок, а також різання кускового скла та обробка шматків різанням, здійснюється за допомогою відрізних кругів (ГОСТ 10110-86) діаметром від 50 до 500 мм із прямокутним профілем робочої поверхні. Товщина ріжучої частини відрізних кругів залежно від діаметра та виду профілю становить 0,15–2,44 мм. Характеристика алмазоносного шару кругів: синтетичні алмази АС6, АС15, АС32, АС50 зернистість 100/80–160/125 і 400/315–500/400, концентрація 25–100 %, зв'язка – М2-01, М1-03, – вибирається залежно від виду матеріалу, що розрізається, його розмірів і вимог до якості поверхні пропилю. При установці відрізного круга на шпindelь верстата його радіальне биття не повинне перевищувати 0,04 мм (для діаметра до 100 мм),

0,05 мм (для діаметра до 400 мм) і 0,10 мм (для діаметра 450 і 500 мм), а торцеве биття регламентується залежно від висоти круга і точності й може становити величину від 0,03 до 0,25 мм. Як МОТС при різанні алмазними кругами використовуються емульсії на основі стандартних емульсолів при неодмінному надходженні рідини в зону обробки. Найбільш уживані режими різання: швидкість різання 25–35 м/с, швидкість подовжньої подачі 100–630 мм/хв залежно від виду матеріалу, що розрізається, і характеристики інструменту.

Для одержання отворів у деталях зі скла і вирізання круглих заготовок із пластин використовуються алмазні свердла діаметром від 0,5 до 450 мм. Використовуються кристалні (кристал алмазу, запаяний у корпус), стрижневі (циліндричний алмазосносний шар, закріплений на хвостовику), трубчасті (алмазна кільцева коронка на циліндричному корпусі) і сегментні кільцеві алмазні свердла. Найбільше поширення при свердлінні скла одержали трубчасті алмазні свердла. Ці інструменти забезпечують знімання оброблюваного матеріалу тільки на кільцевій ділянці, що дозволяє знизити осьове навантаження на інструмент, поліпшити умови подачі МОТС у зону різання та забезпечити високу продуктивність і якість обробки.

Для виготовлення стрижневих свердел використовуються алмазні порошки марки АСН зернистістю від 60/40 до 28/20 (метод гальваностерії) і марок АС15 – АС32 зернистістю від 100/80 до 50/40 (метод порошкової металургії). Для виготовлення кільцевих коронок застосовують алмазні порошки АС6–АС32, концентрація алмазів – 75 %. Сегменти для свердел великого діаметра виготовляються на зв'язці М2-01 з алмазів АС32 зернистістю 400/315 при концентрації 75 %. Режими алмазного свердління скла вибираються залежно від типу, розмірів і характеристики свердла, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу (коефіцієнта оброблюваності, мікротвердості) і вимог, запропонованих до шорсткості обробленої поверхні. Значення механічної подачі, що рекомендуються при свердлінні, призначаються з урахуванням коефіцієнта оброблюваності K і мікротвердості оброблюваного скла в порівнянні зі склом марки К8 ($K_0 = 1$). Частота обертання свердла може бути від 500 об/хв до 24000 об/хв, а величина подачі від 10 до 60 мм/хв. Як МОТС при алмазному свердлінні використовується технічна вода, різні водяні розчини емульсолів Е2, Е3, "Емус". Витрати МОТС встановлюється залежно від діаметра свердла і можуть становити величини від 1 л/хв (для свердел діаметром менше 5 мм) до 15 л/хв (для свердел великого діаметра).

У тих випадках, коли з кускового скла виготовляють круглі заготовки лінз чи оброблюють циліндричні бічні поверхні стрижнів оптичних квантових генераторів (ОКГ), чи виконавчі поверхні циліндричних лінз та інших виробів, а також внутрішні циліндричні поверхні, на операції круглого шліфування як інструмент застосовують алмазні круги плоского профілю форми 1А1 діаметрами від 50 до 280 мм на металевій зв'язці. Кругле внутрішнє шліфування застосовується для обробки внутрішніх циліндричних поверхонь отворів великих діаметрів після свердління чи розточення. При виготовленні оптичних деталей цей про-

цес можна використовувати для масової обробки отворів лімбів і виробів з досить великими точними отворами. Для внутрішнього шліфування застосовують алмазні круги форми 1A1 невеликих розмірів, а для обробки отворів малих діаметрів (не менше 10 мм) – круги форми A8.

При обробці заготовок оптичних деталей плоске шліфування виконується торцем алмазного круга. З цією метою використовують алмазні круги на металевій зв'язці стандартних форм.

За необхідності застосування інструменту діаметром більше 280 мм користуються збірними алмазними кругами, робоча поверхня яких складається з окремих алмазних елементів у вигляді сегментів, таблеток тощо, закріплених на корпусі інструменту.

Одержання плоских базових поверхонь у пресованих заготовках зі скла можливе із застосуванням операції шліфування за методом "жорстких осей", що забезпечує продуктивну обробку великих партій деталей. При обробці точних поверхонь оптичних деталей за методом притирання використовують збірні алмазні шліфувальні круги.

Ефективність роботи алмазного інструменту визначається інтенсивністю знімання оброблюваного матеріалу й зносостійкістю алмазозагартуваного шару і може змінюватися залежно від його характеристики, складу, конструкції, режимів процесу обробки, якості алмазного порошку і властивостей оброблюваного матеріалу. Для оцінки працездатності алмазного інструменту при обробці оптичних деталей зі скла, визначають величини, що характеризують його продуктивність і зносостійкість, а також ефективність використання алмазного порошку.

Продуктивність роботи алмазного інструменту характеризується кількістю матеріалу, що видаляється за одиницю часу (інтенсивністю знімання оброблюваного матеріалу), тобто визначається в г/хв чи в $\text{дм}^3/\text{хв}$.

В окремих випадках при виконанні операцій, що здійснюються певним видом інструменту, продуктивність його роботи може виражатися й в інших величинах, що побічно характеризують кількість матеріалу, який видаляється за одиницю часу. Так, при алмазному різанні скла як одиницю продуктивності прийнято використовувати величини $\text{дм}^2/\text{хв}$ чи $\text{м}^2/\text{год}$ площі розпилу. При свердлінні продуктивність процесу врізання визначається швидкістю врізання в $\text{дм}/\text{хв}$. В умовах масового виробництва при обробці тих самих виробів інструментом певного типорозміру продуктивність його роботи визначають кількістю виробів, оброблених за одиницю часу (у шт. за годину). В усіх приведених випадках можна перейти до вираження продуктивності у вагових чи об'ємних одиницях.

Стойкість алмазного інструменту залежить безпосередньо від зносостійкості алмазозагартуваного шару і властивостей оброблюваного матеріалу та визначається кількістю вилученого матеріалу, що припадає на одиницю ваги витраченого алмазного порошку. Виражається стійкість в одиницях ваги чи об'єму оброблюваного матеріалу на одиницю ваги алмазного порошку, тобто відповідно в г/мг, кг/кар чи у $\text{дм}^3/\text{кар}$. Для практичних цілей при обробці виробів з різних ма-

рок скла зручніше користуватися величиною, оберненою до стійкості, – питомими витратами алмазного порошку.

Питомі витрати алмазного порошку визначаються масою алмазного порошку, що витрачений на видалення одиниці маси чи об'єму оброблюваного матеріалу, і можуть бути ваговими чи об'ємними. При обробці оптичних матеріалів прийнято виражати питомі витрати алмазного порошку в кар/дм³. При різанні і свердлінні питомі витрати алмазного порошку виражаються відповідно в кар/м² площі розпилу і в кар/дм довжини чи глибини отвору. Норми питомих витрат звичайно відносяться до оптичного скла марки К8.

У деяких випадках як критерій для оцінки ефективності використання алмазного порошку застосовується величина, яка називається коефіцієнтом шліфування. Коефіцієнт шліфування являє собою відношення об'єму знятого матеріалу до об'єму витраченого алмазоносного шару $k = V_m / V_a$. Для інструментів з однаковою концентрацією алмазного порошку за величиною цього коефіцієнта можна судити про ефективність його використання. При порівнянні інструментів з різними концентраціями алмазного порошку доцільно користуватися показником питомих витрат, тому що при цьому визначаються витрати безпосередньо алмазних зерен на одиницю знятого матеріалу незалежно від характеристики інструменту.

Щоб розрахувати питомі витрати алмазного порошку, необхідно знати його загальну кількість, витрачену в процесі обробки, і кількість матеріалу, знятого при цьому. Для цього потрібно встановити масу чи об'єм зношеної за період обробки частини алмазоносного шару, від яких перейти до кількості безпосередньо витраченого алмазного порошку.

Найбільш поширені методи лінійного і вагового виміру зносу алмазоносного шару. Лінійний метод здійснюється шляхом вимірювання висоти або товщини робочої частини круга до і після деякого періоду його роботи. При цьому установлюють товщину частини алмазоносного шару, зношеної при зніманні оброблюваного матеріалу. Потім, за розмірами робочої поверхні й величини лінійного зносу розраховують об'єм зношеного шару і, за відомим вмістом алмазного порошку в одиниці об'єму (концентрації) установлюють загальні витрати алмазного порошку. Лінійний знос алмазоносного шару визначається за допомогою вимірювальних інструментів або приладів, що забезпечують точність не меншу за 0,001 мм. З погляду на це зручним є застосування мікронних індикаторів, деяких моделей вимірювальних мікроскопів, оптиметра ИКВ-3 і оптично-довжиноміра типу ИЗВ-1. Вибір методу і приладу для вимірів залежить від умов, в яких вони відбуваються. Наприклад, виміри можна здійснювати безпосередньо на верстаті без знімання інструменту зі шпинделя за допомогою індикатора, закріпленого у відповідній оправці, конструкція якої визначається формою й розмірами вимірювального інструменту та пристроями відповідних вузлів верстата.

При ваговому методі визначення зносу здійснюється за допомогою зважування інструменту (вагою до 0,2 кг). Це рекомендується робити на аналітичних терезах типу АДВ-200М. При зважуванні інструменту вагою до 1 кг необхідно використовувати технічні ваги типу Т1-1, більше 1 кг – ваги Т1-5. Необхідно, щоб при зважуванні інструменту він був ретельно очищеним від усіляких забруднень на всіх його поверхнях і просушеним для видалення вологи, що може міститися в поглибленнях на поверхні та в порах. Зважування оброблюваного виробу чи дослідного зразка виконують на технічних вагах.

Перевагами методу вагового визначення зносу алмазоносного шару є його простота, досить висока точність і можливість установа витрат алмазного порошку по всій робочій поверхні інструменту, унаслідок чого виключається вплив еволюції її форми в процесі роботи. До недоліків методу відноситься, насамперед, необхідність знімання круга з верстата для зважування, що викликає порушення його установки, що може вносити похибки при наступному визначенні витрат алмазного порошку. Крім того, на точність вимірів можуть впливати наявність забруднень і вологи на поверхні та в порах інструменту.

При обробці оптичного скла питомі витрати алмазного порошку прийнято виражати в каратах на кубічний дециметр знятого матеріалу (кар/дм³). Випробування алмазного інструменту для обробки оптичного скла, як правило, виконують на зразках або виробках зі скла марки К8. До скла цієї марки відносяться також норми питомих витрат алмазного порошку при виконанні різних операцій обробки. Тому для переходу від питомих витрат, віднесених до скла марки К8, до витрат при обробці скла іншої марки, необхідно враховувати його твердість при шліфуванні чи інший показник оброблюваності відносно скла К8.

При шліфуванні оброблювана заготовка обертається на нижньому шпинделі, а алмазний інструмент на верхньому шпинделі обертається і переміщається при осьовій подачі. Співвідношення між швидкостями обертання заготовки та інструменту, а також величиною подачі, визначають величину знімання скла за одиницю часу.

Залежно від швидкості обертання заготовки при постійних значеннях швидкості обертання інструменту й величини осьової подачі можливі такі варіанти.

За малої швидкості обертання виробу, тобто коли за один оберт знімається шар порівняно великої товщини, основну роботу руйнування скла виконують зерна, що розміщені на бічній циліндричній поверхні алмазоносного шару, площа якого досить велика. Алмазні зерна, що працюють по торцевій поверхні виробу виконують її зачищення. При такому врізанні алмазний інструмент і заготовка сильно нагріваються, процес часто супроводжується появою іскор. При нагріванні можуть відбуватися згоряння алмазного порошку, розм'якшення скла й розплавлювання зв'язки в поверхневих шарах, заповнення цими речовинами проміжків між зернами, притуплення зерен алмазного порошку і, як наслідок – "засалювання" інструменту й втрата стабільності процесу диспергування оброблюваного матеріалу.

За середньої швидкості обертання заготовки, контакт між зернами і склом на бічній поверхні інструменту вже значно менше, і зерна, розташовані на його торцевій частині, мають більш значне навантаження, ніж в попередньому випадку. Умови роботи зерен трохи поліпшуються, але все ще мають місце явища, перелічені вище, хоча й меншою мірою.

За великої швидкості обертання заготовки основну роботу диспергування виконують алмазні зерна, що розміщені на торцевій частині інструменту. Між поверхнями скла і зв'язки інструменту утворюється зазор, тому продукти зносу безперешкодно виносяться із зони обробки, інтенсивно охолоджується і змащується зона контакту, зв'язка зношується в основному внаслідок абразивного впливу на неї часток диспергованого скла. Завдяки цьому створюються сприятливі умови для самозагострення інструменту. Ріжучі властивості зерен алмазного порошку використовуються найбільш ефективно. Такий процес можна назвати вільним різанням, оскільки безпосередній контакт зі склом мають тільки зерна алмазного порошку, які працюють як маленькі різці.

Порівнюючи розглянуті схеми врізання зерен алмазного порошку і зносу зв'язки інструменту, можна дійти висновку, що оптимальні умови роботи інструменту виникають за режиму вільного різання. Для забезпечення такого режиму потрібно встановити необхідне значення величини глибини різання при роботі інструментів із різним за зернистістю й концентрацією алмазного порошку алмазоносним шаром. Для цього необхідно знати площу контакту робочої поверхні інструменту, кількість зерен алмазного порошку на площі контакту, величину виступаючих частин зерен, об'єм, який вони займають на площі контакту і об'єм знятого скла в межах площі контакту. Площа контакту алмазоносного шару з заготовкою залежить від форми і розмірів інструменту. Максимальна величина виступаючих частин зерен алмазного порошку, відповідно до даних різних авторів, становить у середньому – 0,3d.

Загальновідома закономірність будь-якого виду абразивної обробки, що полягає в тому, що зі збільшенням зернистості вільного чи зв'язаного порошку зростає інтенсивність знімання матеріалу і збільшується ступінь шорсткості обробленої поверхні. Для алмазного інструменту ця залежність пояснюється тим, що зі збільшенням розміру закріпленого у зв'язці алмазного зерна відповідно зростає величина його виступаючої частини і, завдяки цьому, відбувається більш інтенсивне руйнування оброблюваного матеріалу, що виявляється в підвищенні продуктивності знімання і збільшенні зруйнованого й рельєфного шарів шліфованої поверхні.

На підставі відомих експериментальних даних і практичного досвіду можна зробити висновок про вплив концентрації алмазного порошку на працездатність алмазного круга при обробці оптичного скла. Зі збільшенням концентрації алмазного порошку внаслідок збільшення кількості працюючих зерен знижуються величина складових сил різання, сила тертя, температура в зоні шліфування і лінійний знос робочої поверхні інструменту. Зменшення зносу сприяє зниженню питомих витрат алмазного порошку. Для кругів з алмазного порошку малих і вели-

ких зернистостей, а також низьких і високих концентрацій спостерігаються трохи різні закономірності впливу зміни величини концентрації на продуктивність знімання матеріалу і глибину мікронерівностей обробленої поверхні. При обробці кругами з розміром алмазних зерен до 50 мкм будь-яких концентрацій, а також кругами з алмазних зерен будь-яких зернистостей при концентраціях до 50%, зі збільшенням концентрації продуктивність знімання матеріалу зростає і збільшується шорсткість обробленої поверхні. Якщо зернистості алмазного порошку понад 50 мкм і концентрації більші за 50%, то зі збільшенням концентрації зменшуються продуктивність знімання матеріалу і ступінь шорсткості обробленої поверхні.

1.6.3. Обладнання для механічної обробки оптичних деталей

Залежно від виду оптичних деталей, їхнього призначення та операції механічної обробки (різання, свердління, шліфування, полірування тощо) використовується устаткування, яке можна умовно поділити на дві групи:

- ✓ металообробні верстати, за допомогою яких виконуються деякі загальні операції попередньої чи чорнової обробки заготовок;
- ✓ спеціальні верстати, призначені для виконання специфічних операцій технологічного циклу виготовлення оптичних деталей.

До першої групи відносяться плоскошліфувальні (ЗБ-756, МШ-155 та ін.), фрезерні (типу 6Р-80, ВФ-87 та ін.), круглошліфувальні (ЗВ-110, ЗБ-161 та ін.), універсальні (ЗВ-12, ЗБ-153 та ін.) і свердлильні (2Н-125, 2431 та ін.) верстати.

До спеціальних верстатів для алмазної обробки оптичних деталей відносяться: розпилювальні (ПК-200, ПК-400, К-8611, К-8618, РС-8607 для різання кругами з внутрішньою ріжучою кромкою – мод. 2405), круглошліфувальні (БШС-10), сферошліфувальні для грубого і тонкого шліфування (типу "Алмаз", ПШ, АШС-40, АШС-100, СТША, типів LP і PLM фірми "LOH" (Німеччина), JSM фірми "CMV" (Франція)), центрировочні (ЦС, АЦС, FOM-2 фірми "Dama" (Німеччина)), фасетировочні і верстати особливого призначення.

Розділ 2

ОСНОВИ ФОРМОУТВОРЕННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

2.1. Процеси механічної обробки оптичних поверхонь

Шліфування й полірування поверхонь оптичних деталей займає до 90 % трудомісткості всього технологічного процесу. При шліфуванні та поліруванні оброблюваних поверхонь оптичне скло руйнується й утворюється нова поверхня, що якісно відрізняється від вихідної. Інтенсивність перетворення поверхні в одиницю часу визначається питомою поверхневою енергією й виражається відношенням роботи до площі поверхні, яка утворюється при шліфуванні або поліруванні.

Закономірності процесів шліфування та полірування вже достатньо повно вивчені й використовуються для інтенсифікації знімання припуску скла та підвищення продуктивності обробки оптичних деталей. Однак технологічні процеси шліфування й полірування скла мають істотні відмінності.

Шліфування закріпленими абразивними зернами

Обробкою скла інструментами із закріпленими абразивними зернами видаляють найбільшу частину припуску й готують поверхні для наступного тонкого шліфування та полірування.

Абразивне зерно, закріплене у зв'язці інструменту, ріже скло. Шліфування скла закріпленими абразивними зернами схоже на шліфування металів на металорізальних верстатах. Дія одиничного закріпленого зерна на скло полягає в тому, що при цьому йде сколювання часток оброблюваного матеріалу під дією тангенціальних сил, спрямованих під малим кутом до поверхні.

Скло руйнується як дуже крихкий матеріал, розтріскуючись, відколюючись дрібними частками неправильної форми. Кінематика відносного руху різання така, що закріплені зерна залишають на поверхні скла подряпини, які взаємно перетинаються. Упровадження зерен у товщу поверхневого шару оброблюваного матеріалу викликає появу конічних тріщин, що йдуть усередину скла.

Головний рух інструменту – обертальний. Оброблювана деталь або інструмент мають також додаткове переміщення по "штриху", що забезпечує зміну напрямку подряпин. Обертальний рух з відсною швидкістю певної величини в сукупності з крихкістю скла приводять до одержання рельєфного шару, зовсім ідентичного отриманому після обробки піскоструминним апаратом, тобто під ударним впливом незакріплених зерен. Утворюється порушений шар, що складається з поверхневих нерівностей деякого рельєфного шару та тріщинуватого шару (рис. 2.1). Структура рельєфного шару складається із западин і виступів, що мають при вершині кут 150° . З рельєфного шару вилучено приблизно половину об'єму скла, а інша частина залишилася у вигляді виступів.

Між поверхнями скла і матеріалу зв'язки інструменту, з якого виступають абразивні зерна, обов'язково має бути зазор, що забезпечує необхідні умови різання: достатню подачу технологічної рідини (МОТС) і відсутність шкідливого тертя зв'язки інструменту по оброблюваній поверхні скла при значній кількості тепла, що виділяється в процесі обробки. Таким чином, частина зерна, що взаємодіє зі склом, становить менше однієї третини його найбільшого розміру.

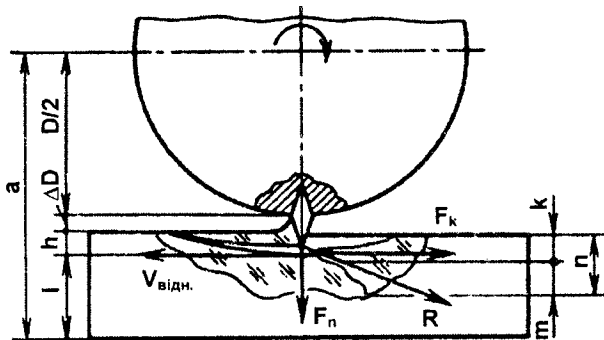


Рис. 2.1. Схема роботи закріпленого абразивного зерна

Припуск, що видаляється, залежить від крихкості, твердості, міцності абразивних зерен і матеріалу зв'язки, пропорційний інтенсивності режиму обробки.

На зерно діє сила різання (рівнодіюча сила R), яка виникає при відносному русі інструменту й заготовки зі скла. Ця сила прикладена до скла й руйнує його поверхню. Вона спрямована під малим кутом до оброблюваної поверхні, створює випереджуючу тріщину й деяке здуття скла навколо зерна (рис. 2.1). Складова цієї сили (F_k) спрямована під кутом 180° до вектора відносної швидкості, який лежить у площині, дотичній до оброблюваної поверхні. Силі F_k пропорційна робота, що йде на видалення скла і тепло. Під її впливом абразивне зерно проникає в товщу і руйнує скло, викликаючи появу конічних тріщин і вдавлення зерна у зв'язку інструменту. Тріщинуватий шар залягає на глибину, у два-чотири рази більшу, ніж висота рельєфного шару.

Закріплені зерна з часом притуплюються, зусилля різання збільшуються й зерна випадають зі зв'язки, але не розколюються. Поруч з ними вступають у роботу нові зерна й процес шліфування йде з рівномірною інтенсивністю.

Обробка закріпленими абразивними зернами в оптичній технології є найбільш ефективним процесом обробки скла. Його ефективність особливо збільшується із застосуванням природних і синтетичних алмазів в інструментах на металевих зв'язках, виготовлених методами порошкової металургії.

Ефективність шліфування скла закріпленими абразивними зернами обумовлена кількома причинами.

1. Закріплені абразивні зерна працюють як різці, залишаючи на оброблюваній поверхні скла суцільні пересічні подряпини.

2. Закріплені зерна руйнуються тільки при впливі на скло, але не від перети-
нання одне об одне.
3. Робочий тиск інструменту зосереджується на невеликій кількості зерен, що
виступають зі зв'язки, і сягає значних величин.
4. Швидкість різання становить 15–25 м/с, а робочий тиск 1,0 МПа.
5. Неоднорідність розмірів зерен не виявляється, оскільки вони працюють
тільки частиною – гострими гранями, що виступає зі зв'язки.
6. Достатня подача МОТС ефективно видаляє зруйноване скло й тепло із
зони обробки.
7. При роботі з малими подачами утворюються малі мікронерівності поверхні
при використанні зерен відносно крупної зернистості.

Видалення скла йде настільки інтенсивно, що хімічні явища не встигають
позначитися на швидкості руйнування скла в механічному процесі.

Процес шліфування закріпленими абразивними зернами служить для об-
робки допоміжних поверхонь.

Продуктивність обробки закріпленими абразивними зернами на цих операці-
ях визначається головним чином об'ємом припуску, видаленого в одиницю часу.

Поширення синтетичних алмазів привело до розробки й впровадження у
виробництво технологічних процесів шліфування всіх допоміжних поверхонь
оптичних деталей винятково алмазним інструментом.

Шліфування закріпленими абразивними зернами застосовується й при тон-
кому та надтонкому шліфуванні оптичних поверхонь. Це дозволяє підготувати
поверхню до полірування, забезпечуючи низьку шорсткість і високу точність
формування.

Шліфування суспензіями абразивних порошків

Обробка суспензіями абразивних порошків готує виконавчі поверхні до на-
ступного полірування із заданими значеннями N , ΔN , P . Суспензія, що шліфує,
являє собою порошок абразивних зерен у рідині. Руйнування скла відбуваєть-
ся під дією абразивних зерен, що передають вібраційно-ударною дією кінетич-
ну енергію інструменту на оброблювану поверхню оптичного скла. Для шліфу-
вання застосовують порошки, зерна яких порівняно зі склом мають велику тве-
рдість. До таких зерен відносяться карборундові, корундові, наждакові, квар-
цові, а іноді алмазні зерна. Порошки цих матеріалів мають абразивні власти-
вості, тобто при розколюванні вони утворюють більш дрібні частки, що мають
також гострі грані. Зерна мають пірамідальне обмеження, у якого найбільший
розмір відноситься до найменшого приблизно як 2:1, і гострі вершини. Зерна
різного розміру класифікують за зернистістю (розмірами). Разом із водою зер-
на розміщені між робочою поверхнею металевого інструменту та оброблюва-
ною поверхнею скла. Ці поверхні мають нерівності, розміри яких порівнянні з
розмірами абразивних зерен.

Скло й інструмент мають значний запас кінетичної енергії. Відносний рух систе-
ми скло–інструмент відбувається при деякому натиску верхньої ланки на ниж-
ню за рахунок сили P і ваги верхньої ланки. При цьому зерна перекочуються або
прослизують з деякою лінійною швидкістю. Найбільш великі із зерен взаємоді-
ють зі склом і інструментом. Скло руйнується, а інструмент зношується. Більш
дрібні зерна переносяться рідиною доти, поки великі не роздрібняться, після
чого дрібні зерна вступають у взаємодію зі склом і інструментом. У відносному

переміщенні кінетична енергія інструменту або скла (верхня ланка) передається склу (інструменту) 2 (нижня ланка) через дію абразивного зерна 3. Тангенціальними ударами викликається руйнування скла, місцеві пластичні деформації матеріалу інструменту і розколювання абразивного зерна 3 (рис. 2.2). Зерна при зустрічі з виступами поверхонь верхньої та нижньої ланок одержують тангенціальний удар із силою R під кутом $0-90^\circ$ до напрямку відносної швидкості $V_{відн.}$.

Навантаження, прикладене до кожного окремого зерна має різко виражений динамічний характер. Динамічна сила R спрямована по лінії, яка з'єднує вершини зерна, одна з яких миттєво закріплена в матеріалі шліфувальника, а інша вершина впливає на скло.

Сила F_n спрямована перпендикулярно до вектора відносної швидкості і тому не може виконувати роботу з видалення шару припуску. Сила F_n забезпечує контакт між шліфувальником, абразивним зерном та склом і викликає появу тріщин у склі, пружні деформації інструменту, а також роздавлює виступи поверхневих нерівностей на оброблюваній деталі. Сила F_k спрямована по дотичній до оброблюваної поверхні і протилежно направлена до вектора відносної швидкості.

Саме за рахунок цієї сили відбувається сколювання вершин поверхневих нерівностей скла і знос робочої поверхні інструменту. На кожному зерні сили F_k складають елементарну пару сил, що їх перекошує і являють собою сили тертя – ударно-діючі сили, що руйнують і видаляють скло.

Впровадження вершини зерна під дією ударної сили викликає появу у склі конічних тріщин, розташованих під кутом $90-150^\circ$ одна до одної, що поширюється в товщу, на величину, яка в 4 рази перевищує висоту рельєфного шару.

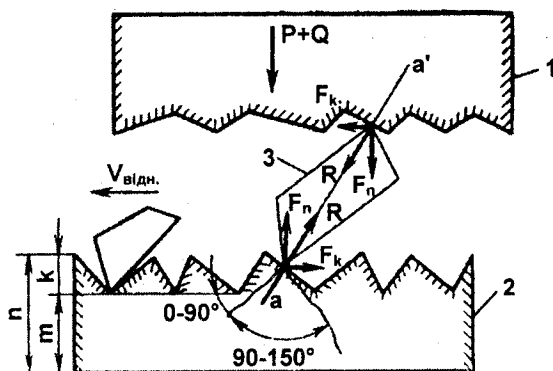


Рис. 2.2. Схема роботи вільного абразивного зерна

Руйнування настає при повторній дії зерна на те саме місце поверхні оброблюваного скла. Конічні тріщини перетинаються; між ними утвориться об'єм, що відійшов від іншої монолітної маси скла.

Порушений шар скла товщиною n складається з рельєфного шару k висотою $1/4-1/3$ середнього розміру зерна та тріщинуватого шару глибиною m , який перевершує k у 2–4 рази (рис. 2.3).

При перекочувванні зерна по поверхневим нерівностям воно може бути роздавленим і висота його зменшиться. Після цього в роботу включаться інші зерна. У роботі руйнування скла беруть участь близько 15% зерен, що одночасно розміщені під інструментом-шліфувальником.

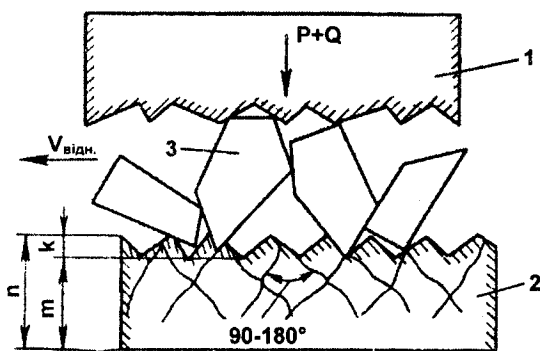


Рис. 2.3. Схема абразивного руйнування скла

Інші зерна не беруть участь у корисній роботі, вони вимиваються водою з робочого простору або перетираються між собою. Здрібнені зерна, змішані з осколками зруйнованого скла, виносяться МОТЗ з робочої зони.

Рівномірність структури шліфованої поверхні порушується дефектами – подряпинами, точками й виколами. Подряпини утворюються в тому випадку, коли зерно надовго закріплюється в поверхні шліфувальника або є більше 5% зерен розміром, у 4 рази більшим за розмір зерен основної фракції. В останньому випадку великі зерна не розколюються й залишають при перекочувванні сліди – подряпини. Виколи – це сліди від ударів гострими й великими предметами (краєм шліфувальника, сторонніми предметами тощо).

Хімічна дія процесу виявляється в тому, що вода дуже активно вступає в реакцію з поверхневим шаром скла, утворюючи усередині тріщин колоїдну плівку кремнієвої кислоти, що порівняно зі склом займає більший об'єм. Таким чином, вода розширює й поглиблює тріщини, прискорюючи й полегшуючи видалення осколків у механічному процесі руйнування скла при абразивній обробці.

Полірування оптичних поверхонь

Процес полірування скла водяними суспензіями поліруючих порошків має більш складну, ніж шліфування, фізико-хімічну природу. Зовнішній рельєфний шар, утворений шліфуванням, при поліруванні видаляється цілком, а тріщинуватий частково залишається. Зовні процес полірування відбувається таким

чином. Зерна поліруючого порошку, що складається переважно з оксидів церію чи заліза, мають розміри 0,2–2,0 мкм, вони зважені у воді й розміщені між поверхнями полірувальника та оброблюваної деталі. Порівняно зі шліфуючими зернами поліруючих порошків мають меншу твердість і менш різко виражені абразивні властивості. Полірувальник має смоляний робочий шар. Площини поверхневих нерівностей шліфованої поверхні та смоляної поверхні полірувальника значно більші за розміри зерен поліруючого порошку. Робоча поверхня в'язкого смоляного полірувальника, пластично деформується, вигладжується по шліфованій поверхні.

Вода, в якій зважені зерна, у перші моменти подачі суспензії виконує гідростатичний протитиск, але потім розтікається й зерна закріплюються, адсорбуючись у зовнішньому шарі смоли. Частина зерен, що ще не закріпилися в смолі, перекочуються й продовжують рух у напрямку вектора відносної швидкості. Зерна зрізують вершини рельєфного шару, що відразу стають гладкими полірованими. Надалі розміри полірованих площадок збільшуються, висота нерівностей зменшується. Зерна, що перекочуються, закріплюючись у смолі та одночасно в залишках каверн, порах і борознах, на відполірованих елементарних площадках скла ніби склеюють їх з поверхнею полірувальника, а при відносному переміщенні здирають шматочки колоїдної плівки, що утворюється на поверхні скла під хімічним впливом води.

На початку процесу полірування робота закріплених зерен ефективніша, тому що площа каверн ще велика і зернам, що перекочуються, ніде закріпитися. Закріплені зерна, зрізуючи вершини конічних виступів, якщо встигла утворитися колоїдна плівка, здирають її, а на поверхні утворюються відполіровані площадки. Товщина плівок, що здираються, зменшується при розширенні площі полірованих ділянок і до кінця процесу приблизно дорівнює висоті нерівностей, що залишаються.

Для технологічних і конструкторських розрахунків вважають, що кінетична енергія, що витрачається у відносному русі елементів кінематичної пари ОП–інструмент, йде на подолання опору скла різанню його зернами поліруючого порошку. Елементарні сили на кожному зерні й інтегральне зусилля полірування мають статичний характер. Сила натиску P_n на кожне зерно, що діє нормально до оброблюваної поверхні, не виконує роботи із зняття припуску скла при поліруванні. Вона забезпечує контактування поліруючого інструменту зі склом, впровадження зерен в їхні поверхневі шари та створює силу P_k , що лежить у площині, дотичній до поверхонь, які притираються, і спрямована в кожній точці цих поверхонь проти вектора відносної швидкості. Інтегральна сума елементарних сил утворює зусилля взаємодії скла з інструментом і є корисним навантаженням при поліруванні.

На полірованій поверхні, крім мікронерівностей, можуть виникати і дефекти структури, які з'являються у вигляді подряпин. Подряпини в процесі полірування утворюються при потрапленні під інструмент часток твердіших і більших за розмірами, ніж зерна полірувального порошку.

Полірування виконують на тих же верстатах, що й шліфування, але при меншій частоті обертання робочих органів. Шліфування триває хвилини, а полірування – години, тобто протягом часу приблизно в 20 разів більшого за час шліфування.

2.2. Технологічні системи процесів механічної обробки оптичних деталей

Оптичні деталі виготовляють за допомогою механічної обробки заготовок зі зняттям припуску. Припуск знімається послідовним виконанням ряду операцій грубої та фінішної обробки. Мета операцій – уточнення розмірів, форми й зменшення мікронерівностей оброблюваної поверхні. Для досягнення цієї мети вибирають визначену технологічну систему обробки: верстат–пристрій–інструмент–деталь (ВПІД). Обробка деталей з оптичною точністю досягається доведенням виконавчих поверхонь вільним притиранням. Заготовка та інструмент (притир) у процесі обробки складають два елементи кінематичної пари третього класу. Для обробки оптичних виконавчих, допоміжних і вільних поверхонь ОД застосовують різні технологічні системи обробки ВПІД (рис. 2.4: а – геометричне замикання, контакт у точці; б – геометричне замикання, контакт по лінії; в – силове замикання, контакт по лінії; г – замикання силове, контакт по поверхні; д, е – замикання силове, контакт по поверхні, відповідно два й три обертальні рухи).

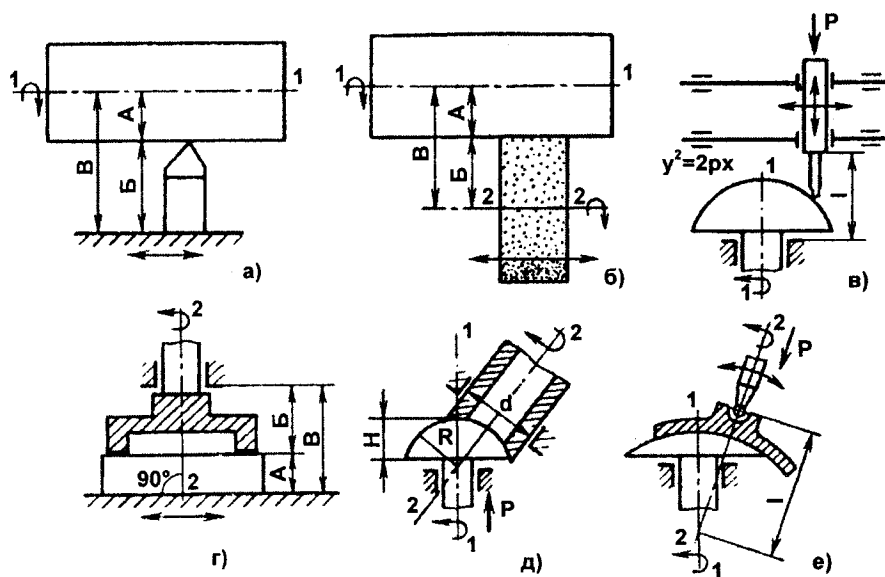


Рис. 2.4. Системи ВПІД обробки оптичних поверхонь

Системи ВПІД, що застосовуються в оптичній технології, характеризуються геометричною побудовою та кінематичною схемою обробки, видом інструменту й способом його замикання із заготовкою, а також способами обробки поверхонь з тією чи іншою точністю.

Основні ознаки систем ВПІД, що застосовуються в оптичній технології:

- 1) спосіб замикання ланцюга руху робочих органами кінематичної пари інструмент–заготовка, геометричне чи силове, від якого залежить точність форми й кривини оброблюваної поверхні;
- 2) вид контакту інструменту з оброблюваною поверхнею заготовки: у точці, по лінії, по поверхні, від якого залежить клас чистоти обробки та геометрична досконалість форми поверхні.

У системі, наведеній на рис. 2.4 а, здійснено геометричне замикання заготовки з інструментом–різцем, що стикаються в одній точці або мають контакт у вигляді плями невеликого розміру. Різець переміщується прямолінійно, а заготовка обертається. Припуск знімається різанням аналогічно до обробки металів на токарному верстаті. Геометрично замикається розмірний ланцюг $B = A + B$, де A – радіус заготовки; B – розмір для установки інструменту системи ВПІД. Основна вимірювальна база сполучена з встановлювальною.

Неточності виготовлення й настроювання верстата, похибки установки інструменту й заготовки передаються на задану форму та розміри деталі. Наприклад, непаралельність осі обертання заготовки та напрямку руху супорту приводить до утворення конічної, а не циліндричної поверхні деталі.

Різнання різцем застосовують для зняття великого об'єму припуску при попередній обробці допоміжних циліндричних поверхонь заготовок деталей діаметром більше 1 м, а у виняткових випадках при попередній обробці оптичних виконавчих поверхонь великих розмірів на верстатах типу карусельних.

У системі, приведений на рис. 2.4 б, здійснено геометричне замикання заготовки з інструментом, що контактують по лінії або по площадці невеликої ширини, як у круглошліфувальних металорізальних верстатах.

Круг із закріпленими абразивними чи алмазними зернами переміщується й обертається, а заготовка тільки обертається. Розмірний ланцюг $B = A + B$ системи ВПІД замкнений геометрично; основна вимірювальна база сполучена з встановлювальною.

Похибки виготовлення виникають такі ж, як і в системі а, але поверхня не має направлених слідів обробки, оскільки елементи пари інструмент–заготовка замикаються по лінії, а не в точці. У системі б оброблюються допоміжні циліндричні поверхні лінз, сіток, а також конічні фаски оптичних деталей на металорізальних круглошліфувальних верстатах. Точність розміру A , яка може бути досягнута після фінішної обробки, становить 0,01 мм.

Цю технологічну систему іноді застосовують для грубого полірування циліндричних поверхонь, наприклад, активних тіл квантових генераторів, циліндричних поверхонь для підсвічування розподілів сіток.

У системі, зображеній на рис. 2.4 в, контакт заготовки з інструментом у вигляді ножа здійснюється по лінії, а замикання цієї кінематичної пари здійснюється за допомогою сили P . Знімання припуску відбувається в процесі взаємного притирання робочої поверхні інструменту та поверхні заготовки за допомогою абразивної суспензії. Заготовка обертається, а інструмент–ніж робить складний обертально-поступальний коливальний рух паралельно осі 1–1. Відстань між встановлювальними базами заготовки й ножа змінюється в процесі обробки.

Кінематична схема обробки побудована так, що примусово сприяє геометричному формуванню параболічних поверхонь (при перетині параболоїду площинами утворюються параболи того самого параметра). Знос і виправлен-

ня кривини робочої поверхні інструменту, а також зміна параметрів настроювання верстата сприяють утворенню поверхні заданих геометричних параметрів. Унаслідок спільної матеріалізації принципів геометричної побудови і притирання при деяких модифікаціях цієї схеми утворюються поверхні другого порядку – параболічні, еліпсоїдні та гіперболічні. Цю технологічну систему застосовують як для операцій шліфування, так і полірування.

У системі, показаній на рис. 2.4 г, заготовка контактує з інструментом по поверхні при геометричному замиканні розмірного і кінематичного ланцюга. Взаємне притирання не має місця, тому що інструмент закріплений жорстко і не змінює геометрії профілю за час виконання операції. Застосовується інструмент, що працює кільцевою або секторіальною торцевою поверхнею. Якщо заготовка робить зворотно-поступальний плоский рух, то утворюється плоска поверхня. Настроювання системи для отримання плоскої поверхні та розміру A виконують відповідно до формули $A = B - B$.

У системі, приведеній на рис. 2.4 д, інструмент і заготовка обертаються на пересічних осях, розташованих під деяким кутом α . При обробці утворюється сферична поверхня.

Настроювання системи для утворення сфери заданого радіуса R виконують згідно з формулою:

$$d = \sqrt{2RH} \quad \text{і} \quad \sin \alpha = \frac{d}{2R},$$

де H – висота сегмента оброблюваної поверхні; d – діаметр інструменту; α – кут між осями обертання заготовки та інструменту.

Обробку ведуть методом врізання, при якому інструмент усією площею або широкою кромкою подається на оброблювану поверхню заготовки. Відхилення розміру виникають від неточностей установок через обмеження кількості робочих рухів тільки двома (площина і сфера є елементами кінематичної пари 3-го класу). Відхилення форми від сфери виникають також через некомпланарність осей. У цій системі здійснюється головним чином попереднє шліфування виконавчих ОП або остаточне шліфування допоміжних плоских і сферичних поверхонь. Іноді таким чином здійснюють грубе полірування лінз конденсорів.

У системі (рис. 2.4 е) інструмент контактує з заготовкою по поверхні при силовому замиканні. Вони взаємно притираються за допомогою суспензій абразивних порошоків. Одна ланка (заготовка або інструмент) обертається, а друга за допомогою кульового шарніра обертається і притискається до першої, савмовстановлюючись на її поверхні. Інструмент і заготовка утворюють елементи кінематичної пари 3-го класу. При цьому формоутворюється тільки сферична поверхня (в окремому випадку – площина, як сфера з $R = \infty$). Інструмент працює за методом врізання, контактуючи з оброблюваною поверхнею заготовки майже всією своєю поверхнею.

У системах ВПІД, приведених на рис. 2.4, г, д, е є інструмент, що має вісь обертання 2–2, і заготовка, що має вісь обертання 1–1, які можна розглядати як два елементи кінематичної пари 3-го класу, що замикають ланцюг відносних переміщень елементів системи. Осі 1–1 і 2–2 є основними встановлювальними базами заготовки та інструменту відповідно.

Найбільш універсальною для обробки ОП на верстатах типу ШП, є система, показана на рис. 2.4 е. При її використанні обробляють виконавчі поверхні більшості ОД.

Кінематична пара інструмент–заготовка

Інструмент і заготовка в технологічній системі ВПІД належать різним ланкам загального кінематичного ланцюга виконавчого механізму верстата. У системах, які наведено на рис. 2.4 (а і б) ланцюг замикається геометрично, тобто так само, як у металорізальних верстатах, відстань між встановлювальними базами заготовки та інструменту залишається постійною. Інструмент і заготовка контактують у точці або по лінії й є елементами вищої кінематичної пари 4-го класу з геометричним замиканням.

У системах на рис. 2.4 (г, д) інструмент і заготовка дотикаються по площадках поверхні і складають кінематичну пару вищу 4-го класу, а замикання може бути геометричним або силовим. Відносне переміщення заготовки та інструменту утворюється в результаті додавання тільки двох незалежних переміщень.

Похибки утворення плоскої чи сферичної поверхонь залежать від неточності виготовлення верстата і всієї системи ВПІД і, зокрема, від некомпланарності осей і недотримання заданого значення кута α .

У системах, зображених на рис. 2.4 (в і е), інструмент і заготовка складають кінематичну пару 3-го класу, але в системі "в" вона вища, тому що дотикання здійснюється по лінії, а в системі "е" – нижча, тому що дотикаються площадки поверхонь.

При механічній обробці, яка здійснюється притиранням з абразивними суспензіями на оптичних шліфувально-полірувальних верстатах найбільш поширеного типу ШП, форма дотичних поверхонь інструменту (притира) і заготовки – завжди плоска чи сферична й майже однакового радіуса. Під дією тиску притискання дотикання інструменту та заготовки відбувається одночасно по декількох площадках кінцевих розмірів. Інструмент і заготовка є елементами нижчої кінематичної пари третього класу з силовим замиканням.

Завдяки властивості оборотності нижчих пар інструмент і заготовку в оптичних верстатах можна розташовувати як знизу, так і зверху. Розподіл між ними обертальних і поступальних рухів може також змінюватися, але формоутворення поверхонь верхньої та нижньої ланок від цього не зміниться.

В усіх оптичних шліфувально-полірувальних верстатах поводка верхньої ланки (інструменту чи заготовки) – конструктивно зв'язана з кульовим шарніром, що теж є кінематичною парою 3-го класу. Вона передає тиск верстата на верхню ланку й забезпечує силове замикання між двома елементами кінематичних пар 3-го класу.

Вісь обертання верхньої ланки самовстановлюється таким чином, що проходить через центр сфери нижньої ланки і вершину сферичного сегмента робочої поверхні верхньої ланки. При будь-яких траєкторіях переміщення верхньої ланки по нижній ланці кульовий шарнір забезпечує збереження компланарності осей (або їх паралельність, якщо притираються площини). Кульовий шарнір забезпечує такі умови контакту, які необхідні для спряженості поверхонь інструменту та заготовки, які притираються.

Існує три умови контакту:

- 1) геометрична – поверхні площадок контакту мають загальну нормаль;
- 2) кінематична – вектор швидкості відносного руху точок контактуючих площадок лежить у загальній дотичній площині;

- 3) фізична – загальні площадки контакту розташовані тільки на поверхні, а не всередині інструменту чи заготовки.

Кінематична пара інструмент–заготовка в оптичній технології відрізняється від усіх інших тим, що результатом спільного притирання її елементів є швидка зміна профілю одного елемента і зношування іншого.

2.3. Спосіб вільного притирання

При шліфуванні заготовка притирається до робочої поверхні інструменту-шліфувальника. При поліруванні м'які смоляні чи повстяні підкладки полірувальників притираються до шліфованої поверхні заготовки ОД. Дві сферичні поверхні різних радіусів, накладені одна на іншу, теоретично дотикаються по лінії, яка уявляє собою коло. У зв'язку з тим, що радіуси робочої поверхні інструменту та оброблюваної поверхні заготовки майже однакові й мають протилежні знаки кривини, завдяки проміжному шару абразивної суспензії або через пластичні деформації смоли забезпечується їхнє контактування по колових зонах, які мають площі кінцевих розмірів. Діаметри і ширина цих зон змінюються в процесі взаємного притирання сферичних і плоских поверхонь оброблюваної деталі та інструменту. За термінологією машино- і приладобудування на операціях шліфування й полірування інструмент називають притиром.

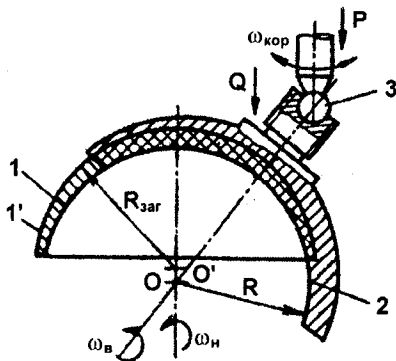


Рис. 2.5. Схема обробки за допомогою вільного притирання

Встановлювальною базою для робочої поверхні інструменту 2 служить вхідна поверхня заготовки 1. У процесі зняття припуску ця база змінює своє положення щодо деталей верстата і радіус $R_{заг}$ змінюється на радіус R оброблюваної поверхні (рис. 2.5). Для оброблюваної поверхні 1 вимірювальною базою є центр сфери O , від якого визначається єдиний розмір сфери – радіус R . Ця схована нематеріальна база – точка O завжди розташована на перетині

осей обертання інструменту й заготовки, але її місцерозташування в процесі обробки може змінюватись, наприклад із O на O' , і ніяк не фіксується відносно деталей верстата.

Місцерозташування центра сфери не змінюється, якщо припуск знімається шарами рівної товщини.

Відхилення оброблюваних площин на ввігнутість або опуклість переносить положення вимірjuвальної бази – точки O – уздовж осі обертання заготовки з додатньої нескінченності у від'ємну. Таку обробку оптичних поверхонь називають способом вільного притирання. У старовинних літературних джерелах цей спосіб називався "класичним методом формоутворення".

Спосіб вільного притирання визначається наявністю кількох ознак.

1. Контактjuвання робочої поверхні інструменту з оброблюваною поверхнею заготовки відбувається по площадках кінцевих розмірів.
2. Дотикання поверхонь інструменту і заготовки як двох елементів кінематичної пари третього класу здійснюється силовим замиканням.
3. Одна із поверхонь, які притираються, самовстановлюється на іншій за допомогою кульового шарніра 3 поводки верхньої ланки.
4. Відносний рух інструменту (2) по оброблюваній поверхні заготовки (1) складається з трьох простих обертальних рухів.
5. Вісь одного із обертальних рухів є нормаллю до сферичних чи плоских поверхонь, що притираються.
6. Відносне переміщення та геометрія площадок інструменту обрані так, що всі точки на поверхнях, що притираються, розташовані в багаторазовому аперіодичному покритті всіма площадками іншої ланки.

Матеріалізація способу вільного притирання завжди приводить до утворення сферичної чи плоскої поверхні. Одночасна наявність останніх трьох ознак забезпечує одержання (утворення й збереження) сферичної чи плоскої форми оброблюваної поверхні. Якщо інструмент і заготовка мають тільки обертальні рухи, то утвориться сферична поверхня. За наявності двох прямолінійних рухів утвориться плоска поверхня. Притирання варто називати вільним за третьою ознакою – один елемент кінематичної пари вільно встановлюється (самовстановлюється) на іншому.

Спосіб обробки плоских і сферичних поверхонь оптичних деталей вільним притиранням має ряд переваг і деякі недоліки.

Головна його перевага полягає в тому, що цим способом досягається найкращий збіг форми реальної обробленої оптичної поверхні з ідеальною геометричною (сферичною чи плоскою). Вільним притиранням можна на грубому неточному устаткуванні за допомогою грубого інструменту обробляти дуже точні поверхні. Це пояснюється застосуванням не геометричного, а силового замикання елементів вищої пари інструмент–заготовка не по лінії, а по поверхні.

Недолік способу вільного притирання полягає в тому, що на верстаті не можна заздалегідь установити заданий радіус обробленої поверхні. Це досягається шляхом виправлення форми інструменту і перенастроювання верстата в процесі виконання операцій шліфування й полірування.

Кінематичні схеми обробки

Кінематичні схеми обробки поверхонь оптичних деталей відображають прості обертальні й поступальні рухи, які передаються інструменту й заготовці в різних технологічних системах ВПІД. Кінематична схема обробки є кінематичною основою системи ВПІД, чим вони принципово відрізняються одна від одної.

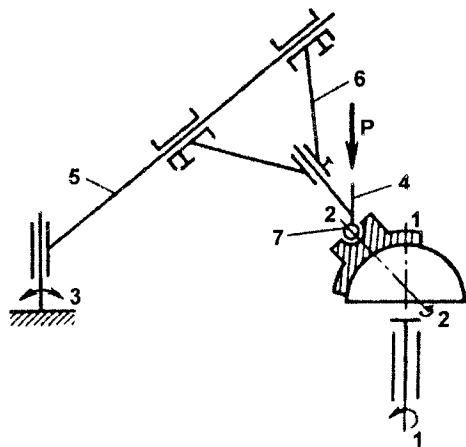


Рис. 2.6. Кінематична схема обробки сферичної поверхні

В оптичній технології обробки плоских і сферичних поверхонь найчастіше застосовується система ВПІД (рис 2.4, е) на верстатах типу ШП способом вільного притирання. Як приклад побудови наведемо кінематичну схему обробки на верстаті типу ШП, яка використовується для шліфування й полірування сферичних оптичних поверхонь (рис. 2.6).

З кінематичної схеми верстата виділені прості рухи навколо осей 1–1, 2–2.

Поводка 4 качається навколо осі 3 разом із коромислом 5 і навколо останнього разом з кареткою 6.

Цей складний рух завдяки силовому замиканню з силою P кульового шарніра 7 приводить до простого плоского руху навколо центра оброблюваної сферичної поверхні.

2.4. Схеми розташування припуску

Вихідна поверхня заготовки віддалена від сферичної поверхні деталі заданого радіуса на шар припуску, що по колових зонах у загальному випадку має різні товщини. При обробці сферичних поверхонь оптичних деталей способом вільного притирання шар припуску обмежений двома завжди сферичними поверхнями – вихідною заготовкою та обробленою поверхнею деталі.

Найчастіше розглядаються три схеми розташування міжопераційного припуску: шар рівної товщини, мінімум припуску на краю, мінімум припуску при вершині заготовки (рис. 2.7).

Розташування шару припуску $Z = Z(\lambda)$ для цих трьох схем визначається (θ – кут напіврозцину блоку ОД, $\lambda \in [0; \theta]$):

- 1) $Z = Z_{\min}$ при $\lambda = \theta$, $Z = Z_{\max}$ при $\lambda = 0$ (опуклість);
- 2) $Z = Z_{\min}$ при $\lambda = 0$, $Z = Z_{\max}$ при $\lambda = \theta$ (увігнутість);
- 3) $Z = Z_{\min} = \text{const}$ при $\forall \lambda$ (рівномірний припуск).

Міжопераційний припуск завжди більше, ніж технологічно обумовлений мінімально необхідний шар, товщина якого залежить від шорсткості попередньої обробки. Об'єм припуску, що знімається з оброблюваної поверхні заготовки, також більший за мінімально необхідний.

Функції $Z = f(\lambda)$ визначаються для $0^\circ < \theta < 90^\circ$ і $0 \leq R \leq \infty$ (R – радіус кривини оброблюваної поверхні), тобто для деталей, менших за півсферу, а також для плоских поверхонь.

Якщо шар має товщину Z_{\min} при всіх значеннях λ , то це дасть найменший об'єм припуску (рис. 2.7, в).

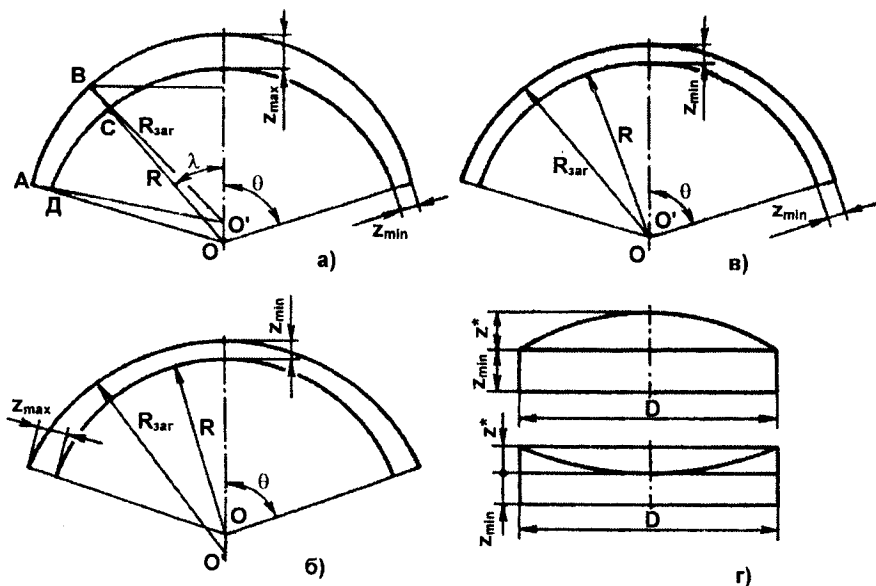


Рис. 2.7. Схеми розташування припуску

2.5. Незалежні параметри керування процесом обробки

Процесом зміни радіуса оброблюваної поверхні заготовки керують шляхом зміни геометрії інструменту й настроювання верстата, які є незалежними параметрами цього процесу. Значення незалежних параметрів процесу керування кривиною оброблюваної поверхні вибирають до початку виконання кожного з переходів операцій шліфування й полірування.

Основні параметри геометрії площі блоку заготовок та інструменту: $D_1, D_2, D_2 / D_1$ – діаметри нижньої та верхньої ланок (заготовки й інструменту) та їх відношення; δ_1, δ_2 і r_1, r_2 – площі робочих елементів поверхні інструменту або

блоку заготовок і середні радіуси вузьких колових зон, у яких вони розташовані. Значення радіуса кривини сферичної поверхні деталі $R_{дет}$ задано й є незалежним параметром, його не можна змінювати і саме його потрібно одержати в процесі обробки. Параметри настроювання верстата: $\omega_1, \omega_2, \omega$ – відповідно частоти обертання нижньої ланки, верхньої ланки і кривошипу; L – розмах переміщення верхньої ланки (довжина штриха). Параметри настроювання верстата: e_{max}, e_0, e_{min} – відповідно максимальний ексцентриситет осей верхньої та нижньої ланок, значення несиметрії та зсув штриха (рис. 2.8).

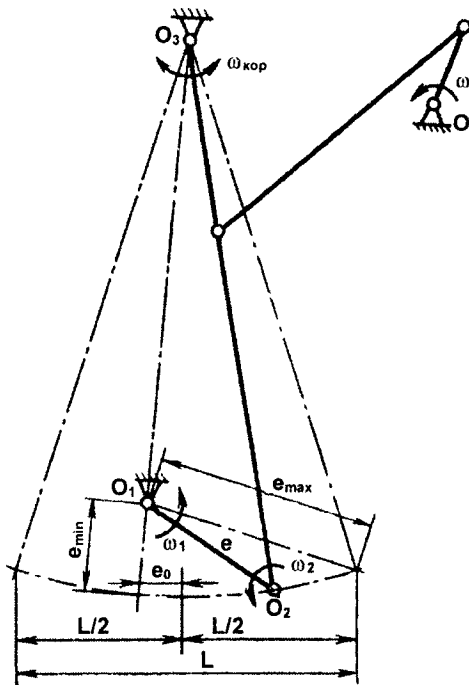


Рис. 2.8. Параметри настроювання верстата за штрихом

При примусовому обертанні верхньої ланки $\omega_2 = \text{const}$. При вільному обертанні за значення незалежного параметра ω_2 варто приймати при шліфуванні $\omega_2 = 0,9 \omega_1$, а при поліруванні $\omega_2 = 0,7 \omega_1$.

Для керування процесом зміни радіуса заготовки під час обробки у виробничій практиці використовують такі десять первинних незалежних параметрів геометричних розмірів інструменту і настроювання верстата:

$$r, \delta, \frac{D_2}{D_1}, \omega_1, \omega_2, \omega, L, e_{max}, e_0, e_{min}.$$

Робота притирання є результатом одночасної дії декількох незалежних параметрів. Щоб оцінювати напрямок і швидкість зміни кривини профілю по зонах об-

роблюваної поверхні необхідно користуватись відносними значеннями режимних, кінематичних і технологічних параметрів процесу обробки, а також конструктивними параметрами інструменту та блоку ОД.

Режимні параметри процесу обробки: p_o – номінальний тиск притискання інструменту до оброблюваної деталі, U – відносна швидкість їх переміщення, $t(T_o)$ – час обробки.

Кінематичні параметри процесу обробки – несиметрія e_0 , зміщення e_{\min} і довжина штриха L .

Технологічні параметри процесу обробки – температура в зоні контакту інструменту з оброблюваною поверхнею, склад МОТС, витрати і рН суспензії тощо.

Конструктивні параметри інструменту і блоку ОД визначаються їх геометричними розмірами та характером розташування на їх поверхнях робочих елементів або окремих деталей (D_1, D_2, d, D_{hl} – діаметри деталі, інструменту, робочого елемента і блоку деталей відповідно, $k(r), K(r)$ – локальний та інтегральний коефіцієнти заповнення (див. розд. 3)).

2.6. Елементи настроювання верстатів

Рекомендації з настроювання верстатів типу ШП розроблено за даними багаторічного виробничого досвіду. Згідно з ними:

1. Відношення діаметрів верхньої та нижньої ланок з суцільною робочою поверхнею має змінюватись у межах $\frac{D_2}{D_1} = 0,8-1,4$, де D_2 – діаметр верхньої

ланки; D_1 – діаметр нижньої ланки. Найчастіше використовують $\frac{D_2}{D_1} \approx 1$. При

поліруванні $\frac{D_2}{D_1} \leq 1,2$.

Зміна співвідношення D_2/D_1 викликає різку зміну коефіцієнта покриття крайніх зон. Наприклад, якщо заготовка розташована знизу, а інструмент зверху $D_2 > D_1$, то це викликає зрив фаски. Якщо одна ланка не виходить за край іншої, то зовсім не обробляються крайні зони, з'являються похибки форми – підйом краю. Це настроювання діє найбільш сильно. Помилки форми, що виникли від неправильного вибору розмірів ланок, не можна виправити ніяким перенастроюванням верстата.

2. Зміна положень ланок із нижнього на верхнє призводить до зміни характеру зносу їх поверхонь на зворотнє. Наприклад якщо ОД з опуклою поверхнею розташована знизу і оброблюється так, що спостерігається зменшення радіуса її кривини, то після перестановки її у верхнє положення, а інструменту – у нижнє, радіус ОП почне збільшуватись. Цей прийом настроювання діє завжди однозначно.

3. Зміна ексцентриситету центра верхньої ланки по відношенню до нижньої ланки (осі шпинделя)

$$e = (0,10 - 0,65) \frac{D_1}{2}.$$

Зі збільшенням ексцентриситету прискорюється спрацьовування крайніх зон нижньої ланки і центральних зон на верхній ланці. У зоні $\frac{D_1}{2} = e$ може з'явитися значна зональна похибка форми через злам із різким спадом кривої значень коефіцієнта покриття. Можливе застосування інтенсивних режимів, але точність обробки нижча, ніж при переміщенні верхньої ланки, тому що з трьох можливих рухів одне відсутнє.

4. Довжина штриха руху верхньої ланки має змінюватися в межах

$$2e_{\max} = L = (0,25 - 0,50)D_1.$$

Довжина штриху L залежить від відношення D_2 / D_1 . При більшому D_1 потрібно розмах L робити більше. Збільшення розмаху й відношення D_2 / D_1 інтенсифікує обробку та вирівнює розподіл роботи притирання по зонах поверхонь інструменту й оброблюваної деталі, але при цьому зростають динамічні зусилля на верстат.

5. Положення штриху щодо осі шпинделя визначається вздовж штриха відстанню e_0 і перпендикулярно штриху відстанню e_{\min} , які лежать у межах від 0 до $0,25e_{\max}$ (рис. 2.9). Ці невеликі зміни настроювання не змінюють інтенсивності, але позначаються на точності обробки. Вплив значень e_0 , e_{\min} і їх сполучень на точність формоутворення дуже суттєвий.

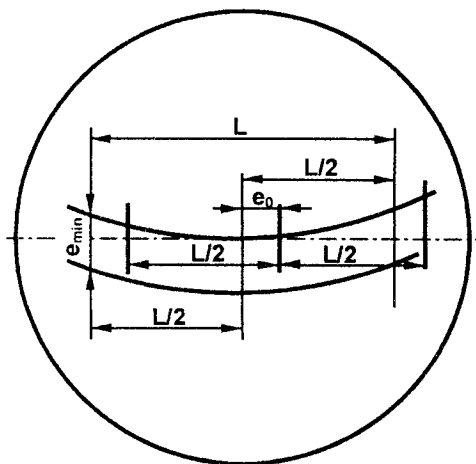


Рис. 2.9. Розташування штриха

6. Зміна частоти обертання n_1 шпинделя (нижньої ланки) при вільному обертанні верхньої ланки приводить до відповідної зміни частоти її обертання n_2 , але зберігається відношення $n_2 / n_1 = 0,6-0,9$. Нижня межа – полірування, а верхня – шліфування.

За вільного обертання верхньої ланки розподіл швидкостей по зонах поверхонь інструменту та деталі найбільш рівномірний, і відносна швидкість притира найменша. Збільшення частоти обертання шпинделя в цьому випадку інтенсифікує обробку, але не змінює істотно напрямку зміни кривини оброблюваної поверхні.

7. Зміна частот обертання шпинделя й кривошипу верстата відбувається в межах $n/n_1 = 0,5-2,5$. Звичайно застосовують $n/n_1 = 1$. Збільшувати n не рекомендується через виникнення значних динамічних зусиль. Однак збільшення цього відношення сприяє підвищенню точності формоутворення ОП (виключає утворення бугра в центрі оброблюваної поверхні). Відношення n/n_1 можна збільшувати, зменшуючи частоту обертання шпинделя.

Наведені варіанти настроювань істотно не впливають на шорсткість і дефекти чистоти оптичної поверхні.

8. Зміна частоти примусового обертання верхньої ланки проти ходу і за ходом обертання шпинделя інтенсифікують режими обробки, але викликають при суцільній поверхні інструменту обов'язкове зростання швидкості притирання в крайніх зонах порівняно з вільним обертанням. Суцільний інструмент дає зрив краю заготовки.

Плавна зміна частоти обертання інструменту та оброблюваної деталі у сполученні з розрахованими конструкційними параметрами інструменту є найкращим способом керування формоутворенням ОП.

Підбором відповідної конструкції робочого шару інструменту й настроюванням верстата за кінематичними параметрами можна досягти такої стабілізації процесу формоутворення (при шліфуванні або поліруванні), при якій радіус поверхні не буде змінюватися на всіх переходах обробки. При цьому відпадає необхідність проміжного контролю оброблюваної поверхні та виправлення форми робочої поверхні інструменту.

Це дозволить перейти оптикам-технологам до роботи з попереднім настроюванням верстата з автоматичним одержанням розміру з припустимими відхиленнями. При цьому значно зменшується допоміжний час, особливо при поліруванні, і зростає продуктивність обробки.

Розділ 3

ШЛІФУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

3.1. Механізм зняття оброблюваного матеріалу при шліфуванні оптичних поверхонь

При шліфуванні поверхонь, що обробляються, скло руйнується й утворюється нова поверхня. Перетворення поверхні визначається питомою поверхневою енергією та відношенням роботи до площі поверхні, що утворилася.

Механізм і умови роботи алмазних зерен в інструменті при шліфуванні скла й інших оптичних матеріалів добре вивчений і викладений у багатьох роботах. Дія окремого закріпленого зерна на поверхню оброблюваного матеріалу являє собою один із двох процесів: різання або нанесення подряпин. Який саме процес відбувається, залежить від властивостей оброблюваного матеріалу та умов, за яких здійснюється взаємодія зерна з поверхнею. При переміщенні зерна, на яке діє притискувальна сила, по поверхні пластичного матеріалу відбувається різання останнього з утворенням продуктів руйнування у вигляді стружки. При переміщенні зерна по поверхні крихкого матеріалу спостерігається утворення на ній подряпин. При цьому продукти руйнування являють собою дуже дрібні частки оброблюваного матеріалу.

Робота алмазного зерна визначається його фізико-механічними властивостями, геометричними параметрами форми, міцністю його закріплення в інструменті, кінематичними та динамічними умовами процесу шліфування.

Унаслідок того, що окреме алмазне зерно в інструменті розташовується довільним чином, у процесі шліфування беруть участь гострі й тупі ребра та вершини зерен. Їх довільна орієнтація в просторі призводить до істотного зниження ріжучих властивостей інструменту. У роботі диспергування оброблюваного матеріалу при шліфуванні беруть участь лише 10–17 % зерен.

Умови закріплення алмазного зерна на поверхні інструменту теж впливають на ефективність використання його ріжучих властивостей. Ці умови мають забезпечувати, насамперед, достатню міцність його утримання, наявність відповідної величини виступаючої частини зерна, необхідної для роботи руйнування поверхні оброблюваного матеріалу та сприяття своєчасному видаленню затуплених зерен.

Міцність закріплення алмазного зерна обумовлюється фізико-механічними й хімічними властивостями матеріалу, в якому воно закріплюється, формою й геометричними параметрами зерна, характером його розташування стосовно поверхні, на яку воно впливає, і фізико-хімічною взаємодією між зерном і матеріалом, що його закріплює. Матеріали зв'язки з більш високими параметрами механічної міцності, охоплюючи занурену в нього частина зерна, утримують його з великими зусиллями, забезпечуючи високу якість закріплення. Хімічні властивості компонентів, що входять до складу речовини зв'язки, сприяють збільшенню міцності закріплення зерна завдяки хімічній взаємодії з поверхнею алмаза шляхом дифузії або адгезії. Залежно від форми зерна міцність його

закріплення підвищується, якщо його більший розмір розташовується по нормалі до поверхні закріплення. Крім того, зерно з великою кількістю мікроступів і западин на поверхні, закріплюється міцніше, ніж зерно з гладкими поверхнями.

Дослідження з визначення міцності утримання зерен синтетичних алмазів в органічній зв'язці показали, що при зміні глибини закладення зерен даної зернистості від 75 до 200 мкм зусилля виривання зерен алмаза залежно від умов закріплення змінюються. Крім того, встановлено, що існує максимальна глибина закладення зерна, при якій воно може бути вирване зі зв'язки незруйнованим. Ця величина $H_{кр}$ названа критичною глибиною закладення зерна. За величину, що характеризує кількість зерен, що випали з поверхні інструменту в процесі шліфування, прийнята відносна критична глибина закладення зерна e , що виражається як відношення $e = H_{кр}/d$ (де d – середній розмір зерна). Експериментально встановлено, що відносна критична глибина закладення становить для алмазних зерен величину 0,31–0,44.

Для ефективної роботи алмазного інструменту необхідно, щоб зерна зв'язаного алмазного порошку мали достатню міцність і зносостійкість. Залежно від фізико-механічних властивостей і умов роботи зерен їхнє руйнування може бути крихким або пластичним. У першому випадку відбувається сколювання й викрашування, а в другому – пластична деформація та зріз частини зерна. У загальному випадку можуть одночасно існувати обидва види руйнування.

Алмаз має схильність до крихкого руйнування тому, що відрізняється порівняно невисокими значеннями границь міцності на стиск і розтягання, унаслідок чого, незважаючи на високу твердість, володіє невисокою крихкою міцністю. Крім того, міцність зерен алмаза знижується за рахунок їх неоднорідності за складом, наявності внутрішніх дефектів і поверхневих напруг. У зерні наявні мікроскопічні тріщини, що поширюються на весь його об'єм і зародки для утворення більш великих тріщин. Під впливом зовнішніх зусиль система тріщин розвивається, розміри їх зростають, що приводить до поділу зерна на частини (руйнування). Аналіз продуктів зносу після роботи алмазного інструменту показує, що в них міститься велика кількість осколків алмаза значно меншого розміру, ніж зерна вихідної фракції в інструменті. Крім того, спостерігається наявність певної кількості цілих (незруйнованих) зерен. Це підтверджує факт переважно крихкого руйнування зерен і часткового випадання їх зі зв'язки інструменту при досягненні граничної величини критичного закладення. Одночасно з крихким може відбуватися й пластичне руйнування робочої частини алмазних зерен.

Відомо, що за певних умов працюючі частини алмазних зерен можуть пластично деформуватись. При обробці скла і подібних йому матеріалів у зоні обробки високих температур не виникає й імовірність виникнення пластичного руйнування зерна дуже мала. Тобто, при обробці крихких матеріалів (скла, кристалів, ситалів тощо) руйнування алмазного зерна визначається в основному його крихкістю й лише в деяких особливих випадках – здатністю до пластичних деформацій.

Механізм зношування контактних поверхонь зерен алмазного порошку досить складне явище, що представляє собою наслідок одночасної комплексної дії ряду фізико-механічних і фізико-хімічних процесів, що відбуваються в зоні контакту зерна з матеріалом, що обробляється. Залежно від умов роботи алмазного зерна можна розрізняти різні види його зносу: адгезійний, абразивний, дифузійний, хімічний, окисний тощо. Зазвичай один із них переважає, але може відбуватися й одночасна сукупна дія декількох різновидів зносу.

Адгезійний знос полягає у видаленні матеріалу з контактної поверхні зерна в результаті зрізу й відриву часток унаслідок адгезійних явищ. При обробці переважно м'яких і текучих матеріалів на контактних поверхнях алмазного зерна утворюються адгезійні плями, що неперервно відриваються й віддаляються разом із прилеглими до них поверхневими шарами алмазного зерна. При обробці крихких матеріалів, що не схильні до адгезії з алмазом, наприклад кварцу, скла, адгезійний знос практично не спостерігається. Таким чином, можна вважати, що при обробці оптичних матеріалів адгезійного зносу алмазних зерен не спостерігається.

Абразивний знос контактних поверхонь алмазного зерна полягає в їх руйнуванні шляхом нанесення подряпин при впровадженні більш твердих часток. При обробці крихких оптичних матеріалів це мало ймовірно й абразивний знос у цьому випадку може відбуватися лише за рахунок впливу дрібних часток алмаза, що відколюються від самих зерен.

Дифузійний знос являє собою процес розчинення поверхневого шару алмазного зерна в оброблюваному матеріалі, який відбувається за наявності їх хімічної спорідненості та високої температури. Унаслідок цього алмаз з поверхні зерна віддаляється й утворюється площадка зносу, що являє собою гладку поліровану поверхню. Хоча до складу оптичних матеріалів і можуть входити компоненти, що мають хімічну спорідненість з вуглецем, при їх обробці не можуть виникати настільки високі температури, за яких могли б відбуватися дифузійні процеси. Тому при обробці таких матеріалів не може відбуватися помітний дифузійний знос алмазних зерен.

Хімічний знос алмазних зерен відбувається за високих температур у зоні його контакту з оброблюваним матеріалом і являє собою результат графітизації алмаза (перетворення його на графіт). Це явище спостерігається в процесі полірування алмаза на склі й агаті за високих швидкостей і тисків, коли в зоні тертя з'являється графіт, за рахунок виділення якого відбувається знос деякого поверхневого шару.

Окисний знос проявляється у видаленні шару алмаза за рахунок його взаємодії з киснем у зоні обробки, що виражається в згорянні алмаза при високих температурах. Однак при терті алмазних зерен з поверхнею скла цей вид зносу алмаза не виявлений.

Для встановлення характеру зносу за зовнішніми ознаками можна користатися спостереженнями за рельєфом зношеної поверхні алмазного зерна за допомогою мікроскопа. Так, при адгезійному зносі поверхня має горбисту будову; у випадку абразивного зносу на поверхні спостерігаються спрямовані подряпини (риски). Дифузійний і окисний види зносу характеризуються гладкою полірованою поверхнею ділянки зносу зерна. Хімічний знос супроводжується наявністю по краях площадки зносу чорного осаду, що являє собою графіт.

На підставі експериментальних даних і практичних спостережень можна вважати, що при обробці оптичних матеріалів типу скла переважачим видом зносу алмазних зерен є абразивний під дією часток самого алмаза, що руйнуються. Цей вид зносу за відомих температурних умов може супроводжуватися графітизацією алмаза. Адгезійний, дифузійний і окисний види зносу практично відсутні.

Механізм зняття оброблюваного матеріалу при шліфуванні оптичних поверхонь може бути описаний таким чином. При переміщенні алмазного зерна по поверхні скла утворюються тріщини, що частково проникають на значну глибину, а частково, виходячи до поверхні і перетинаючись одна з одною, утворюють на ній поглиблення (викולי та раковини). Сукупність виколів на поверхні скла і внутрішніх тріщин характеризує структуру отриманої подряпини, що ви-

значає стан загального зруйнованого шару. За наявності на поверхні пересічних подряпин утворюється зруйнований шар, що складається з зовнішнього рельєфного та внутрішнього тріщинуватого шарів, величина якого залежить від розмірів і взаємного розташування подряпин і тріщин. Передаючи при розміщенні по поверхні скла зусилля вдавнення чи притискання й зусилля різання, під дією яких відбувається руйнування скла, алмазне зерно внаслідок впливу на нього сил опору скла і сил тертя з часом саме піддається руйнуванню. Форма зерна, його розташування щодо поверхні, яку обробляють, міцність його, а також анізотропія твердості і зносостійкості впливають на його ріжучу здатність, тривалість роботи й умови закріплення у зв'язці.

При вільному шліфуванні можна вважати, що зерна розташовуються між поверхнями інструменту та оброблюваної деталі в один шар і впритул одне до одного. Тоді відстань між двома сусідніми зернами визначається їх середнім лінійним розміром і кількістю зерен на одиницю площі буде обернено пропорційна квадрату цього розміру. Тобто, тиск на одне зерно, пропорційний квадрату його середнього лінійного розміру. При шліфуванні зв'язаними алмазними зернами відстань між ними практично не залежить від їхнього розміру і визначається лише концентрацією алмазного порошку в інструменті. Тому при одній і тій же зернистості зі збільшенням концентрації тиск на одне зерно зменшується, а при однаковій концентрації та різних зернистостях зі збільшенням розміру зерен тиск на окреме зерно зростає. Очевидно, що в обох випадках усі зерна, що розміщені в зоні обробки, не можуть одночасно брати участь у процесі диспергування, і цю роботу виконують при вільних зернах найбільш великі, а при закріплених – найбільш виступаючі з них.

Закріплені зерна переміщуються по оброблюваній поверхні за траєкторіями, які визначаються кінематичною схемою процесу шліфування. У результаті цього шорсткість поверхні, яку обробили інструментом зі зв'язаними алмазними зернами, як правило, має закономірну спрямовану структуру. Вільні зерна виконують по оброблюваній поверхні обертання й ковзання, і кінцевий рух, що переважає над іншим, визначається за формою та розміром. Із відсутністю чіткої закономірності руху кожного з них, траєкторії їх руху дуже складні і, у результаті їх взаємного перетинання, шорсткість обробленої поверхні має характерну рівномірну матову структуру. Встановлено, що зі зменшенням розмірів зерен при вільному шліфуванні переважає рух ковзання, тому що при цьому зменшується величина обертального моменту, що діє на зерно. У зв'язку з цим зерна дрібних алмазних порошоків у вільному стані за характером їх роботи наближаються до зв'язаних.

Характер зношування вільних і закріплених зерен значно відрізняється. У вільного зерна, яке в процесі шліфування обертається, зношується практично вся поверхня, поперечний розмір поступово зменшується, і воно фактично перестає працювати при надходженні в зону обробки свіжих, більших за розмірами зерен. У закріпленого зерна зношується частина, що виступає, і продовжує працювати й при підключенні до роботи нових зерен, які виринають зі зв'язки інструменту по мірі його зносу. Це зерно працює до того моменту, поки сила утримання у зв'язці не досягне значення, що відповідає величині критичного закладення. Тому ефективність використання закріплених зерен на 3-4 порядки вища, ніж зерен у вільному стані.

3.2. Алмазний інструмент для шліфування оптичних поверхонь

Особливе місце серед інструментів для алмазної обробки скла займають інструменти для тонкого алмазного шліфування (ТАШ) і надтонкого алмазного шліфування (НТАШ) точних поверхонь оптичних деталей. До інструментів такого типу пред'являються дуже жорсткі вимоги щодо точності геометричної форми і розмірної стійкості. Інтенсивність зносу робочого шару інструменту і характер його зносу по колових зонах оцінюють за зміною коефіцієнта заповнення, що характеризує щільність заповнення алмазоносним шаром поверхні інструменту в кожній її коловій зоні. За коефіцієнт заповнення прийнято величину, що показує довжину алмазоносного шару на поверхні інструменту по концентричних колах різних радіусів і визначається формулою

$$k_i = \frac{l_{ax}}{2\pi r}, \quad (3.1)$$

де l_{ax} – довжина алмазоносного шару інструменту на колі радіуса r .

Інтегральний коефіцієнт заповнення K_i , що показує загальну довжину алмазоносного шару в радіальному напрямку інструменту в частках $(R - r_0)$, визначається за формулою

$$K_i = \frac{1}{(R - r_0)} \int_{r_0}^R k_i(r) dr, \quad (3.2)$$

де R – радіус інструменту; r_0 – радіус центрального отвору інструменту.

Характер зносу алмазоносного шару інструменту оцінюється коефіцієнтом рівномірності зносу σ , який визначається за формулою

$$\sigma = \left| 1 - \frac{V(r_0)}{V(R)} \right|, \quad (3.3)$$

де $V(r_0)$ і $V(R)$ – інтенсивності зносу алмазоносного шару в центрі інструменту і на його краю відповідно. Даний коефіцієнт має сенс тільки в тому випадку, коли залежності інтенсивності зносу алмазоносного шару інструменту від радіуса його колових зон r є монотонними функціями. Чим менше величина цього коефіцієнта, тим рівномірніше в процесі обробки плоских поверхонь оптичних деталей зношується алмазоносний шар інструменту (при рівномірному зносі $\sigma = 0$).

Конструкція і характеристика алмазоносного шару інструменту значною мірою впливають на його працездатність при плоскому шліфуванні оптичних деталей, зокрема, на величину та характер його зносу, що є головною особливістю процесів прецизійного формоутворення поверхонь оптичних деталей інструментом із синтетичних алмазів.

3.3. Конструкція робочого шару інструменту

Якісна оцінка зносостійкості алмазного інструменту з різними конструкціями алмазоносного шару (суцільний шар (а), шар у вигляді спіралі Архімеда (в) чи логарифмічної спіралі (г), шар у вигляді променів, що виходять з центра інстру-

менту (д), шар, що складається з дискретно розташованих алмазних таблеток (б) з їх розташуванням по косинусоїді в полярній системі координат або в точках перетину астроида з концентричними колами тощо) здійснюється шляхом аналізу кривих розподілу коефіцієнтів заповнення k_i за радіусом r . У результаті такого аналізу (рис. 3.1) показано, що швидкість зносу алмазного шару в центрі інструменту буде найвищою в інструменті з алмазозносним шаром, виконаним у вигляді спіралі Архімеда, а найнижчою – у суцільного інструменту.

На відміну від сферичного інструменту, найбільш високу розмірну стійкість якого можна досягти в тому випадку, коли значення коефіцієнта заповнення зменшується з наближенням до центра інструменту, у плоского інструменту максимальна зносостійкість досягається в тому випадку, коли коефіцієнт заповнення зменшується з віддаленням від центра інструменту. На основі цього можна вважати, що найбільш зносостійкими будуть суцільний інструмент і інструменти, алмазозносні шари яких виконані у вигляді логарифмічної спіралі та променів, що виходять з центра інструменту. Інструменти з суцільним алмазозносним шаром і шаром, виконаним у вигляді архімедової спіралі, з постійним у напрямку від центра до краю інструменту коефіцієнтом заповнення, будуть зношуватися в процесі роботи найбільш нерівномірно (у центрі інструменту – більше, на краю – менше), що призведе до зниження розмірної стійкості та зносостійкості інструменту. Зносостійкість інструменту з алмазозносним шаром, виконаним у вигляді Архімедової спіралі, можна істотно підвищити, збільшуючи ширину алмазозносного шару та зменшуючи крок спіралі.

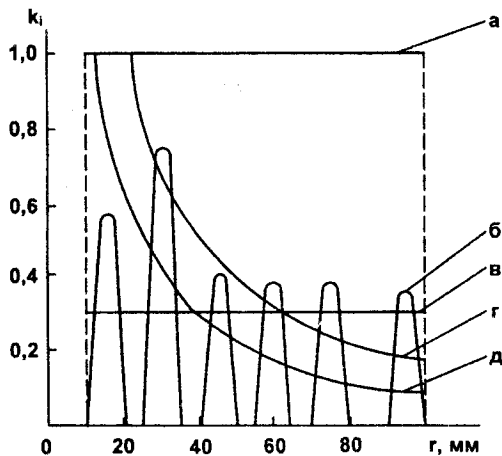


Рис. 3.1. Криві розподілу коефіцієнтів заповнення k_i за радіусом r

(де ω_1 , ω_2 – кутові швидкості обертання оброблюваної деталі та інструменту, l – відстань між центрами інструменту та деталі).

Найбільш близькі до цієї залежності розподіли коефіцієнта заповнення мають інструменти з алмазозносним шаром, виконаним у вигляді логарифмічної

Інтегральний коефіцієнт заповнення характеризує загальну довжину алмазозносного шару інструменту в радіальному напрямку і величину площі алмазозносного шару на робочій поверхні інструменту. У зв'язку з цим, величина зносу алмазозносного шару інструменту тим менше, чим більше інтегральний коефіцієнт заповнення.

Для забезпечення рівномірного зносу алмазозносного шару інструменту необхідно, щоб коефіцієнт заповнення залежно від радіуса змінювався за законом виду:

$$k_i = \text{const} / r |(\omega_2 - \omega_1)r + \omega_1 l|,$$

спіралі та променів, що виходять із центра інструменту (рис. 3.1). Інструменти з такою конструкцією алмазозносного шару зношуються в процесі шліфування рівномірніше.

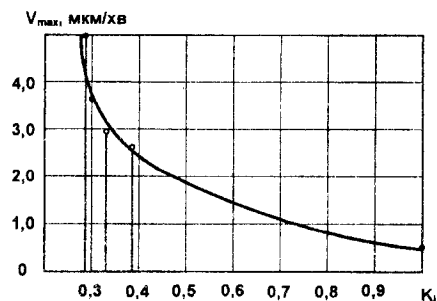


Рис. 3.2. Залежність інтенсивності зносу алмазозносного шару від інтегрального коефіцієнта заповнення

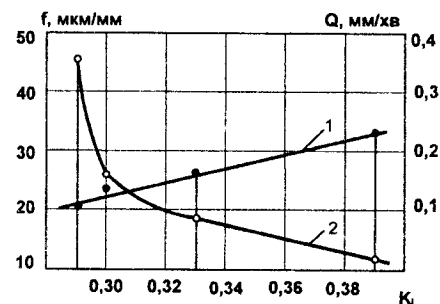


Рис. 3.3. Залежність продуктивності шліфування Q (1) і коефіцієнта відносного зносу f (2) від інтегрального коефіцієнта заповнення

Більш рівномірного зносу алмазозносного шару інструменту можна досягти і шляхом зміни концентрації алмазних зерен. Можна розрахувати необхідну концентрацію алмазного порошку для розташованих у різних колових зонах елементів. Однак необхідність застосування елементів з цілою гамою концентрацій алмазного порошку для забезпечення рівномірного зносу інструменту обумовлює необхідність розробки і виробництва невиправдано великої кількості алмазних таблеток з різною концентрацією алмазного порошку, ускладнює технологію виготовлення інструменту та збільшує його вартість. У зв'язку з цим забезпечення рівномірності зносу інструменту шляхом зміни концентрації алмазного порошку вздовж його радіуса є недоцільним.

Розмірна стійкість інструменту характеризується періодом його роботи між виправленнями форми. У процесі шліфування поверхня алмазозносного шару інструменту змінює свою спочатку плоску форму, спрацьовується, утворюючи опуклу ("бугор") чи ввігнуту ("яма") поверхні, що виправляється періодичним виправленням форми його робочої поверхні. Зносостійкість інструменту в таких умовах, доцільно оцінювати за інтенсивністю зносу алмазозносного шару в зоні, величина зносу в якій максимальна, тому що саме вона визначає кількість необхідних виправлень за час роботи інструменту і, відповідно, його розмірну стійкість. На рис. 3.2. приведено експериментальну залежність максимальної інтенсивності зносу алмазозносного шару інструменту від величини його інтегрального коефіцієнта заповнення, на основі якої можна прогнозувати його зносостійкість.

З іншого боку, задаючи необхідну величину зносостійкості інструменту, обчислюють величину інтегрального коефіцієнта заповнення, яку можна забезпечити за допомогою вибору певної конструкції алмазозносного шару, що дуже важливо при розробці нових видів інструменту.

Дослідження впливу конструкції алмазозносного шару інструменту на його продуктивність дозволило знайти кореляцію між величинами продуктивності

Дослідження впливу конструкції алмазозносного шару інструменту на його продуктивність дозволило знайти кореляцію між величинами продуктивності шліфування та інтегрального коефіцієнта заповнення. Експериментальну залежність продуктивності шліфування Q від величини інтегрального коефіцієнта заповнення K_i приведено на рис. 3.3 (1), яка являє собою лінійну функцію. Тобто продуктивність шліфування плоскої поверхні оптичної деталі алмазним інструментом пропорційна величині його інтегрального коефіцієнта заповнення.

Зі збільшенням інтегрального коефіцієнта заповнення поверхні інструменту алмазозносним шаром інтенсивність його зносу зменшується. Отриману залежність можна апроксимувати такою емпіричною формулою

$$V_{\max} = \frac{a}{(K_i - B)}, \quad (3.4)$$

де a і B – чисельні коефіцієнти, значення яких залежать від умов обробки, зернистості алмазів в інструменті тощо.

За цією формулою, знаючи величину інтегрального коефіцієнта заповнення, можна обчислити максимальну інтенсивність зносу алмазозносного шару і визначити зносостійкість інструменту. За формулою (3.4) можна також для різних конструкцій алмазозносного шару інструменту, знаючи величину інтегрального коефіцієнта заповнення, без проведення експериментальних досліджень оцінити величину їх зносостійкості.

Оцінка величини коефіцієнта відносного зносу при алмазному шліфуванні плоских поверхонь оптичних деталей інструментами з різною конструкцією алмазозносного шару дозволяє зробити висновок про те, що між величиною коефіцієнта відносного зносу інструментів і величиною їх інтегральних коефіцієнтів заповнення існує залежність, типу обернено-пропорційної, яка приведена на рис. 3.3. (крива 2). З рис. 3.3. випливає, що інструменти з алмазозносним шаром, виконаним у вигляді логарифмічної спіралі мають найбільшу продуктивність шліфування за мінімальної величини коефіцієнта відносного зносу.

На рис. 3.4. приведені експериментальні дані з інтенсивності зносу алмазозносного шару інструментів із різною конструкцією (типів "а" – "д") по колових зонах радіуса r . Аналіз приведених залежностей показує, що інструменти з алмазозносним шаром, виконаним у вигляді логарифмічної спіралі, спрацьовуються в процесі роботи на "бургор", інструменти ж з іншою конструкцією алмазозносного шару спрацьовуються на "яму".

Коефіцієнти рівномірності зносу σ для різних конструкцій алмазозносного шару інструментів становлять: а – 2,0; б – 3,6; в – 1,5; г – 0,14; д – 1,0. Застосування коефіцієнтів рівномірності σ для оцінки характеру зносу інструментів, у даному випадку правомірно, оскільки залежності інтенсивності зносу інструментів від їх радіуса r є монотонними.

Мінімальне значення коефіцієнта рівномірності зносу $\sigma = 0,14$ притаманне інструментам з алмазозносним шаром, виконаним у вигляді логарифмічної спіралі. Таблеткові інструменти в процесі роботи зношуються нерівномірно, інтенсивність зносу в центрі більша, ніж на краю. Розташування таблеток на поверхні інструменту по концентричних колах призводить до нерівномірного зносу

алмазозного шару і не може бути рекомендоване для процесу плоского шліфування оптичних деталей.

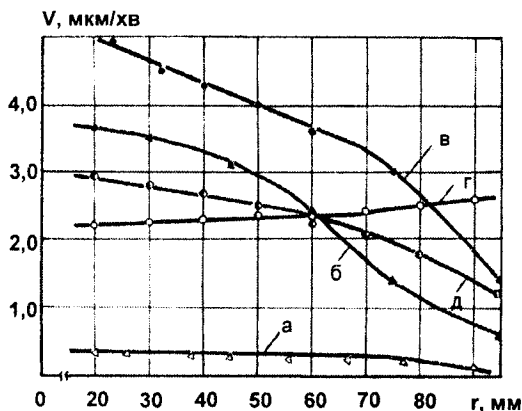


Рис. 3.4. Залежності інтенсивності зносу алмазозного шару інструментів з різною конструкцією від радіуса колових зон r

Суцільні інструменти та інструменти з алмазозним шаром, виконаним у вигляді спіралі Архімеда, коефіцієнт заповнення яких по всій поверхні однаковий, також не забезпечують рівномірного зносу і високої точності форми поверхонь оптичних деталей, що обробляються.

Більш рівномірно (інтенсивність зносу алмазозного шару в центрі інструменту і на краю відрізняються в 2 рази) у процесі плоского шліфування зношуються інструменти, алмазозний шар яких виконаний у вигляді променів, що виходять з центра.

Найбільш рівномірно в процесі шліфування зношуються інструменти з алмазозним шаром, виконаним у вигляді логарифмічної спіралі.

3.4. Характеристика робочого шару інструменту

Стабільна працездатність алмазних інструментів істотно залежить від характеристики його алмазозного шару – розмірів алмазних зерен і концентрації алмазного порошку, твердості зв'язки тощо. Продуктивність шліфування, знос алмазозного шару інструменту, шорсткість обробленої поверхні змінюються також залежно від тривалості обробки і визначаються режимами роботи інструменту.

Експериментально встановлено, що властивості зв'язки алмазного інструменту визначають продуктивність шліфування і стабільність його роботи. На діаграмі (рис. 3.5) зазначені чисельні значення продуктивності шліфування плоских поверхонь оптичних деталей інструментами на різних зв'язках. З діаграми випливає, що найменшою продуктивністю шліфування володіє інструмент на зв'язці М17-01. Інструменти на металевих зв'язках М17-08, М0-15, а також вироблені фірмами "Дама" і "Роденшток" (Німеччина), показують при

іспитах приблизно однакові результати. Відхилення значень продуктивності шліфування цими інструментами порівнянні з похибками їхнього визначення.

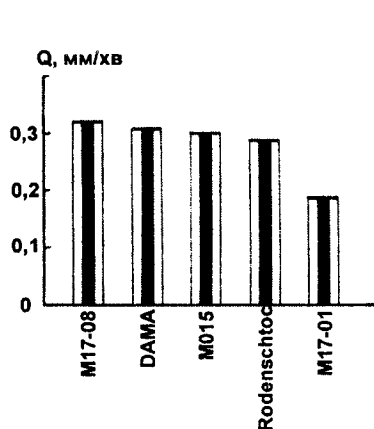


Рис. 3.5. Продуктивність шліфування оптичних деталей зі скла Q інструментами на різних зв'язках

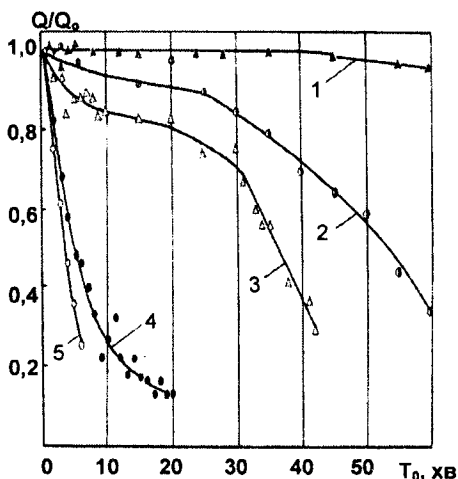


Рис. 3.6. Залежність продуктивності шліфування від тривалості обробки для інструментів на різних зв'язках

Істотною є залежність продуктивності алмазного шліфування оптичних деталей від тривалості процесу обробки. На рис. 3.6. представлено залежність обробки для інструментів на різних зв'язках. Продуктивність алмазного шліфування різна для інструментів на різних зв'язках і зменшується зі збільшенням його тривалості. Якісно оцінюючи працездатність інструментів з погляду втрати продуктивності при плоскому шліфуванні оптичного скла ("засалювання"), слід зазначити, що інструменти на металевих зв'язках, володіючи значною величиною продуктивності шліфування за перший цикл обробки, досить швидко втрачають свої ріжучі властивості.

Відомо, що залежність продуктивності алмазного шліфування оптичних деталей від тривалості процесу обробки виражається експоненціальною функцією, а працездатність інструменту оцінюється коефіцієнтом засалювання, що представляє собою похідну продуктивності шліфування за часом. Однак, як випливає з рис. 3.6, введений у такий спосіб коефіцієнт засалювання залежить від часу обробки. У зв'язку з цим, для оцінки працездатності інструменту користуються величиною часу засалювання τ – часу, протягом якого продуктивність шліфування зменшується в e раз (e – основа натуральних логарифмів).

Зазвичай будують залежності продуктивності процесу шліфування від його тривалості в напівлогарифмічному масштабі (у таких координатах ці функції мають вигляд лінійних залежностей), з яких і визначається величина τ .

Зменшення продуктивності шліфування зі збільшенням тривалості обробки для інструментів з різною характеристикою алмазоносного шару описується рівнянням

$$Q(T_0) = Z \cdot Q_0 \exp\left(-\frac{\xi}{T_0}\right), \quad (3.5)$$

де Z і ξ – сталі коефіцієнти.

Шорсткість поверхонь оптичних деталей, оброблених інструментами на різних зв'язках оцінюється висотними параметрами мікропрофілю, що у випадку використання алмазів однакової зернистості (20/14) становлять: $R_a = 0,25-0,28$ мкм,

$$R_{\max} = 1,25-1,63 \text{ мкм.}$$

Варто також звернути увагу на ту обставину, що при алмазній обробці оптичних деталей, зокрема, при тонкому і надтонкому алмазному шліфуванні прецизійних поверхонь величезний вплив на працездатність інструменту і точність формоутворення поверхонь, що обробляються, мають режимні й кінематичні параметри процесу обробки. При неправильному настроюванні устаткування за зазначеними параметрами ніяка оптимізація конструкції й характеристики робочого шару алмазного інструменту не забезпечують можливості обробки поверхонь з вимогами "за кольором" – деталей точної оптики.

3.5. Вплив режимних і кінематичних параметрів процесу шліфування на точність формоутворення оптичних поверхонь

До теперішнього часу єдиним методом, що забезпечує формоутворення поверхонь оптичних деталей з високою точністю, є метод притирання. Найбільш складною є його реалізація при одержанні плоских поверхонь. До недоліків даного методу відносять неможливість заздалегідь установити радіус кривини оброблюваної поверхні, необхідність виправлення інструменту та перенастроювання верстата в процесі обробки.

Останніми роками багато дослідників намагаються за допомогою інженерних розрахунків створити умови для керування формоутворенням оптичних поверхонь. Як правило, всі існуючі методики розрахунку форми поверхонь інструменту й деталі, що притираються одна до одної, засновані на гіпотезі Престона. За методикою С.М.Кузнєцова, форма оброблюваної поверхні є функцією співвідношення діаметра деталі і ширини кільця інструменту, швидкостей їх обертання при постійному тиску й формі оброблюваної поверхні. Дана методика прийнятна для розробленого С.М.Кузнєцовим і Л.І.Шевельковою "стабілізованого" процесу формоутворення плоских поверхонь оптичних деталей. Методика С.І.Винокура заснована на постійності тиску і враховує нерівномірність розподілу швидкостей, вихід за край і динаміку обертання верхньої ланки системи деталь-інструмент. Форма одержаної поверхні деталі визначається як функція часу обробки. Подальший розвиток методик розрахунку форми поверхонь, що обробляються, одержали в кінематичних програмах М.М.Семібратова, що застосовуються в технологічних процесах виготовлення оптичних деталей на операціях шліфування й полірування. Методика Л.С.Цеснека відрізняється від названих тим, що поряд з урахуванням кінематич-

них параметрів процесу формування при визначенні величини зносу поверхонь інструменту й оброблюваної деталі береться до уваги і розподіл тиску.

Інший підхід до розрахунку еволюції форми поверхонь інструменту і деталі заснований на мікроскопічній ймовірнісній моделі взаємного стирання, відповідно до якої знос тіла в деякій точці пропорційний ймовірності утворення в ній диспергованої частки. Ця методика не вимагає знання епюри тиску, якщо відома функція розподілу часток зносу за розмірами.

Обробка поверхонь оптичних деталей алмазним інструментом, що має високу зносостійкість, дозволяє не тільки значно збільшити продуктивність знімання матеріалу і поліпшити якість оброблених поверхонь, але й керувати характером зносу алмазозносного шару, що є необхідною умовою створення автоматизованих технологічних процесів. У зв'язку з цим, дуже актуальним є дослідження впливу конструкції й характеристики алмазозносного шару інструменту, режимних і кінематичних параметрів процесу обробки на точність формування плоских поверхонь оптичних деталей.

Виходячи з відомого положення про пропорційність об'єму матеріалу, знятого в процесі обробки, кількості витраченої на це роботи, інтенсивність знімання матеріалу з оброблюваної поверхні деталі по її колових зонах з радіусом ρ можна визначити за формулою

$$V(\rho) = K p_a \bar{U} L_\rho, \quad (3.6)$$

де K – коефіцієнт пропорційності; p_a – тиск; \bar{U} – середня відносна швидкість обертання інструменту і деталі; L_ρ – шлях тертя елемента оброблюваної поверхні, розташованого в коловій зоні з радіусом ρ , по робочій поверхні алмазозносного шару інструменту.

Величина шляху тертя L_ρ , поряд з коефіцієнтом покриття (виходом деталі за край інструменту в процесі обробки), враховує заповнення робочої поверхні алмазозносним шаром (у випадку його дискретності). Величина тиску в кожній точці оброблюваної поверхні деталі, що перебуває в контакті з поверхнею алмазозносного шару інструменту, вважається сталою.

Для визначення \bar{U} модуль відносної швидкості в довільній точці контакту інструменту і деталі усереднювався за координатними змінними, а саме: за радіусом колових зон інструменту $r \in [l_k - \rho, l_k + \rho]$ і відстанню між центрами інструменту й деталі $l_k \in [l_0, l_0 + L]$ (рис. 3.7) відповідності до формули

$$\bar{U} = \frac{1}{2\rho L} \int_{l_0}^{l_0+L} dl_k \int_{l_k-\rho}^{l_k+\rho} W dr, \quad (3.7)$$

де L – довжина штриха (амплітуда зворотно-поступального переміщення деталі та інструменту відносно один одного); $l_0 = e_0 - \frac{L}{2}$ – мінімальна відстань між центрами

інструменту й оброблюваної деталі e_0 – несиметрія штриха, $l_k = l_0 + \frac{2L}{\tau n_1} \cdot k$ – миттєва відстань між центрами інструменту і деталі на k -ому оберті деталі,

$k = 0, 1, \dots, \frac{\tau \cdot n_1}{2}$, τ – час подвійного ходу деталі; n_1 – кількість обертів деталі за одиницю часу; $W = \sqrt{(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 r^2 - \omega_1 \rho^2) + \omega_1 \omega_2 l_k^2}$ – модуль відносної швидкості; ω_1, ω_2 – кутові швидкості обертання деталі та інструменту.

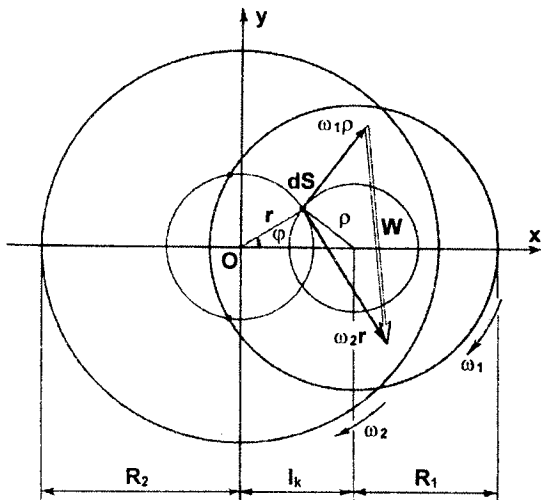


Рис. 3.7. Схема обробки плоских поверхонь оптичних деталей за методом притирання

Такий метод усереднення відносної швидкості дозволяє знайти значення \bar{U} для точок, розташованих у коловій зоні оброблюваної поверхні з радіусом ρ . Це можливо тому, що спочатку знаходиться середня величина відносної швидкості для точок, що лежать на колі радіуса ρ при $l_k = \text{const}$, тобто W інтегрується за r , а потім враховується зміна усередненої за r відносної швидкості зі зміною відстані між центрами інструменту та оброблюваної деталі. При цьому порядок інтегрування має бути таким же, як у виразі (3.7), оскільки область інтегрування за r залежить від ρ і l_k .

Шлях тертя з урахуванням коефіцієнта заповнення, що характеризує щільність заповнення алмазосним шаром поверхні інструменту в кожній її точці, а також з урахуванням того, що відстань між центрами інструменту і деталі за час одного оберту останньої практично не змінюється, визначається сумою криволінійних інтегралів

$$L_p = \sum_{k=0}^{\tau n_1 / 2} \int_C k_i(x, y) dl, \quad (3.8)$$

де C – контур, що являє собою коло радіуса ρ на поверхні деталі в системі координат XOY з початком, що збігається з центром інструменту.

Інтенсивність зносу алмазозносного шару інструменту залежно від радіуса його колових зон r обчислюється за рівнянням, аналогічним виразу (3.6), за умов і припущеннях, прийнятих при розгляді інтенсивності знімання матеріалу з оброблюваної поверхні. Відносна швидкість обертання інструменту і деталі в точці, у якій знаходиться елементарна ділянка алмазозносного шару інструменту dS у даний момент часу (рис. 3.7), визначається за формулою

$$W_{\varphi} = \sqrt{(\omega_1 - \omega_2)^2 r^2 + \omega_1^2 l_k^2 - 2\omega_1(\omega_1 - \omega_2)rl_k \cos \varphi}, \quad (3.9)$$

де φ – координата ділянки dS у полярній системі координат з полюсом, що збігається з центром інструменту.

Навіть при фіксованому значенні радіуса колової зони на робочій поверхні інструменту модуль відносної швидкості є змінним при зміні кута φ . Однак, вважаючи модуль постійним на елементарній ділянці dL і інтегруючи добуток p_a на W_{φ} уздовж дуги AB , з урахуванням того, що $dL = rd\varphi$, для розрахунку інтенсивності зносу алмазозносного шару інструменту можна одержати вираз

$$V(r) = K_2 p_a r \sum_{k=0}^{\lfloor \frac{1}{2} n_2 \rfloor} \int_0^{\varphi_k} W_{\varphi} d\varphi, \quad (3.10)$$

де K_2 – коефіцієнт пропорційності; n_2 – кількість обертів інструменту в одиницю часу.

Кут φ_k у виразі (3.10) фактично являє собою коефіцієнт покриття для різних зон інструменту.

Розрахунок інтенсивності знімання оброблюваного матеріалу і зносу алмазозносного шару за приведеними формулами дозволяє одержати матриці $\Delta S(r_i, T_{0i})$; $\Delta h(\rho_i, T_{0i})$, що описують еволюцію форми робочої поверхні інструменту й оброблюваної поверхні деталі за різних режимних і кінематичних параметрів.

Інтенсивність знімання матеріалу з оброблюваної поверхні деталі лінійно зростає при збільшенні мінімальної відстані між центрами інструменту і деталі та довжини штриха, причому залежність інтенсивності знімання від цих параметрів може бути описана емпіричною формулою:

$$V(\rho) = [\alpha(l_0 + \frac{L}{2}) - 1] (\alpha = 12,5 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}). \quad (3.11)$$

Можна також показати, що існують комбінації l_0 і L , при яких величина і характер зносу інструменту (чи знімання матеріалу з оброблюваної поверхні) однакові. Комбінації l_0 і L – тотожні за виконання умови $e_0 = l_0 + \frac{L}{2} = \text{const}$.

Величина e_0 – несиметрія штриха визначає інтенсивність зносу алмазозносно-

го шару інструменту й знімання матеріалу з оброблюваної поверхні деталі відповідно до формули (3.11) і їх характер, оскільки є усередненою характеристикою зворотно-поступального переміщення деталі та інструменту відносно один одного в процесі обробки.

Вивчення еволюції форми робочої поверхні інструменту при різному настроюванні верстата показало, що залежність інтенсивності зносу алмазозного шару від радіуса його колових зон можна апроксимувати функцією виду $V(r) = V(r_0) + \gamma \cdot r^2$, причому на коефіцієнт γ впливають кінематичні параметри процесу обробки.

Залежність цього коефіцієнта від параметра μ , рівного відношенню несиметрії штриха до різниці радіусів інструменту і деталі $\mu = \frac{e_0}{R_2 - R_1}$, представляється знакозмінною функцією (рис. 3.8, крива 1) і може бути апроксимована в такий спосіб (рис. 3.8, крива 2):

$$\gamma = 1,8 \cdot 10^{-4} \sin[2\pi(\mu - \mu_0)], \quad (3.12)$$

де $\mu_0 = 0,85$.

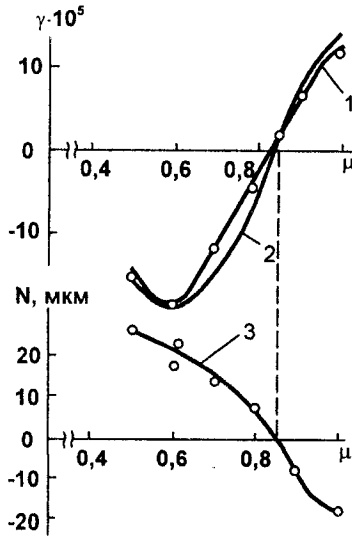


Рис. 3.8. Характер зносу алмазозного шару інструменту (1, 2) і неплоскостність обробленої поверхні деталі (3) за різних значень параметра μ

Періодичність функції (3.12) обумовлює рівномірний знос інструменту за декількох значень μ . Можна відмітити, що отримане експериментально значення $\mu_0 = 0,85$ близьке до розрахованого (0,90).

Експериментальне дослідження еволюції форми оброблюваної поверхні деталі показало, що існують такі значення довжини і несиметрії штриха, що при від-

повідному їм настроюванню верстата дають можливість протягом тривалого часу одержувати плоскі поверхні з мінімальним відхиленням від площинності.

Залежність неплоскостності оброблюваної поверхні деталі N від параметра μ , може бути описана синусоїдальною функцією (рис. 3.8, крива 3):

$$N = N_0 \sin[2\pi(\mu_0 - \mu)], \quad (3.13)$$

де $\mu_0 = 0,85$, $N_0 = 29 \cdot 10^{-6}$ м – сталі коефіцієнти для даного випадку обробки.

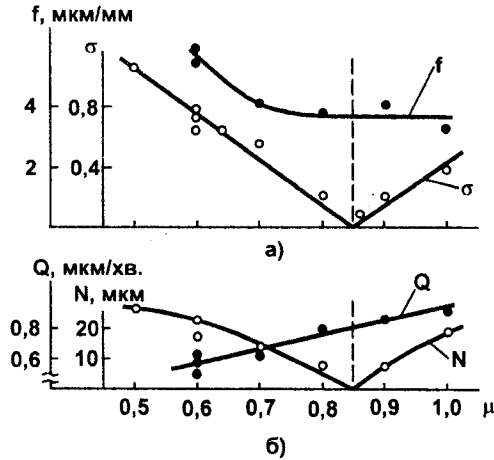


Рис. 3.9. Залежність неплоскостності оброблюваної поверхні N і продуктивності обробки Q , а також коефіцієнта рівномірності зносу інструменту σ і коефіцієнта його відносного зносу f від параметра μ

Залежності неплоскостності оброблюваної поверхні N , продуктивності обробки Q , коефіцієнта рівномірності зносу інструменту σ і коефіцієнта його відносного зносу f від параметра μ наведені на рис. 3.9. З нього видно, що оптимальні умови обробки необхідно вибирати таким чином, щоб забезпечувалися мінімальне відхилення від площинності обробленої поверхні і найбільш рівномірний знос інструменту за досить високої продуктивності.

Розділ 4

ПОЛІРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

4.1. Історія розвитку уявлень про процес полірування оптичних поверхонь

Результати досліджень механізму полірування неметалевих матеріалів, і в першу чергу скла, отримані більш ніж за 250-річний період, дозволили сформулювати ряд гіпотез і підходів, що пояснюють експериментально вивчені закономірності даного процесу. Однак у загальному вигляді розв'язати задачу про взаємодію поверхонь інструменту й оброблюваної деталі, незважаючи на зроблені багатьма дослідниками спроби, не вдалося через відсутність вирішення цілої низки питань теоретичної фізики, оптики і хімічної фізики. У 1950–1960-х роках проф. А.С.Ахматов висловив ідею про можливість розгляду процесу тертя твердих тіл як взаємодії двох конденсованих фаз. Однак вона не одержала подальшого розвитку, оскільки на той час ще не було вирішено багато питань теорії сил Ван дер Ваальса, не була розроблена краплинна модель руйнування поверхонь при терті, не були розвинуті уявлення про кластерну природу конденсованого стану речовини, а структура скла розглядалася відповідно до гіпотези Захаріасена у вигляді нескінченної сітки. Крім того, роль МОТС – води в процесі полірування зводилася лише до хімічної взаємодії з поверхнею скла. Зазначені об'єктивні причини не дозволили тоді розвинути гіпотези й підходи до механізму полірування скла та інших оптичних матеріалів.

4.2. Кластерна модель зносу оптичної поверхні при поліруванні

Для дослідження фізико-хімічних процесів формування поверхонь деталей з неметалевих матеріалів інструментом зі зв'язаним полірувальним порошком і вивчення закономірностей цього процесу було розроблено кластерну модель зносу поверхонь інструменту й оброблюваної деталі при поліруванні. Зазначена модель, сформульована в загальному вигляді, апробована й експериментально підтверджена щодо процесу полірування кварцу і кварцового скла. Виходячи з відомих уявлень про їхню будову, структуру скла і чистого кремнезему представляють як квазітетраедричну. Це дозволяє вважати, що вони складаються з фрагментів $O=Si=O$ (відповідно до стехіометричної формули), що мають лінійну структуру та утворені "сильними" зв'язками $Si=O$. Окремі фрагменти SiO_2 зв'язані між собою за допомогою "слабких" зв'язків. Тобто в групі SiO_4 два зв'язки мають довжину 0,1606 нм, а два інші – 0,1612 нм. Кожний атом кисню з'єднаний з одним атомом кремнію за допомогою більш довгого зв'язку, а з іншим – більш короткого. Це рівносильно наявності в кремнеземі квазімолекул SiO_2 з внутрішньомолекулярною відстанню 0,1606 нм і міжмолекулярною відстанню 0,1612 нм. Незважаючи на малу різницю внутрішньо- та

міжмолекулярних відстаней, сили міжмолекулярної взаємодії значно менші, ніж внутрішньомолекулярної (за даними аналізу спектрів комбінаційного розсіювання світла відношення силових сталих становить 1,8).

Відомо, що при втомі матеріалу відділення часток зносу є результатом нагромадження в поверхневому шарі ушкоджень від знакозмінного його деформування. Деформування майбутньої частки зносу можна уявити як її коливання біля положення рівноваги, тобто розглядати тверде тіло як сукупність точкових мас, що коливаються. Енергія системи при цьому може набирати строго визначених значень.

При описі фазових переходів, критичних явищ, коливань ґраток тощо використовується кластерна модель, що дозволяє уявити будь-яку конфігурацію часток у вигляді набору окремих кластерів. Кластер складається з l часток (фрагментів), тісно зв'язаних одна з одною й здатних утворити щільну краплю, вільна енергія якої така ж, як і основного тіла.

Слід зазначити, що кластерний підхід, який є ефективним методом досліджень у тих областях, де ані макроскопічний, ані мікроскопічний підходи не дають позитивного результату, примітний не тільки тим, що оперує реально існуючими, експериментально вивченими агрегаціями – кластерами, а й тим, що є методологією дослідження властивостей фізичних об'єктів у проміжному масштабі. Для опису механізму процесу полірування скла, при якому в результаті фізико-хімічних явищ, що відбуваються на атомно-молекулярному рівні (адгезійний і "втомлювальний" знос, розриви хімічних зв'язків), виникають макроскопічні зміни структури і властивостей оброблюваної поверхні в умовах знімання оброблюваного матеріалу і зміни геометричних розмірів оброблюваної деталі, використання такого підходу є необхідним.

У загальному вигляді кластерна модель зносу сформульована в такий спосіб:

- поверхня оброблюваного матеріалу (чи інструменту) складається з набору кластерів;
- при силовій взаємодії поверхонь, що контактують, кластери починають коліватися біля положення рівноваги;
- знос поверхні є результатом видалення (відриву) з неї кластерів.

Щодо процесу полірування неметалевих поверхонь, виходячи з кластерної моделі, можна визначити інтенсивність зносу поверхонь інструменту та деталі. Використовуючи процедуру визначення швидкості знімання скла залежно від параметрів процесу полірування, Матушок і Коуцький для розрахунку продуктивності процесу полірування запропонували метод, відповідно до якого знос поверхні (знімання оброблюваного матеріалу) можна виразити схематично:

$$A + L \Rightarrow \left\{ \frac{A}{L} \right\},$$

де A і L – кластери на поверхнях скла й інструменту; символ \Rightarrow означає передачу енергії між кластерами; а символ $\left\{ \right\}$ – видалення кластера.

Нехай загальна кількість кластерів на одиниці поверхні оброблюваного матеріалу – a_1 , а кількість не збуджених кластерів (що не одержали енергії) – a_0 , тоді кількість збуджених кластерів $a = a_1 - a_0$.

Для оброблюваної поверхні ймовірність зносу $p(A)$ може бути визначена рівнянням $p(A) = k_1(a_1 - a_0)U$ (k_1 – коефіцієнт пропорційності; U – швидкість від-

носного переміщення поверхонь оброблюваної деталі й інструменту), а ймовірність відсутності зносу поверхні $d(A) = k_2 a_0$ або інакше $d(A) = k_3 V$ (V – об'єм вилученого матеріалу, k_2 та k_3 – також коефіцієнти пропорційності).

Тоді, визначаючи $a_0 = (k_3/k_2)V$, і з огляду на те, що виконується умова динамічної рівноваги $p(A) = d(A)$, можна одержати формулу для визначення об'єму вилученого матеріалу:

$$V = k_1 a_l U / [k_3 + (k_1 k_3 / k_2) U].$$

Останнє рівняння можна представити у вигляді:

$$V = \frac{U}{U + U_0} \cdot n_{kl} \cdot v_{kl}, \quad (4.1)$$

де $U_0 = k_2/k_1$ – характеристична швидкість; $n_{kl} = k_2 a_l$ – кількість кластерів, які

видаляються з поверхні; $v_{kl} = \frac{1}{k_3}$ – об'єм кластера. Розмірності величин у фо-

рмулі (4.1) такі: $[k_1] - \text{м} \cdot \text{с}$; $[k_2] - \text{м}^2$; $[k_3] - \text{м}^{-3}$; $[n_{kl}] - 1$; $[v_{kl}] - \text{м}^3$.

З отриманого рівняння зносу (4.1) випливає, що знімання вилученого матеріалу пропорційне добутку об'єму одного кластера на кількість кластерів, що знімають з поверхні. Залежність об'єму вилученого матеріалу від сили притиску може бути наведена в неявному вигляді (від цієї сили залежить кількість кластерів, що видаляються).

Характеристична швидкість є відношенням k_2/k_1 , тобто відношенням кількості не збуджених кластерів (відсутність зносу) до збуджених (наявність зносу). При $U_0 = 0$ не збуджених кластерів немає, усі вони одержали енергію, достатню для відриву, і $U/(U + U_0) = 1$, тобто $V = n_{kl} v_{kl}$. При $U_0 \rightarrow \infty$ немає збуджених кластерів, $U/(U + U_0) \rightarrow 0$ і $V = 0$. При $U = U_0$ множник $U/(U + U_0) = 1/2$ і $V = (n_{kl} v_{kl})/2$. Це означає, що при величині U , рівній характеристичній, половина всіх кластерів є порушеною і перетворюється в частки зносу. Після кожного елементарного акта відриву кластера, наступний кластер, переходячи у збуджений стан, також перетворюється на частку зносу, і процес зносу йде безупинно.

4.3. Взаємодія поверхонь оброблюваної деталі та інструменту в процесі полірування

При аналізі взаємодії поверхонь оброблюваної деталі й інструменту варто враховувати, що в цьому процесі беруть участь поверхні з дуже малими величинами параметрів шорсткості, які практично збігаються за формою. За таких умов необхідно враховувати молекулярні сили взаємодії між поверхнями оброблюваної деталі й інструменту (сили Ван дер Ваальса). Взаємодія Ван дер Ваальса між поверхнями оброблюваної деталі й інструменту, розділеними заповненою рідиною щільною (її товщина $l \gg 0,1$ нм, $l \ll l_{1,2}$ – товщини деталі й інструменту відповідно, чи l_1 і $l_2 \rightarrow \infty$) може бути описана силою, що діє на одиницю їх площі (рис. 4.1):

$$f_s(l) = - \frac{\hbar \cdot \omega_{123}}{8 \cdot \pi^2 l^3}, \quad (4.2)$$

де \hbar – стала Планка, $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ – діелектричні проникності матеріалів деталі, інструменту та технологічної рідини; ω – частота;

$$\omega_{123} = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \frac{[\epsilon_1(\omega) - \epsilon_3(\omega)] \cdot [\epsilon_2(\omega) - \epsilon_3(\omega)]}{[\epsilon_1(\omega) + \epsilon_3(\omega)] \cdot [\epsilon_2(\omega) + \epsilon_3(\omega)]} - \text{константа Ліфшиця}. \quad (4.3)$$

Знак мінус у формулі (4.2) відповідає притягання поверхонь. Відомо, що взаємодія Ван дер Ваальса є відштовхувальною, якщо $\epsilon_1^0 < \epsilon_3^0 < \epsilon_2^0$ чи $\epsilon_2^0 < \epsilon_3^0 < \epsilon_1^0$ (ϵ^0 – статична діелектрична проникність).

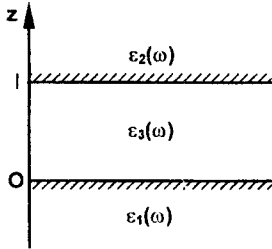


Рис. 4.1. Оптична модель системи "інструмент – шар рідини – оброблювана деталь зі скла"

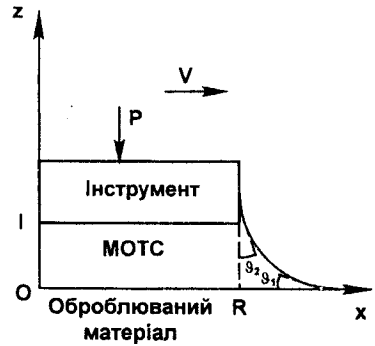


Рис. 4.2. Гідродинамічна схема процесу полірування оптичної поверхні

При розгляді гідродинамічної схеми процесу полірування (рис. 4.2) з умови нестисливості рідини випливає, що сила притиску оброблюваної деталі до інструменту дорівнює тиску усередині рідини й обумовлена силами поверхневого натягу F_s і силами тертя (в'язкості) F_v за відносного переміщення поверхонь. Можна показати, що

$$F_s = -\pi \cdot R \cdot \sigma_n (\cos \vartheta_1 + \cos \vartheta_2), \quad (4.4)$$

де R – радіус інструменту; σ_n – коефіцієнт поверхневого натягу рідини; ϑ_1, ϑ_2 – кути змочування рідиною поверхонь оброблюваної деталі й інструменту відповідно.

Знак мінус у формулі (4.4) показує, що вектор результуючої сили протилежний напрямку дії сили атмосферного тиску (сила спрямована в бік увігнутості викривленої поверхні рідини) і відповідає притягання поверхонь. Співвідношення (4.4) справедливе, якщо рідина змочує або не змочує обидві поверхні. Якщо ж змочується тільки одна з поверхонь, то взаємодія є відштовхувальною.

Сила тертя при переміщенні контактуючих тіл відносно в'язкої рідини може бути визначена як добуток в'язкості рідини η на площу $2\pi Rl$ і похідну відносно швидкості dV/dz . Остання визначається з рівняння Нав'є–Стокса для стаці-

онарного руху, нульових значень масових сил і градієнта тиску та граничних умов: при $z = 0, V = 0$, при $z = l, V = U$. Тоді $dV/dz = U/l$ і сила тертя визначається рівнянням

$$F_u = 2 \pi R U \eta. \quad (4.5)$$

Величина тиску, що створюється силою притиску, дорівнює тиску під викривленою поверхнею рідини і визначається за формулою $p_a = (F_s + F_u) / \pi r_l^2$ (r_l – радіус викривленої поверхні рідини, величина якого може бути виражена через товщину l між поверхнями інструменту та деталі, рис. 4.2).

Виходячи з того, що сила поверхневого натягу, яка спрямована вздовж вертикальної стінки інструменту, рівна $2\pi R \sigma_n \cos \vartheta_2$, а сила тяжіння рідини є величиною $\int 2\pi R h \rho g dR$ (ρ – густина рідини, $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, h – висота підйому рідини на краю інструменту, рис. 4.2), і також з огляду на те, що $dR = \text{tg } \vartheta_2 dh$, після інтегрування за h у межах від 0 до h можна одержати:

$$h = \sqrt{(2 \cdot \cos \vartheta_2 \cdot \sigma_n / \rho g \text{tg } \vartheta_2)}. \quad (4.6)$$

З урахуванням рівності сумарної сили ($F_s + F_u$), що викривляє поверхню рідини, і сили $\rho g l S$ (S – площа контакту оброблюваної деталі й інструменту), що виникає за рахунок гідростатичного тиску рідини, яка міститься між поверхнями інструменту і деталі, можна одержати співвідношення $l = (F_s + F_u) / \rho g$ та отримати вираз

$$\frac{h}{l} = \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \cos \vartheta_2 / \rho \cdot g \text{tg } \vartheta_2} (S / (F_s + F_u)). \quad (4.7)$$

Розрахунок величин h і l для процесу полірування плоскої поверхні деталі зі скла інструментом, що складається з полірувальних елементів "Аквапол", у присутності МОТС – води ($\vartheta_2 = 35,3^\circ$, $\vartheta_1 = 49,5^\circ$, $\sigma_n = 48,6 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$) дає значення порядку 2 мм і 100 мкм відповідно, що добре узгоджується з результатами їх експериментальної оцінки при змочуванні поверхонь деталі й інструменту в статичних умовах.

Радіус кривини скривленої поверхні рідини можна визначити через висоту підйому рідини h за значеннями кутів змочування (рис. 4.2):

$$r = h / (\cos \vartheta_1 - \sin \vartheta_2).$$

В умовах, коли відбувається процес полірування плоских поверхонь деталей зі скла, r становить величину порядку $18h$, що наближається до величини, яка спостерігається на досліді. Для випадку ідеального змочування $\vartheta_1 = \vartheta_2 = \vartheta = 0$ співвідношення між r і h визначається через граничне значення (r/h) , оскільки при наближенні величин кутів змочування до нуля $(r/h) = \lim_{\vartheta \rightarrow 0} (\cos \vartheta - \sin \vartheta)^{-1} = 1$.

З аналізу гідродинамічної схеми процесу полірування випливає, що тиск, утворюваний силами притиску, залежить від кутів змочування, коефіцієнтів поверхневого натягу і в'язкості рідини, її густини та геометричних розмірів інструменту й оброблюваної деталі за формулою

$$p_a = - \frac{\pi^2 R^3}{2S^2 \rho g l^2} \Phi(\vartheta_1, \vartheta_2, \sigma_n, \eta). \quad (4.8)$$

де

$$\Phi = [\sigma_n \cdot (\cos \vartheta_1 + \cos \vartheta_2) - 2U\eta]^3 \cdot \frac{\operatorname{tg} \vartheta_2}{\sigma_n} \cdot \left(\frac{\cos \vartheta_1}{\cos \vartheta_2} - \operatorname{tg} \vartheta_2 \right) \quad (4.9)$$

– функція технологічного середовища. У формулі (4.8), як і раніше в (4.4), знак мінус відповідає притяганню поверхонь.

Для реальних умов полірування при тиску, що утворюється за рахунок сили притискування інструменту до оброблюваної деталі $p_a = 0,05$ МПа остання формула дозволяє оцінити величину щілини між ними значенням порядку 1 мкм, що узгоджується з експериментальними даними ($l = 1,2$ мкм).

Для процесу полірування також властивою є незалежність фізико-хімічних процесів, що відбуваються на атомно-молекулярному рівні, від способу руйнування поверхні твердого тіла. Це впливає з аналізу таких явищ, як механоемісія електронів, триболомінесценція, утворення вільних радикалів і дефектів структури. Для кварцу, скла, іонних кристалів і ряду інших оптичних матеріалів смуги трибо-, адсорб- і фотолюмінесценції практично збігаються, що пояснюється збудженням тих самих центрів свічення. Крім того, при описі взаємодії Ван дер Ваальса властивості окремих атомів, чи молекул або конденсованих середовищ цілком враховуються в межах використання їх діелектричних проникностей як функцій частоти відповідно до рівнянь (4.2) і (4.3). За допомогою цих величин можна характеризувати спектри поглинання зазначених середовищ, що не є простим збігом, а являє собою закономірність у зв'язку з тим, що саме виникнення локального дипольного моменту обумовлено силами Ван дер Ваальса, і ним спричинено їх активність в інфрачервоному поглинанні.

Виходячи з прийнятої квазітетраедричної структури скла і кварцу і з огляду на ту обставину, що поглинання в інфрачервоній області спектра обумовлено коливаннями фрагментів SiO_2 , розглянемо поведінку останніх під дією зовнішнього збудження. Вважатимемо, що дія деформації поверхні оброблюваного матеріалу аналогічна дії електричного поля, тому що в обох випадках виникають дипольні моменти. Розглядаючи величину сприйнятливості X , визначену в рамках теорії дисперсії, на прикладі осциляторів (фрагментів, кластерів), що належать різним контактним поверхням, з урахуванням того, що в конденсованій речовині в інфрачервоній області поблизу власних частот ω_0 виконується умова $\gamma \ll \omega_p \ll \omega_0$ (ω_p – плазмова частота; γ – константа затухання), можна одержати для неї вираз

$$X = \frac{\omega_p^2}{4\pi} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2}, \quad (4.10)$$

де f_j – сила j -го осцилятора, а ω_{0j} – власна частота його коливань.

З огляду на те, що поперечний переріз розсіювання (енергія, що витрачається на взаємодію фрагментів) пропорційний X^2 (оскільки амплітуда коливання фрагментів A пропорційна X), можна скористатись співвідношенням

$$A = \frac{F^*}{(\omega_{01}^2 - \omega_{02}^2)}, \quad (4.11)$$

де F^* – функція, пропорційна величині збудження системи.

Ця функція є ніщо інше, як сила притягання Ван дер Ваальса контактних поверхонь, яка може бути визначена через питому силу відповідно до формули (4.2).

При взаємодії поверхонь інструменту й оброблюваної деталі амплітуда коливань кластерів збільшується. Поки кластер можна розглядати як гармонічний осцилятор, частота його коливань не змінюється. Одержуючи енергію, кластер переходить на більш високі енергетичні рівні, амплітуда його коливань збільшується, і розглядати його як гармонічний осцилятор уже неможливо. З урахуванням цього розглянемо кластери в ангармонічному наближенні, використовуючи теорію збурень.

З огляду на те, що на кластер діє періодичне збурення, і розбиваючи час його дії на проміжки, протягом яких енергія збурення обумовлена постійною силою F , що відхилила кластер з положення рівноваги, можна відомими методами теорії збурень одержати вирази для ймовірності P відриву кластерів з оброблюваної поверхні і для кількості збуджених кластерів N_0 :

$$P = \exp\left(-\frac{E_{hmd}}{E_{cl}}\right), \quad (4.12)$$

$$N_0 = \frac{2 \cdot W_{nm} \cdot t}{\pi \cdot \hbar}, \quad (4.13)$$

де E_{hmd} – енергія зв'язку, E_{cl} – енергія кластера, W_{nm} – енергія збурення, \hbar – стала Планка, t – час процесу полірування.

Енергія збурення кластера W_{nm} може бути визначена через роботу як добуток сили F на переміщення l . Оскільки збурення виникає внаслідок взаємодії поверхонь інструменту й оброблюваної деталі (взаємодія Ван дер Ваальса), то сила збурення може бути визначена безпосередньо з формули (4.2) як добуток $f_s(l)$ на площу їх контакту S . Відстань, на яку може бути переміщений кластер під дією цієї сили, дорівнює товщині l водяного прошарку між взаємодіючими поверхнями.

Виходячи з цього, для визначення кількості кластерів, що вилучаються з оброблюваної поверхні деталі, отримано формулу

$$n_{cl} = \frac{\omega_{123} \cdot S^3 \cdot p_a \cdot \rho \cdot g}{2\pi^5 R^3 \cdot \Phi(\vartheta_1, \vartheta_2, \sigma_n, \eta)} \cdot \exp\left(-\frac{E_{hmd}}{E_{cl}}\right) \cdot t. \quad (4.14)$$

Для визначення кількості фрагментів у кластері використано відношення енергій коливань кластера й одного фрагмента SiO_2 (квадратів амплітуд їхніх коливань). Позначивши розміри кластера і фрагмента відповідно s і l , з урахуванням того, що в 1 кмоль SiO_2 (молекулярна маса $M_1 = 60$) міститься N_a (число Авогадро) фрагментів SiO_2 , а в об'ємі кластера масою $v_{cl} \rho_1 - \xi$ фрагментів:

$$\xi = \frac{s}{l} = \frac{\omega_{01}^4}{(\omega_{01}^2 - \omega_{02}^2)^2}, \quad (4.15)$$

можна одержати

$$v_{cl} = \frac{M_1}{N_a \cdot \rho_1} \cdot \xi. \quad (4.16)$$

З рівнянь (4.1), (4.14) і (4.16) випливає, що об'єм вилученого при поліруванні матеріалу залежить від:

- ◆ технологічних параметрів процесу обробки (сили притиску інструменту до оброблюваної деталі, відносної швидкості їх взаємного переміщення, часу полірування);
- ◆ конструктивних параметрів деталі й інструменту (розмірів, номінальної площі контакту);
- ◆ фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу й інструменту (густини, молекулярної маси, енергії хімічного зв'язку, енергії кластера);
- ◆ гідродинамічних і гідростатичних характеристик технологічного середовища (кутів змочування, коефіцієнта поверхневого натягу і в'язкості);
- ◆ спектроскопічних характеристик контактуючих тіл (власних частот коливань фрагментів у матеріалах інструменту та оброблюваної деталі, діелектричних проникностей).

Рівняння зносу (4.1) відносно інтенсивності (продуктивності) знімання оброблюваного матеріалу може бути представлене у вигляді:

$$Q = \frac{3}{4\pi^5} \cdot \frac{p_a \cdot U}{U + U_0} \cdot \Omega \cdot E \cdot \Phi^{-1} \cdot \left(\frac{M_1 g}{N_a}\right) \left(\frac{\rho}{\rho_1}\right) \left(\frac{S}{R}\right)^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_{bind}}{E_{cl}}\right), \quad (4.17)$$

де Φ – функція технологічного середовища відповідно до виразу (4.9),

$$\Omega = \left(\frac{\omega_{01} \cdot \omega_{02}}{\omega_{01} + \omega_{02}}\right) \cdot \left(\frac{\omega_{01}^2}{\omega_{01}^2 - \omega_{02}^2}\right)^2 \text{ – частотна функція,}$$

$$E = \frac{(\varepsilon_1(\omega) - \varepsilon_3(\omega)) \cdot (\varepsilon_2(\omega) - \varepsilon_3(\omega))}{(\varepsilon_1(\omega) + \varepsilon_3(\omega)) \cdot (\varepsilon_2(\omega) + \varepsilon_3(\omega))} \text{ – функція діелектричних проникностей.}$$

Рівняння зносу при зміні відносної швидкості взаємного переміщення поверхонь інструменту й оброблюваної деталі в діапазоні, у якому монотонно зростаючу функцію $U/(U + U_0)$ можна вважати лінійною, збігається з відомим оптикам-технологам законом Престона. Усі величини, що входять у рівняння зносу (4.17), відомі чи можуть бути визначені. У рамках розглянутої моделі безпосередньо з аналізу ковального механізму взаємодії поверхонь інструменту й оброблюваної деталі отримано

$$U_0 = \frac{8}{9\pi^2} \cdot \frac{M_2 \omega_{01}}{N_a \rho_2 l_{st-a}^2} \cdot \left(1 - \left(\frac{\omega_{02}}{\omega_{01}}\right)^2\right)^4, \quad (4.18)$$

де M_2 , ρ_2 – молекулярна маса і густина CeO_2 , $l_{\text{Si-O}}$ – довжина зв'язку Si-O в оброблюваному матеріалі.

Для умов, адекватних реальному процесу полірування еталонного матеріалу (скла марки К8) розраховано величини: $\Omega = 4,12 \cdot 10^{15}$ і $E = 0,01$. Величина ξ (див. формулу 4.15) становить приблизно 100 (96), а характеристична швидкість U_0 (див. формулу (4.18)) – 1,22 м/с.

Функція технологічного середовища Φ визначена, виходячи з відомих значень коефіцієнта поверхневого натягу (72,8 мН/м), в'язкості (10^{-3} Па с) при температурі 20 °С і кутів змочування водою скла марки К8 та полірувального інструменту "Аквапол" ($\vartheta_2 = 35,3^\circ$, $\vartheta_1 = 49,5^\circ$), і становить $1,6 \cdot 10^{-3} \text{ Н}^2/\text{м}^2$.

Енергія Si-O зв'язку дорівнює 106 ккал/моль ($E_{\text{bind}} = 4,6$ еВ). Енергія коливань SiO_2 на частоті 443 см^{-1} становить 0,055 еВ. Енергія кластера визначена як добуток енергії одного фрагмента на кількість фрагментів у кластері ξ і становить 5,29 еВ.

Енергію зв'язку E_{bind} розраховано, виходячи з хімічного складу оброблюваного матеріалу за енергією зв'язку з киснем елементів, оксиди яких входять до його складу, тобто $E_{\text{bind}} = \sum_i \alpha_i \cdot E_{\text{bind},i}$ (α_i – відсотковий вміст i -го оксиду Me_xO_y ;

$E_{\text{bind},i}$ – енергія зв'язку Me-O i -го оксиду). Для скла марки К8 $E_{\text{bind}} = 3,9$ еВ.

З урахуванням вищевказаного визначено продуктивність полірування плоскої поверхні деталі зі скла марки К8 діаметром 60 мм інструментом, що складається з полірувальних елементів ЕП1 "Аквапол", які містять 93 мас. % оксиду церію, при тиску, що створюється за рахунок сил притискання інструменту до оброблюваної деталі $p_a = 0,05$ МПа і лінійній швидкості обертання деталі $U = 0,6$ м/с. Її величина становить: $Q = dV/dt = 0,93 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{с}$, що відповідає ваговому вилученню матеріалу 1,4 мг/хв чи лінійному 0,197 мкм/хв. Експериментально отримані значення величини вилучення скла при поліруванні становлять 1,6 мг/хв і 0,224 мкм/хв відповідно. Відхилення розрахованої величини продуктивності полірування скла від експериментально вимірної і в описаних вище умовах не перевищує 15%.

Отримане рівняння зносу (4.1), виведене на основі загальних принципів, не містить будь-яких експериментально обумовлених обмежень щодо взаємодіючих тіл, і дозволяє розраховувати інтенсивність зносу поверхні із задовільною точністю та може бути використане для аналізу закономірностей процесу полірування неметалевих матеріалів. Більш того, крім з'ясованих залежностей продуктивності полірування скла від режимних параметрів процесу обробки, рівняння (4.1) описує й залежність від фізико-хімічних властивостей інструменту, оброблюваної деталі та технологічного середовища (через функції Ω , E , Φ й експоненціальний множник).

Аналізуючи зазначені функції, виявлено ефекти і з'ясовано закономірності, властиві процесу полірування скла інструментом зі зв'язаним полірувальним порошком.

Принципово важливою особливістю частотної функції є наявність у ній резонансного множника. За рівності власних частот коливань фрагментів в інструменті й оброблюваній деталі ($\omega_{01} = \omega_{02}$) $dV/dt \rightarrow \infty$ за рахунок збільшення

розмірів кластерів, що вилучаються з оброблюваної поверхні, може спостерігатися її інтенсивне руйнування.

Експериментально показано, що в результаті взаємодії однакових заготовок зі скла марки К8 з полірованими поверхнями протягом 5 хв на поверхнях утворюються широкі (до 0,5 мм) подряпини і виколи, а також сліди руйнування (рис. 4.3), що є підтвердженням виявленого явища.

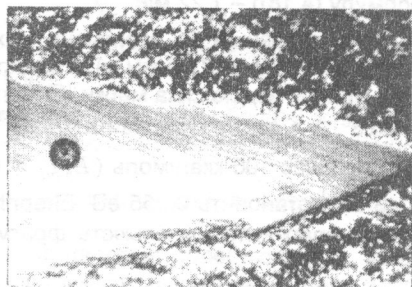


Рис. 4.3. Сліди руйнування на поверхні скла марки К8

На рис. 4.3 світла область – вихідна поверхня скла, темне коло і світло-темні області – подряпини і виколи.

Другою особливістю в рівнянні зносу є експоненціальний множник, що містить енергію зв'язку і залежить від хімічного складу оброблюваного матеріалу.

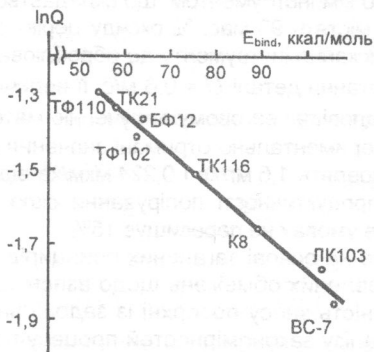


Рис. 4.4. Залежність $\ln Q$ від E_{bind}

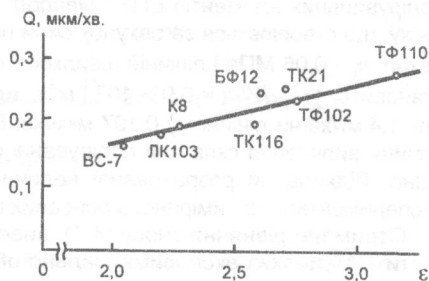


Рис. 4.5. Залежність продуктивності полірування від діелектричної проникності

Отримана експериментально для скла різних марок (рис. 4.4) лінійна залежність $\ln Q$ від E_{bind} дозволила однозначно підтвердити експоненціальний характер зміни Q відповідно до рівняння зносу. Крім того, експериментально визначена енергія кластера $E_{cl} = 108$ ккал/моль практично збігається з отриманою в рамках розглянутої моделі величиною 122 ккал/моль.

При аналізі множника, що містить діелектричну проникність оброблюваного матеріалу знайдено, що продуктивність полірування пропорційна цій величині (рис. 4.5).

4.4. Хімічні та механіко-хімічні процеси при поліруванні оптичних поверхонь

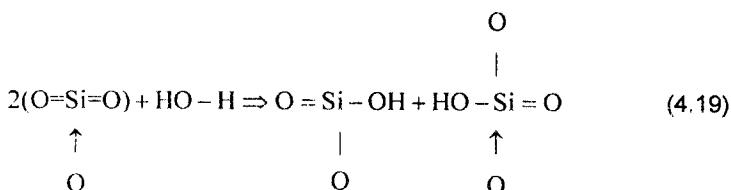
За критерій зносу скла при поліруванні прийнято такий: нагромадження енергії й ушкоджень у критичному об'ємі (кластері) відбувається доти, поки енергія кластера не перевищить енергію його зв'язку з оточенням (активаційний характер процесу руйнування). Потім відбувається порушення суцільності матеріалу і його вилучення у вигляді частки зносу. Для того щоб кластер відірвався від поверхні, його енергія має перевищувати деякий бар'єр, величина якого визначається E_{hmi} (енергією активації).

Виходячи з вищевикладеного, можна констатувати, що механізм зносу щодо процесу полірування скла інструментом зі зв'язаним полірувальним порошком на основі CeO_2 включає:

- 1) резонансне збільшення енергії кластера за рахунок енергії коливань фрагментів SiO_2 при фрикційній взаємодії поверхонь деталі й інструменту;
- 2) нагромадження дефектів і ослаблення поверхневого шару;
- 3) деформацію зв'язків кремній-кисень при терті, їх розрив та утворення відповідних радикальних центрів;
- 4) З використанням виразу (4.14) для визначення кількості кластерів, що відірвалися з оброблюваної поверхні, визначено концентрацію кластерів, що становить $2 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$. З іншого боку, відповідно до прийнятої моделі про структуру скла, як систему, що складається з фрагментів $\text{O} = \text{Si} = \text{O}$ з довжиною зв'язку $\text{Si}=\text{O} - l_1 = 0,1606 \text{ нм}$, з'єднаних більш "слабкими" зв'язками ("міжмолекулярними", що позначаються \rightarrow) з довжиною $l_2 = 0,1612 \text{ нм}$, а також з урахуванням того, що при механічній обробці кварцу і кварцового скла дефекти розташовуються в шарі товщиною 1 нм, у розглянутому випадку розрахована концентрація кластерів на поверхні оброблюваної деталі становить $2,1 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$. Ця оцінка збігається з наведеною вище величиною.

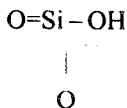
Отримана величина концентрації кластерів на оброблюваній поверхні при поліруванні практично збігається з величиною концентрації деформованих кремній-кисневих зв'язків $(1,0-1,5) \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$. Це дозволило тверджувати, що попередником частки зносу (відриву кластера) є деформований зв'язок $\equiv \text{Si} \dots \text{O} \dots \text{Si} \equiv$. Крім того, кількість кластерів становить близько 4 % усіх поверхневих атомів кремнію (до $5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$), що впливає також з описаної вище моделі: 1 кластер – 24 атома кремнію, тобто – 4,2 % усіх поверхневих атомів Si.

При гідролізі на поверхні скла в результаті розриву довгих зв'язків l_2 і "перемикання зв'язків" унаслідок деформації поверхні, завдяки зближенню атомів Si і O замість "сильного" $\text{Si} = \text{O}$ зв'язку і більш "слабкого" зв'язку $\text{Si} \leftarrow \text{O}$ утворюється два звичайних:



Крім того, унаслідок деформації оброблюваної поверхні (розтяг і стиск), механічна енергія йде на розрив сусідніх зв'язків Si—O й H—OH. і внаслідок іонного обміну водень з'єднується з киснем, а група OH — із кремнієм, і там, де був неперервний ланцюг, з'являється розрив, обидва кінці якого закінчуються гідроксильною групою.

У результаті гідролізу й вилуження поверхні на ній утворюється гідроксильований шар



розриваються довгі Si←O зв'язки (l_2), утворюються пори молекулярних розмірів у товщі матеріалу. Концентрація поверхневих гідроксильних груп для різних кремнеземів коливається від 1,7 до 12,0 мкмоль/м² (1,0–7,2 групи OH на 1 нм²) залежно від конкретних умов експерименту, передісторії зразків і повноти видалення води. Така концентрація гідроксильних груп (1,0–7,2) 10¹⁸ м⁻² практично збігається з кількістю всіх поверхневих атомів кремнію (1–5) 10¹⁸ м⁻². Це дозволяє зробити висновок про те, що всі поверхневі атоми кремнію несуть гідроксильні групи.

У процесі полірування в результаті деформації поверхні (розтяг і стиск) виникають деформовані зв'язки Si...O...Si, відстань між атомами кремнію першого тетраедра і кисню другого тетраедра збільшується, зв'язок розривається. Потім розриваються більш "слабкі" зв'язки між іншими тетраедрами. При цьому лінія розриву відокремлює фрагмент (кластер) від основного об'єму матеріалу так, що в першому залишаються іонні центри $\equiv \text{Si}^+$, а в другому — іонні центри $\equiv \text{SiO}^-$.

Іони $\equiv \text{Si}^+$ і $\equiv \text{SiO}^-$ розділяються на поверхнях, що утворюються. Унаслідок двостадійного процесу, що містить у собі розрив Si—O зв'язків і емісію електронів іонними центрами $\equiv \text{SiO}^-$ утворюються радикальні центри $\equiv \text{SiO}^*$ за схемою:



У результаті захоплення електрона іон $\equiv \text{Si}^+$ перетворюється в радикал $\equiv \text{Si}^{\cdot}$.

Таким чином, на поверхні фрагмента утворюються центри $E^1 (\equiv \text{Si}^{\cdot})$, а на новій поверхні оброблюваної деталі — центри $O^0 (\equiv \text{SiO}^*)$.

При розриві зв'язків і відділенні фрагмента (кластера) від основного матеріалу обов'язково виникає ситуація, коли необхідним стає і розрив як більш "слабкого" зв'язку Si←O, так і "сильного" зв'язку Si=O. При цьому поряд з радикалами E^1 і O^0 утворюється силіленовий центр $\equiv \text{Si}:$.

Тому можна зробити висновок, що відрив кластера з оброблюваної поверхні при поліруванні відбувається за такою схемою. На оброблюваній поверхні виникає деформований зв'язок Si...O...Si, розрив якого (по довгому зв'язку l_2) викликає перебудову й розрив зв'язків з утворенням на новій поверхні великої кількості короткотривалих радикалів $\equiv \text{SiO}^*$ і силіленових центрів $\equiv \text{Si}:$. Розрив зв'язку Si=O і утворення $\equiv \text{Si}:$ відбувається лише тоді, коли енергія кластера досягає критичного значення, тобто процес має граничний характер. Енер-

гія кластера становить величину 5,3 eВ і перевищує значення енергії збудження силіленового центра 5,04 eВ. Оскільки концентрація силіленових центрів перебуває в межах $(1-5) \cdot 10^{15} \text{ м}^{-2}$, а час їх життя становить $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}$, то можна розрахувати їх кількість як величину $(0,6-3,1) \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, що збігається з кількістю кластерів на оброблюваній поверхні скла $(2,1 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1})$.

Порівняння концентрації кластерів з кількістю силіленових центрів дозволило зробити висновок про те, що результатом відриву кластера є утворення силіленового центра з енергією збудження, що перевищує енергію кластера. Дефекти, що утворилися на свіжій поверхні скла, окиснюються, і при цьому утворюється короткотривалий центр E^1 , що разом із сусіднім "немостиковим" атомом кисню (O^0) утворюють початкову структуру. При цьому виділяється енергія 4,5 eВ і при відриві одного кластера вивільнюється один електрон, що залишає оброблювану поверхню в точці виникнення деформованого зв'язку, а всі інші електрони захоплюються іонними центрами $\equiv Si^+$, що перетворюються внаслідок цього в центри E^1 на поверхні частки зносу, яка відокремлюється від поверхні.

При відриві кластера з оброблюваної поверхні радикали, що містяться на поверхні кластера (E^1) і на щойно утвореній поверхні скла (O^0), гідролізуються водою, яка присутня на поверхні і проникає в пори. У результаті знову утворюється поверхня, яка є також гідроксильованою поверхнею, як і перед відривом кластера.

Таким чином, виходячи з аналізу процесів розриву хімічних зв'язків, утворення іонних і силіленових центрів та радикалів, їхнього окиснювання, гідролізу й рекомбінації, встановлено, що механізм зносу поверхню зі скла при поліруванні інструментом зі зв'язаним полірувальним порошком включає в собі:

- 1) повне гідроксильовання поверхні оброблюваного матеріалу за рахунок гідролізу та вилуження;
- 2) утворення на поверхні деформованих зв'язків, що є зародками часток зносу, унаслідок деформації оброблюваної поверхні при фрикційній взаємодії з поверхнею інструменту;
- 3) розрив деформованих зв'язків і ініційована ним реакція утворення радикалів;
- 4) резонансне збільшення енергії кластера за рахунок енергії коливань фрагментів SiO_2 при фрикційній взаємодії поверхонь деталі й інструменту, розрив подвійного зв'язку $Si=O$ та утворення на оброблюваній поверхні силіленового центра $\equiv Si$;
- 5) відрив кластера з оброблюваної поверхні (утворення частки зносу) з вивільненням електрона та стабілізацією на ній поверхневого немостикового атома кисню;
- 6) окиснювання силіленового ($\equiv Si$) центра, рекомбінація радикалів ($\equiv Si^+$ і $\equiv SiO^*$) і їхній гідроліз з утворенням поверхні, ідентичної вихідній.

Описаний механізм зносу скла та інших оптичних матеріалів підтверджується результатами досліджень процесів тертя, деформації та руйнування кварцу і різних стекел. Це стосується рівності концентрацій кластерів, деформованих кремній-кисневих зв'язків, силіленових центрів і поверхневих немостикових атомів кисню, активності й реакційної здатності короткотривалих радикалів, механізму розриву $Si-O$ зв'язків, механізмів гідролізу і вилуження, концентрації гідроксильних груп на поверхні, впливу коливань ґратки на утворення дефектів у процесі тертя та переважного виникнення саме $\equiv Si$; і $\equiv Si^+$ центрів, часу життя та енергії збудження дефектів, вивільнення при руйнуванні поверхні електронів тощо.

4.5. Взаємодія диспергованих часток оброблюваного матеріалу та інструменту

Взаємодія диспергованих у процесі полірування часток оброблюваного матеріалу та інструменту в зоні контакту між ними, а також з контактними поверхнями інструменту й оброблюваної деталі, розглядається як взаємодія Ван дер Ваальса. Припускаючи, що оброблюваний матеріал складається тільки з SiO_2 , а полірувальний інструмент – із CeO_2 , було розраховано енергії взаємодії (притягання) часток SiO_2 (1) і CeO_2 (2) між собою і з поверхнями деталі (s) і інструменту (i):

$$U_{11} = -1,25 \cdot 10^{-6}, \quad U_{12} = -1,38 \cdot 10^{-4}, \quad U_{22} = -5,97 \cdot 10^{-3}, \quad (4.21)$$

$$U_{1i} = -1,30 \cdot 10^{-4} \quad \text{та} \quad U_{1s} = -1,85 \cdot 10^{-6} \text{ еВ.}$$

Виходячи з цих величин енергії взаємодії, за умови, що

$$U_{12}(U_{22}, U_{1i}) > U_{11}(U_{1s}),$$

показано, що в зоні контакту інструменту й оброблюваної деталі частки SiO_2 і CeO_2 , взаємодіючи між собою, притягуються до поверхні інструменту. Причому, на поверхні інструменту локалізовано більше часток оксиду церію, ніж часток кремнезему, тому що $U_{22} > U_{12}(U_{1i})$.

Співвідношення кількості часток $n_1(\text{SiO}_2)$ і $n_2(\text{CeO}_2)$, локалізованих на поверхні інструменту, визначають, виходячи зі значень енергій взаємодії як розв'язок системи рівнянь:

$$n_1 + n_2 = 1, \quad \frac{n_1}{n_2} = \frac{U_{12} + U_{1i}}{U_{22}}. \quad (4.22)$$

З виразів (4.22) випливає, що $n_1 = 4\%$, а $n_2 = 96\%$. Експериментальні дослідження показують, що на поверхні інструменту кількості часток SiO_2 і CeO_2 перебувають у межах: (1,7–5,3)% і (94,7–98,3)%, і це збігається з результатами розрахунку.

Крім того, встановлено, що кількість часток SiO_2 і CeO_2 , що відірвалися від взаємодіючих поверхонь, співвідносяться як 1:2,28, тобто в зоні контакту інструменту й оброблюваної деталі серед диспергованих часток приблизно третина – це частки кремнезему, і дві третини – частки CeO_2 .

4.6. Адсорбція, хемосорбція та повторна полімеризація кремнезему на поверхні інструменту. Ефект Брауна

Кількісний аналіз процесу взаємодії часток між собою і з поверхнями інструменту та оброблюваної деталі дозволив описати цей процес у такий спосіб. Частки CeO_2 , притягуючись одна до одної, притягують до себе незначну кількість часток SiO_2 (співвідношення між їх кількістю: 96% і 4% відповідно), локалізуючись на поверхні інструменту. Надлишок часток кремнезему (30% – від загальної кількості, з яких лише 4% взаємодіють з частками CeO_2), перебуваючи в змуленому стані, частково залишає зону контакту інструменту і деталі разом із МОТС, а частково (завдяки тому, що енергія взаємодії U_{1i} відмінна від нуля), притягується до поверхні інструменту. Залежно від характеристики ро-

бочого шару полірувального інструменту, а також від умов процесу обробки (схеми полірування; схеми подачі, складу і витрат МОТС тощо), в окремих місцях поверхні інструменту можуть накопичуватися частки кремнезему.

Потенціал взаємодії часток з шорсткою поверхнею інструменту, розрахований на основі коефіцієнтів Ван дер Ваальса і відстані від площини відліку до рівня поверхневого шару атомів. Отримане значення $U_{1i} = (0,17-3,50)$ еВ дозволило констатувати, що частки SiO_2 можуть вступати з поверхнею інструменту у хімічний зв'язок, тобто можлива хемосорбція кремнезему поверхнею інструменту (оскільки $U_{1i} > 0,1$ еВ – величини, характерної для хемосорбції). Частки SiO_2 , що збираються на поверхні інструменту, унаслідок полімеризації кремнезему утворюють наліт (тонкий непрозорий шар), що спостерігається експериментально на поверхні інструменту.

При поліруванні деталей зі скла інструментом на основі оксиду церію, особливо при обробці поодиноких деталей, коли їхні центральні зони не виходять за край інструменту, на поверхні останнього утворюється наліт. Його фрагменти мають розміри до кількох міліметрів (рис. 4.6). Цей наліт товщиною 5-6 мкм, міцно прикріплений до поверхні інструменту, викликає дефектоутворення на оброблюваній поверхні.

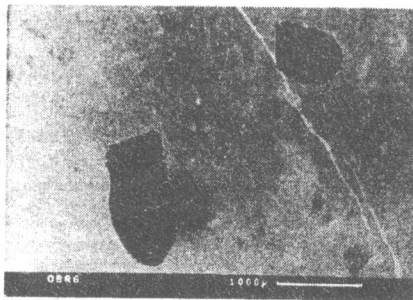


Рис. 4.6. Фрагменти нальоту кремнезему на поверхні інструменту

Хімічний склад фрагментів нальоту за даними мікрорентгеноспектрального кількісного аналізу не збігається зі складом оброблюваного скла, і їх основним компонентом є сполука SiO_2 , що полімеризувалася на поверхні інструменту.

При поліруванні скла суспензією полірувального порошку поверхня робочого шару інструменту (зазвичай пеко-каніфольної смоли) взаємодіє з частками SiO_2 значно слабкіше, ніж поверхня інструменту на основі CeO_2 (велика відмінність власних частот коливань атомів у матеріалах, з яких складаються деталь і інструмент, і мала величина константи Ліфшиця). Тому можна вважати, що частки SiO_2 активніше взаємодіють з частками CeO_2 і з поверхнею оброблюваного скла. При цьому спостерігається адсорбція часток кремнезему на частках оксиду церію. Надлишок часток кремнезему, що не взаємодіють з частками CeO_2 , має збиратися на поверхні скла. Це явище (ефект Брауна) спостерігається експериментально і зумовлене тим, що при поліруванні суспензією на основі CeO_2 на поверхні скла осаджується шар повторно полімеризованого кремнезему.

Необхідність поглиблення знань про природу процесу полірування обумовлює нові дослідження для встановлення фізико-хімічних закономірностей щодо

технології обробки широкого класу неметалевих матеріалів, включаючи і структурно-неоднорідні. Прямий перехід від скла до класу неметалевих матеріалів, незважаючи на явну очевидність, не є однозначним, оскільки вимагає розробки більш повного теоретичного опису взаємодії поверхонь інструменту і оброблюваної деталі з урахуванням особливостей їх структури, фізико-хімічних властивостей, спектроскопічних характеристик і реологічних властивостей технологічного середовища.

Крім того, кластерна модель зносу поверхонь інструменту й оброблюваної деталі розроблена для рівноважного процесу полірування скла. При здійсненні такого процесу тиск усередині технологічної рідини, що міститься в проміжку між інструментом і деталлю на площі їх контакту, точно дорівнює номінальному тиску, що створюється за рахунок сили притискання інструменту до оброблюваної деталі. У випадку структурно-неоднорідних неметалевих матеріалів, що використовуються в оптичних деталях і виробках різного призначення, це забезпечуються такі умови полірування. Це означає, що вивчення фізико-хімічних закономірностей полірування неметалевих матеріалів має здійснюватися при неодмінному врахуванні його нерівноважного характеру.

4.7. Особливості полірування поверхонь оптичних деталей у нерівноважному процесі

Кластерна модель зносу поверхонь інструменту і оброблюваної деталі розроблена щодо рівноважного процесу полірування скла інструментом зі зв'язаним полірувальним порошком. У цьому випадку тиск p_g усередині технологічної рідини (МОТС), яка міститься в проміжку між інструментом і деталлю на площі їх контакту, дорівнює номінальному тиску, який створюється за рахунок сили притискання інструменту до оброблюваної деталі p_a . У зв'язку з цим, безпосереднє використання кластерної моделі в нерівноважному процесі полірування, коли $p_g \neq p_a$, у загальному випадку є неправомірним.

Розглянемо взаємодію плоских поверхонь інструменту та деталі в процесі полірування. У схемі полірування оптичних деталей можна вважати, що через проміжок між поверхнями інструменту та оброблюваної деталі тече рідина – МОТС. Відомо, що за великих чисел Рейнольдса (порядку 10^5) утворюється приграничний шар, який складається з ламінарної, перехідної та турбулентної ділянок.

Для процесу полірування зазначених деталей характерною є умова: кутова швидкість обертання інструменту $\omega_2 = 30 \text{ с}^{-1}$ (кількість обертів – близько 300 об/хв), тиск притискання інструменту до оброблюваної деталі $p_a = 0,05 \text{ МПа}$, діаметр інструменту $D = 0,16\text{--}0,32 \text{ м}$, як МОТС використовується вода (за нормальних умов динамічна в'язкість $\eta = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, кінематична в'язкість $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Число Рейнольдса для вказаних умов течії рідини відповідно до формули Блазіуса: $Re_D = U D/\nu$, де U – швидкість рідини. За умови $Re_D \geq Re_{xp} = 3,5 \cdot 10^5$ утворюється перехідний приграничний шар, тобто спостерігається перехід від ламінарної течії до турбулентної. Це означає, що за швидкостей, які задовольняють нерівності $U \geq Re_{xp} \nu/D$, потік рідини через проміжок між інструментом і оброблюваною деталлю – турбулентний (для $D = 0,16 \text{ м}$, $U \geq 1,88 \text{ м/с}$, що відповідає коловим зонам інструменту з радіусом $r > r_o = 62,5 \text{ мм}$; для $D = 0,25 \text{ м}$, $U \geq 1,4 \text{ м/с}$, $r > r_o = 47 \text{ мм}$; для $D = 0,32 \text{ м}$, $U \geq 1,1 \text{ м/с}$, $r > r_o = 36 \text{ мм}$, r_o – радіус внутрішнього отвору інструменту).

Таким чином, виходячи з гідромеханічних співвідношень, можна показати, що в процесі полірування виникають умови для турбулентної течії МОТС через проміжок між інструментом і оброблюваною деталлю. При зменшенні кількості МОТС через велику завихренність потоку рідини і зниження тиску внаслідок великих локальних швидкостей в її потоці може спостерігатися явище гідродинамічної кавітації.

З цього випливає, що за умови нерівноважного процесу полірування в рідині виникають розриви суцільності, неперервна водяна плівка в проміжку між інструментом і оброблюваною деталлю перетворюється на дискретний набір крапель. Це приводить до зміни умов взаємодії МОТС з поверхнями інструменту та оброблюваної деталі.

Розглянемо гідродинамічну схему (рис. 4.7) контакту поверхонь інструменту та оброблюваної деталі стосовно нерівноважного процесу полірування.

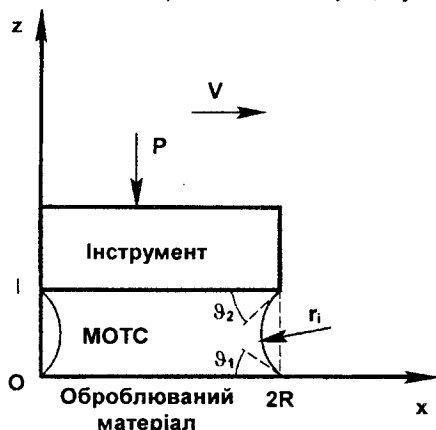


Рис. 4.7. Схема контакту поверхонь інструменту та оброблюваної деталі в нерівноважному процесі полірування

Повну силу, яка викривляє поверхню рідини внаслідок її поверхневого натягу і в'язкості, визначають як $F = -\pi RT$, а тиск під викривленою поверхнею як $p_g = F / \pi r_i$ ($T = \sigma_n (\cos \vartheta_1 + \cos \vartheta_2) - 2\eta V$, де R – радіус плями контакту, V – швидкість поступального переміщення інструменту відносно оброблюваної поверхні; ϑ_1, ϑ_2 – кути змочування МОТС поверхонь деталі та інструменту; σ_n – коефіцієнт поверхневого натягу МОТС).

Знайшовши радіус викривлення r_i поверхні окремої краплі МОТС з геометричних міркувань, можна показати, що тиск рідини під викривленою поверхнею крапель, які перебувають у проміжку товщиною l між елементарними ділянками контактних поверхонь, визначається формулою

$$p_g = -\frac{RT}{l^2} \left(\frac{\sin \vartheta_1 + \sin \vartheta_2}{\operatorname{tg} \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2}} \right)^2 \quad (4.23)$$

З іншого боку, виходячи з рівності сил, що діють на інструмент за рахунок притискання і з боку рідини, за допущення про рівність розмірів усіх крапель рідини, можна знайти, що при довільній кількості крапель k справедливим є співвідношення $p_g / p_a = (R_2/R)^2 k^{-1}$ ($R_2 = D/2$ – радіус інструменту).

Розглядаючи рух МОТС у проміжку між інструментом і оброблюваною поверхнею деталі (густина рідини $\rho = \text{const}$) згідно з рівняннями Нав'є–Стокса

$$\frac{dU}{dt} = F_m - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \nabla^2 U$$

і нерозривності $\text{div } U = 0$, де F_m – масові сили, p – тиск, ∇^2 – оператор Лапласа, t – час, можна отримати вираз для швидкості потоку:

$$U(r) = \left(\frac{\omega_2(D-d)}{2} \right) \frac{\ln \frac{2r}{d}}{\ln \frac{D}{d}} + \omega_2 \frac{d}{2}, \quad (4.24)$$

де ω_2 – кутова швидкість обертання інструменту, $d = 2 \cdot r_0$ – діаметр внутрішнього отвору інструменту.

Аналіз отриманої залежності $U(r)$ показує, що швидкість крапельної рідини при русі в напрямку від центрального отвору до периферії інструменту зростає. Площа перерізу потоку рідини, яка визначається як $S(r) = 2\pi r l(r)$, також зростає. За умови безперервної стаціонарної течії рідини, з рівняння витрат випливало б, що товщина шару рідини зі збільшенням r зменшується. Для характеристики об'єму рідини в різних зонах контакту інструменту і оброблюваної деталі введемо величину ефективної товщини краплі відповідно до формули

$$l^* = \frac{d \cdot l_0 \cdot U(d/2)}{2 \cdot r \cdot U(r)},$$

де l_0 – товщина проміжку між інструментом і деталлю при $r = d/2$.

Витрати рідини знаходимо, виходячи з формули: $Q(r) = S^*(r)U(r)$ і використавши середні значення відповідно до теорії усереднення, яка використовується в математичних моделях турбулентних потоків. Проведемо усереднення за координатною змінною r , тоді:

$$Q = \frac{4\pi}{D-d} \int_{\frac{d}{2}}^{\frac{D}{2}} U(r) l^* r dr. \quad (4.25)$$

У результаті розрахунків можна знайти, що при $l = 1$ мкм, $d = 50$ мм, $D = 160$ мм, величина витрат МОТС становить величину порядку 7 мл/хв. При таких витратах рідини біля центрального отвору інструменту умови течії МОТС

будуть такими ж, як і в рівноважному процесі полірування, потік буде безперервним, тиск усередині рідини буде рівним тиску, що створюється за рахунок сили притискання інструменту до оброблюваної деталі, і буде виконуватись умова $l = l_0$. У проміжку на площі контакту потік буде переривчастий, складатиметься з окремих крапель, тиск рідини всередині p_g . Для розрахунку величини цього тиску визначимо об'єм рідини в проміжку W як добуток витрат Q на час руху крапель від центрального отвору ($t = 0, r = d/2$) до краю інструменту T ($t = T, r = D/2$). З рівняння для r випливає, що величина T дорівнює $T = \ln(D/d)/\omega_2$. З іншого боку, об'єм рідини W може бути визначений як добуток об'єму однієї краплі (рис. 4.7), форму якої можна вважати циліндричною, на число крапель k , тобто $W = \pi R^2 l k$. Звідси випливає, що добуток kR^2 , який входить у формулу $p_g/p_a = (R_2/R)^2 k^{-1}$, дорівнює $QT/\pi l_0$, а тиск усередині рідини визначається формулою:

$$\frac{p_g}{p_a} = \frac{\pi D^2 l_0 \omega_2}{4Q \ln \frac{D}{d}} \quad (4.26)$$

Таким чином, виходячи з аналізу руху крапельної рідини, отримано вираз для p_g , а отже, і можливість аналізу нерівноважного процесу полірування за допомогою кластерної моделі. Визначивши відстань l через p_g , можна перейти до параметра p_a , який визначає силовий режим процесу полірування.

При виведенні рівняння, яке визначає кількість кластерів, що відриваються з поверхонь оброблюваної деталі та інструменту n_{cl} , необхідно врахувати ту обставину, що величина ξ (відношення енергії зв'язку E_{bind} до енергії кластера E_{cl}) у нерівноважному процесі полірування може суттєво відрізнитися від 1. З урахуванням цього можна знайти, що

$$n_{cl} = \frac{\omega_{123} S}{4\pi^3 l^2} \xi \exp[-\xi] t, \quad (4.27)$$

де ω_{123} – константа Ліфшиця, S – номінальна площа контакту, t – час полірування.

Враховуючи, що за умови $l = l_0, p_g = p_a$ і $n_{cl} = n_{cl}^0$ (рівноважний процес), для кількості кластерів, які відриваються з поверхні в нерівноважному процесі полірування, можна отримати рівняння $N_{cl} = n_{cl}^0 \xi (l_0/l)^2$, в якому l визначається з виразу для p_g

Залежність n_{cl} від l має дві характерні області (рис. 4.8): 1 – при $l > l_0$ – рівноважний процес полірування, при збільшенні p_a кількість кластерів n_{cl} і, відповідно, продуктивність полірування оброблюваної поверхні зростають; 2 – при $l < l_0$ – процес полірування нерівноважний, n_{cl} зростає зі збільшенням p_g ($p_a = \text{const}$), тобто при зменшенні l .

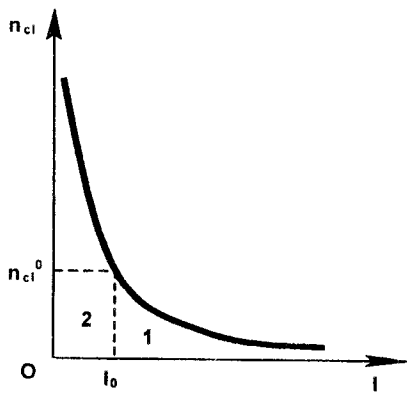


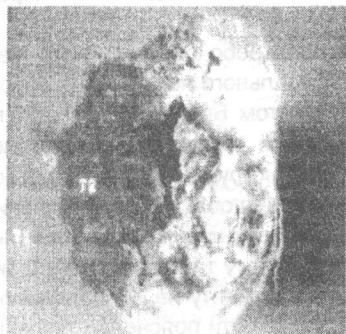
Рис. 4.8. Залежність кількості кластерів n_{cl} від товщини проміжку l

Розглянемо закономірності нерівноважного процесу полірування стосовно обробки скла. Приймаючи енергію зв'язку $E_{bind} = 3,9$ еВ, енергію кластера $E_{cl} = 5,29$ еВ, $R = l\omega/2$, $V = 0,16$ м/с (довжина штриха 20 мм на частоті зворотно-поступального переміщення – 24 подвійні ходи за хв), $p_a = 0,05$ МПа і використавши розраховане значення концентрації кластерів у рівноважному процесі полірування $n_{cl} = 2 \cdot 10^{17}$ 1/м²с при $l_0 = 1$ мкм, можна отримати, що $l = 0,7$ мкм і $n_{cl} = 2,8 \cdot 10^{17}$ 1/м²с. За цих умов рівняння для кількості кластерів можна подати у вигляді: $N = 1,5 \cdot 10^5/l^2$. У рівноважному процесі полірування продуктивність зняття оброблюваного матеріалу становить величину 0,2 мкм/хв або 3,3 нм/с, за один оберт інструменту (за 0,3 с) при розмірі кластерів 10 нм знімається приблизно 1 нм, тобто приблизно 0,1 площі оброблюваної поверхні відповідає площі кластерів, які відриваються. При зменшенні l можна досягти такого збільшення кількості кластерів (до значень порядку $N = 1,7 \cdot 10^{18}$ 1/м²с), що кластери будуть відриватися шарами. Для цього необхідно зменшити l до 0,3 мкм і досягти підвищення продуктивності знімання оброблюваного матеріалу у 8 разів. Подальше зменшення l призведе до того, що кластери будуть відриватися з більш глибоких шарів і на оброблюваній поверхні утворюються каскади дефектів.

У нерівноважному процесі полірування інтенсивність знімання оброблюваного матеріалу пропорційна l^{-2} і визначається умовами контакту інструменту і деталі, фізико-хімічними властивостями МОТС. З цього випливає, що для інтенсифікації процесу полірування поряд з використанням оптимальних композиційних складів полірувального інструменту, товщину шару рідини в проміжку між інструментом і деталлю необхідно зменшувати. Це може бути забезпечено збільшенням номінального тиску притискання інструменту до деталі p_a або за рахунок зменшення витрати МОТС. Перший шлях (інтенсифікація режимів) приводить до лінійного зростання продуктивності полірування оброблюваного матеріалу зі збільшенням p_a і обмежується міцністю інструменту. Другий шлях (зменшення витрати МОТС) забезпечує істотне зростання продуктивності обробки, однак за неконтрольованого зменшення кількості МОТС можливим стає утворення на обробленій поверхні каскадів дефектів і "припиків".

При дослідженні стану оптичних поверхонь за допомогою скануючого мікроскопа-аналізатора "Camscan-4DV" встановлено, що при поліруванні в нерівноважному режимі на обробленій поверхні не спостерігаються видимі дефекти. Однак при значному підвищенні тиску інструменту до оброблюваної деталі на її поверхні можуть утворюватись різні дефекти. На зразках із матеріалів, до складу яких поряд з кремнеземом входить і глинозем, після обробки полірувальним інструментом на основі Cr_2O_3 можна спостерігати каскади дефектів (глибокі виколи) і наліт. На рис. 4.9.а наведено зображення дефекту (збільшення $500\times$), утвореного внаслідок виривання часток зносу оброблюваного матеріалу з глибинних шарів. Нерівності поверхні дефекту (зона Т3) усередині лунки в порівнянні з полірованою поверхнею зразка (зона Т1) утворені внаслідок відриву часток зносу з розмірами від 2 до 20 мкм. Це свідчить про те, що в умовах нерівноважного процесу полірування можливим є утворення каскаду дефектів за рахунок відриву часток зносу з аномально великими розмірами.

Крім того, у процесі обробки саме в місцях утворення таких дефектів (лунк) локалізуються продукти зносу робочого шару полірувального інструменту (зона Т2). При збільшенні $1500\times$ (рис. 4.9.б) вигляд цієї зони дає можливість зробити висновок про те, що продукти зносу робочого шару інструменту "забивають" порожнину утвореного дефекту. Аналіз його хімічного складу показує, що продукти зносу (зона Т2) містять ті ж елементи, що й робочий шар інструменту. У порівнянні із зонами Т1 і Т3, у зоні Т2 продукти зносу містять Cr_2O_3 і не вміщують оксидів Al_2O_3 , MgO , CaO та інших, які входять до складу оброблюваного матеріалу.



а



б

Рис. 4.9. Дефект на обробленій поверхні

Поряд з дефектами, пов'язаними з вириванням часток зносу оброблюваного матеріалу, на поверхні виявлено і наліт у вигляді окремих, дискретно розташованих фрагментів (рис. 4.10).

Фрагменти нальоту висотою порядку 4 мкм, які за хімічним складом збігаються зі складом полірувального інструменту, розташовуються на обробленій поверхні по колу певного радіуса, що дозволяє визначити критичну швидкість відносного переміщення інструменту та оброблюваної деталі, за якої виникають умови для його утворення.

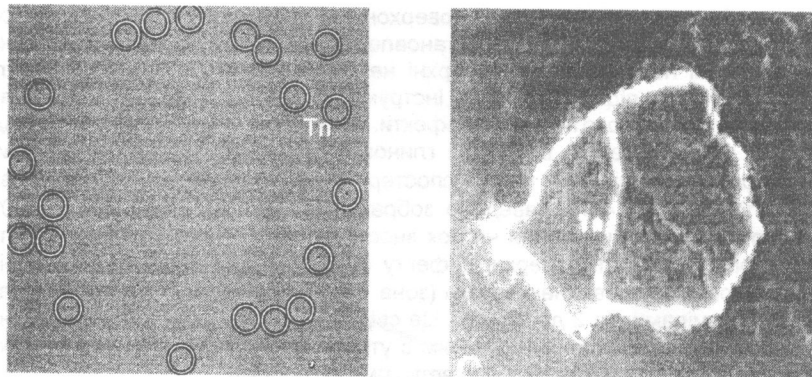


Рис. 4.10. Наліт на оброблюваній поверхні

При обробці зразка із плавленого базальту (діаметром 60 мм) на верстаті моделі 6ШП-100 при частоті обертання полірувального інструменту (діаметром 72мм) $n = 360$ об/хв, з тиском притискування інструменту до оброблюваної деталі $p_a = 1,0$ МПа і зміщенні штриха $L = 15$ мм фрагменти нальоту розташовані між колами з радіусами $R_1 = 28$ мм і $R_2 = 33$ мм. Величина швидкості переміщення відповідних точок на оброблюваній поверхні відносно поверхні інструменту становить 1,10–1,25 м/с і практично збігається з величиною характеристичної швидкості (див. розд. 4.2).

Явище, яке полягає у виникненні нальоту частинок робочого шару інструменту (полімерного матеріалу, що зв'язує зерна полірувального порошку) на оброблюваній поверхні, не може бути пояснено ані ефектом Брауна, коли наліт на оброблюваній поверхні скла утворюється за рахунок повторної полімеризації кремнезему, ані тим, що на поверхні робочого шару інструменту з'являється наліт кремнезему за рахунок хемосорбції. Напевне, що для обох випадків спільним є прояв міжмолекулярної взаємодії між частками зносу інструменту і оброблюваної деталі як між собою, так і з поверхнями інструменту та деталі. Тому факт, що фрагменти нальоту частинок робочого шару інструменту на обробленій поверхні розташовуються по колу певного радіуса, може бути пояснений тільки на основі аналізу міжмолекулярної взаємодії між частками зносу інструменту й оброблюваної деталі в умовах нерівноважного процесу полірування.

Таким чином, на основі розглянутих закономірностей процесу полірування оптичних матеріалів у нерівноважному режимі можна стверджувати, що при зменшенні витрат технологічного середовища продуктивність полірування істотно зростає без помітного погіршення якості оброблених поверхонь.

Наведені результати дають можливість визначити критерії вибору значень режимних параметрів процесу обробки (тиску інструменту до оброблюваної поверхні деталі, швидкості їх взаємного переміщення й витрат МОТС), за яких забезпечується значна продуктивність обробки без помітного погіршення якості оброблених поверхонь (запобігаючи виникненню на них різноманітних дефектів).

4.8. Критерії вибору полірувального порошку та матеріалу зв'язувального полірувального інструменту

Робочий шар полірувального інструменту характеризують видом полірувального порошку та матеріалу, що зв'язує зерна полірувального порошку, їх вмістом у полірувальній композиції. Від правильного вибору полірувального порошку і зв'язувального матеріалу, а також співвідношення їх кількостей у масі полірувального інструменту залежить працездатність останнього.

Вибір полірувального порошку

Залежність полірувальної здатності порошоків від твердості їх часток знайдена Бурже і Пейшисом. На її основі зроблено висновок про неможливість абразивного зношування скла при поліруванні, оскільки це не відповідає реальному механізму знімання оброблюваного матеріалу при поліруванні й не може бути використано для вибору найкращого полірувального порошку при обробці скла та інших оптичних матеріалів.

На основі наведених вище результатів для вибору полірувального порошку можна використовувати встановлену залежність їх полірувальної здатності від частоти власних коливань часток кожного з порошоків (рис. 4.11). Значення цих частот для різних порошоків (CeO_2 , ZrO_2 , ThO_2 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , ZnO та ін.) взяті з літературних джерел.

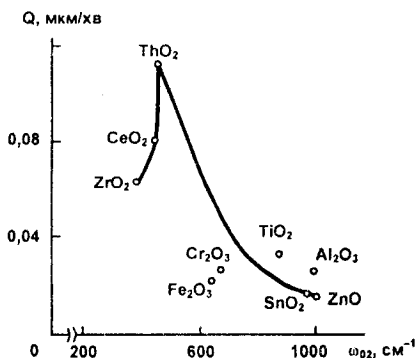


Рис. 4.11. Залежність полірувальної здатності від частоти власних коливань порошоків

Із зазначеної залежності випливає, що найбільш високою полірувальною здатністю володіють порошки оксидів Th і Ce, що узгоджується з іншими даними. Тому з урахуванням вимог безпеки при роботі з полірувальними порошками для виготовлення полірувального інструменту "Аквапол" може бути використаний тільки CeO_2 та інші порошки на його основі.

Вибір зв'язувального матеріалу для полірувальної композиції

Вибір зв'язувального матеріалу для полірувального інструменту здійснюється з урахуванням величини його в'язкості та величини енергії активації в'язкої течії. Коефіцієнт зсувної в'язкості η є визначальним при виборі зв'язувального матеріалу інструменту, тому що саме ним визначається характеристика контакту інструменту й оброблюваної деталі в процесі полірування. При малому значенні коефіцієнта зсувної в'язкості зв'язувальний матеріал у процесі тертя інструменту по поверхні оброблюваної деталі розтікається і "намазується" на поверхню зерен полірувального порошку, екрануючи їх від оброблюваної

поверхні. У цьому випадку полірувальна здатність інструменту є низькою (інструмент "засалюється"), знімання оброблюваного матеріалу практично не відбувається. При збільшенні зсувної в'язкості зв'язувального матеріалу зазначене явище проявляється меншою мірою і полірувальна здатність інструменту Q зростає відповідно до емпіричної формули:

$$Q = 0,175 + 0,017 \lg(\eta), \quad (4.28)$$

де η – коефіцієнт зсувної в'язкості при температурі, яка встановлюється в зоні контакту інструменту з оброблюваною деталлю в рівноважному процесі полірування.

Вибір зв'язувального матеріалу полірувальної композиції за максимальною величиною полірувальної здатності інструменту Q стає оптимальним, якщо в його якості використано деревинно-смоляний пек і епоксидну смолу, величина енергії активації в'язкої течії яких 66 і 98 кДж/моль відповідно. Саме ці матеріали є зв'язувальними компонентами в полірувальному інструменті "Аквапол".

Оптимізація складу полірувального інструменту

При варіації характеристики робочого шару полірувального інструменту змінюється не тільки продуктивність полірування оброблюваного матеріалу, а й зносостійкість інструменту. Тому при виборі полірувального порошку, зв'язувального матеріалу та їх відносного вмісту як параметри оптимізації мають бути використані й продуктивність полірування, й інтенсивність зносу інструменту (коефіцієнт відносного зносу).

Значення коефіцієнта відносного зносу f полірувального інструменту "Аквапол" становить 0,9. Цей коефіцієнт використовують як критерій вибору характеристики полірувального інструменту. Для цього розглядають величину f^{-1} (відношення товщини шарів знімання оброблюваного матеріалу h і зносу інструменту S), що показує, наскільки ефективно використовується кожна одиниця маси полірувального інструменту. Розрахована величина $f^{-1} = 1,1$ отримана в припущенні, що інструмент повністю складається тільки із CeO_2 . Природно, що інструменти на основі порошоків CeO_2 , які утримуються зв'язувальним матеріалом, будуть характеризуватися меншими значеннями f^{-1} . Для інструментів різного складу величини f^{-1} будуть завжди меншими за розраховане значення 1,1, що і спостерігається на практиці. Процес полірування скла полірувальним порошком (CeO_2) у вільному стані характеризується найменшою ефективністю його використання. Процес полірування інструментом фірми "Фуджимі Кенмацай" і інструментом "Аквапол" характеризується величиною f^{-1} , найбільш близькою до розрахованої величини, і перевищує такий же коефіцієнт для інших інструментів. Саме вони дозволяють найбільш ефективно використовувати полірувальний порошок.

Інструмент, що складається з CeO_2 і деревинно-смоляного пеку (ДСП), який володіє високою продуктивністю знімання оброблюваного матеріалу (1,68 мг/хв) і високим значенням інтенсивності зносу (40 мг/хв), може бути модифікованим за рахунок введення до його складу незначної кількості пильвербакеліту (ПБ). При цьому продуктивність полірування інструменту дещо зменшується (до 1,57 мг/хв), а коефіцієнт відносного зносу наближається до 1,27.

Крім того, "ідеальний" полірувальний інструмент зі зв'язаним полірувальним порошком на основі оксиду церію за величиною відносного зносу перевершує цей же полірувальний порошок у вільному стані більше, ніж у 60 разів.

Раціональний вибір полірувального порошку і зв'язувального матеріалу для полірувального інструменту є необхідною, але не достатньою умовою, що забезпечує його високу працездатність. Відносний вміст полірувального порошку і зв'язувального матеріалу також істотно впливає на продуктивність знімання оброблюваного матеріалу та зносостійкість інструменту. Залежності продуктивності полірування скла та інтенсивності зносу інструменту від відносного вмісту компонентів для інструментів з поліриту оптичного (марки ПФ) ПФ+ДСП+ПБ, ПФ+ЕД-20 (епоксидна смола), церіту + ДСП+ПБ, ПФ + каучуку та ін. дозволяють визначити інгредієнти полірувального інструменту, виходячи з максимальних значень продуктивності полірування та мінімальних значень інтенсивності його зносу. Звертає на себе увагу та обставина, що для зв'язувального матеріалу із ДСП + ПБ і епоксидної смоли ЕД-20 + ПЭПА (поліетиленполіамін) максимуми залежностей продуктивності від відносного вмісту складових є уширеними, тобто невелика зміна їхнього вмісту у складі інструменту не призводить до істотної зміни його працездатності. Це дозволяє дозувати компоненти при виготовленні інструменту зі значно меншою точністю, а значить, і спростити цей процес.

Оптимізація складу полірувального інструменту дозволила визначити, принаймні, дві полірувальні композиції для полірування скла та інших оптичних матеріалів:

склад 1:	мас. %
полірувальний порошок на основі CeO_2	90–95
пек (ДСП)	4,5–8,5
пульвербакеліт	0,5–1,5

склад 2:	мас. %
полірувальний порошок на основі CeO_2	97,3–99,0
органічна зв'язка (епоксидна смола тощо)	1,0–2,7.

Полірувальні інструменти із зазначеними вище складовими робочого шару з товарним знаком "Аквапол" поряд із високими показниками продуктивності полірування та зносостійкості мають здатність стабільної роботи протягом тривалого часу (без "засалювання"). Використання зазначених інструментів забезпечує шорсткість $R_z = 0,05$ мкм і оптичну чистоту PIII оброблених поверхонь, що задовольняє вимогам оптичного виробництва.

4.9. Критерій вибору мастильно-охолоджувального технологічного середовища

На основі кластерної моделі зносу скла при поліруванні можна показати, що з умови змочування мастильно-охолоджувальним технологічним середовищем (МОТС) поверхонь інструменту та деталі випливає, що сили, обумовлені поверхневим натягом, мають бути більші, ніж сили, обумовлені в'язкістю, тобто функція технологічного середовища $\Phi(\theta_1, \theta_2, \sigma_v, \eta) > 0$. Звідси випливає, що величина знімання оброблюваного матеріалу буде відмінною від нуля за виконання умови:

$$K = \sigma_n (\cos \vartheta_1 + \cos \vartheta_2) / 2\eta > U.$$

Величина, аналогічна K , тільки без урахування кута змочування МОТС поверхні інструменту (ϑ_2), використовувалася як критерій ($K = \sigma_n \cos \vartheta_1 / \eta$) впливу фізико-хімічних характеристик МОТС на дефектність обробленої поверхні рубіну, характеризуючи швидкість проникнення рідини в тріщинуватий шар.

Скориставшись критерієм $K/U > 1$ (U – швидкість відносного переміщення поверхонь оброблюваної деталі й інструменту), з'ясовують вплив гідростатичних і гідродинамічних характеристик МОТС на умови взаємодії поверхонь оброблюваної деталі та інструменту. Розрахована величина K/U для досліджених оптичних матеріалів при їхньому поліруванні з використанням як МОТС води перебуває в межах від 84,3 до 104,6, що забезпечує виконання умови $\Phi(\vartheta_1, \vartheta_2, \sigma_n, \eta) > 0$, а значить, і нормальні умови полірування. Для оцінки впливу складу МОТС на процес полірування скла можна скористатись наближеним критерієм $k^* = \sigma_n / \eta U$ (без урахування кутів змочування). Результати розрахунку величини k^* для МОТС різного складу наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Значення коефіцієнтів поверхневого натягу, в'язкості та величини k^* для МОТС різного складу (при $U = 0,6$ м/с)

№ п/п	МОТС	Коефіцієнт поверхневого натягу, $\sigma_n \cdot 10^3$, Н/м	Коефіцієнт зсувної в'язкості, $\eta \cdot 10^2$, Па·с	Коефіцієнт k^*
1	Вода	72,8	0,105	115,6
2	Толуол	28,5	0,061	77,5
3	Бензин	29,0	0,067	71,8
4	Спирт метиловий	22,6	0,063	59,6
5	Ацетон	23,7	0,070	57,1
6	Оцтова кислота	27,8	0,127	36,5
7	Етанол	22,8	0,122	31,1
8	Гас	26,8	0,150	29,8
9	Спирт пропиловий	23,8	0,239	16,6
10	Анілін	42,9	0,460	15,5
11	Олія оливкова	33,1	9,0	0,61
12	Гліцерин	59,4	139,0	0,07
13	Олія касторова	36,4	120,0	0,05

З таблиці видно, що для таких рідин як гліцерин, касторова і маслинова олії тощо $k^* < 1$, тобто $\Phi(\vartheta_1, \vartheta_2, \sigma_n, \eta) < 0$. У цьому випадку поверхні інструменту й оброблюваної деталі в процесі обробки відштовхуються одна від одної, що приводить до нульової величини знімання матеріалу деталі. У випадку використання МОТС іншого складу поряд з обмеженням за величиною $\Phi(\vartheta_1, \vartheta_2, \sigma_n, \eta)$ необхідно враховувати обмеження за діелектричною проникністю, що обумовлює відштовхування поверхонь інструменту та оброблюваної деталі при використанні, наприклад, як МОТС гасу та інших рідин.

Розділ 5

МЕХАНІЗМ УТВОРЕННЯ МІКРОРЕЛЬЄФУ ОПТИЧНОЇ ПОВЕРХНІ

5.1. Розподіл часток зносу за розмірами

Дослідження розподілу диспергованих часток за лінійними розмірами, поряд з вивченням інтенсивності зносу поверхонь при їх обробці, дозволяють визначити середній розмір таких часток, оцінити параметри мікрорельєфу поверхні, що утворюється, і одержати функцію розподілу часток за розмірами, що стає критерієм "фізичності" розроблювальних моделей зносу.

Можна вважати встановленим той факт, що середній розмір диспергованих часток твердих тіл залежить не від фізико-механічних властивостей матеріалів, а від виду механічної обробки. Розподіл часток скла у шламi за розмірами описується релеївським законом чи бета-розподілом. Однак аналіз густини розподілу після обробки скла на різних операціях (тонке і грубе шліфування, різання, свердління) свідчить, що, незважаючи на істотну відмінність параметрів бета-розподілу, самі функції практично збігаються. Крім того, дисперговані частки того самого розміру спостерігаються після всіх зазначених видів механічної обробки.

При аналізі часток зносу скла марки К8 можна виявити поряд з частками у вигляді кулі такі, поверхні яких мають довгасту і більш складну форму. Оскільки форму часток шламу можна оцінити тільки за їхніми проекціями, при розрахунку площі поверхні припускають, що ці частки є тілами обертання. Крім того, справедливо вважаючи більшість проєкцій колами або еліпсами (рис. 5.1), приймаємо, що частки шламу є еліпсоїдами обертання з осями a і b . Таке припущення, безумовно, є наближеним і похибки при визначенні площі поверхні часток шламу будуть обумовлені саме цим.

Осі a і b визначаються як максимальний і мінімальний розміри часток у взаємно перпендикулярних напрямках, а площа поверхні S такої частки (еліпсоїд обертання) обчислюється за формулою

$$S = 2\pi b \left[b + \frac{a^2}{\sqrt{a^2 - b^2}} \right] \arcsin \left[\frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \right] \quad (5.1)$$

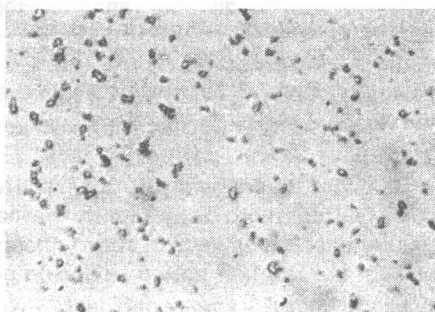


Рис. 5.1. Частки зносу скла марки К8 при збільшенні 1200^x

Площі поверхонь часток скла марки К8 у шламi утворюють дискретний ряд. При цьому максимальна похибка визначення середнього значення площi поверхнi частки для кожної вибiрки з даного ряду не перевищує 7 %. Крім того, усі частки скла мають площу поверхнi S_k , кратну величинi $S_0 = 19,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$. Густина розподiлу $\Delta n/N$ часток скла за площами поверхнi S_k (Δn – кiлькiсть часток iз площею поверхнi S_k , N – загальна кiлькiсть часток) приведена на рис. 5.2 (крива 1).

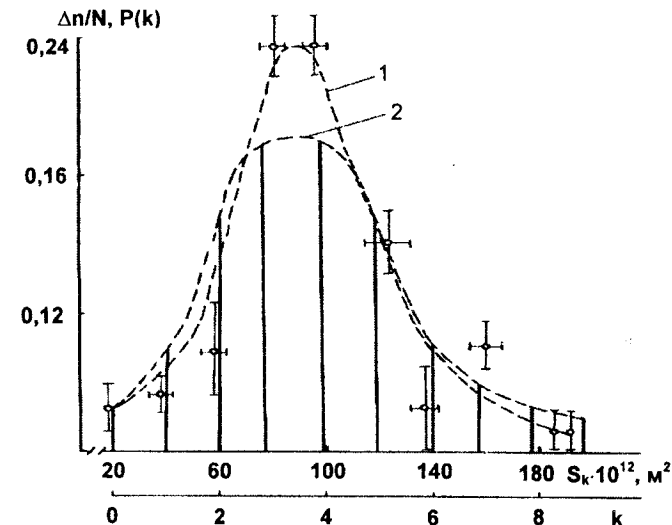


Рис. 5.2. Густина розподiлу часток скла за площами поверхнi S_k (1) i функцiя розподiлу Пуассона (2)

iз рис. 5.2 випливає, що довірчi интервали площi поверхнi для кожної з вибiрок iз дискретного ряду мiстять розрахунковi значення S_k , кратнi величинi S_0 мiнiмальної площi часток, тобто площу поверхнi часток скла можна визначити як $S_k = (k+1)S_0$ (k – номер вибiрки) i розглядати отриману криву як залежнiсть кiлькостi часток у кожнiй вибiрцi ($\Delta n/N$) вiд номера вибiрки k .

iз теорiї ймовiрностей вiдомо, що для дискретних факторiв ймовiрнiсть $P(k)$ знаходження випадкових величин у вибiрках описується розподiлом Пуассона:

$$P(k) = \frac{\nu^k \exp[-\nu]}{k!} \quad (5.2)$$

де ν – середнє за ансамблем k .

Для $\nu = \sum n(k) \cdot k / N = 3,89$ на рис. 5.2 (крива 2) приведено розподiл Пуассона, що добре описує залежнiсть $\Delta n/N = f(k)$.

Таким чином, площi поверхнi часток зносу скла марки К8 утворюють дискретний ряд, ймовiрнiсть виявлення частки з площею поверхнi S_k описується

розподілом Пуассона, а площі поверхонь усіх часток, що спостерігаються, кратні площі поверхні найбільш дрібних з них.

5.2. Механізм утворення мікрорельєфу обробленої поверхні

На основі кластерної моделі зносу поверхонь оброблюваної деталі й інструменту в процесі полірування (див. розд. 4) розглянемо механізм утворення мікропрофілю поверхні.

Відповідно до прийнятої моделі, кластери, що утворюють поверхню Од безупинно рухаються (коливаються) в області простору навколо положення рівноваги (точок, у яких сили притягання й відштовхування взаємно врівноважені) і локалізовані в об'ємі, що має визначену величину для кожної частки, причому області, зайняті різними частками, не перекриваються. Будь-яка енергія, яку поглинає поверхня, перетворюється в кінетичну енергію кластерів. Чим остання більша, тим значніше кластер зміщується від положення рівноваги під дією прикладених до нього сил. Розглядаючи зміщення кластера як коливання гармонійного осцилятора (без урахування взаємодії між сусідніми кластерами), виходячи з принципу розмірності й подібності, а також скориставшись фізико-статистичною структурною моделлю Л.С.Цеснека, можна показати, що енергії осцилятора $\hbar\omega$ відповідає характерний розмір L – відстань між найближчими сусідніми атомами чи молекулами (у випадку кристала – постійна ґратки). Для енергії ж кластера E_{kl} , який коливається, характерною відстанню служитиме розмір осередку (кластера) s , тобто $\hbar\omega / E_{kl} = L/s = \xi$.

Виходячи із зазначеного і вважаючи, що енергія кластера повністю витрачається на утворення нової поверхні ($E_{kl} = \sigma S$, де σ – питома поверхнева енергія, S – площа поверхні кластера), для розрахунку частоти коливань осцилятора ω можна одержати вираз $\omega = \xi \sigma S / \hbar$ (ξ – безрозмірний параметр). Скориставшись відомими з квантової механіки розв'язками рівняння Шредінґера для гармонійного осцилятора, можна показати, що енергія кластера E_{kl} може набувати значення:

$$E_{kl,n} = \xi \sigma S \left(n + \frac{1}{2} \right), \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (5.3)$$

а його власні функції

$$\psi_n = \sqrt{\alpha} \varphi_n(\alpha x), \quad (5.4)$$

де $\alpha = \frac{\sqrt{\xi \sigma S m}}{\hbar}$, m – маса кластера, x – координата,

$$\varphi_n(\alpha x) = \frac{1}{\sqrt{n! 2^n \sqrt{\pi}}} \cdot \exp(-\alpha^2 x^2) H_n(\alpha x) \quad (5.5)$$

– функції параболічного циліндра, $H_n(\alpha x)$ – поліноми Ерміта.

У зв'язку з тим, що знос поверхні твердого тіла можна уявити як перехід кластера з одного енергетичного стану в інший, визначивши правила відбору, можна показати, що в гармонійному наближенні правила відбору дають $n' = n \pm 1$, тобто переходи можливі тільки між сусідніми рівнями. Це означає,

що енергія, а отже, і площа поверхні всіх часток зносу, однакові, що експериментально ніколи не спостерігається.

Розглядаючи ж кластери в ангармонійному наближенні (з урахуванням їх взаємодії), можна знайти, що правилами відбору дозволені переходи: $n' = n \pm 1$, $n' = n \pm 2$ і $n' = n \pm 3$. Їх набір може бути розширений при врахуванні більш високих ступенів ангармонізму. Це свідчить про утворення часток зносу з площею поверхні S_k , кратною мінімальній S_0 , що підтверджується експериментально. Тому з розглянутої вище кластерної моделі функція густини розподілу часток зносу за площею поверхні являє собою розподіл Пуассона.

Кластерна модель зношування поверхонь може бути використана для опису шорсткості поверхні скла та інших оптичних матеріалів при фінішній алмазно-абразивній обробці. Мікрорельєф поверхні визначається тим, які саме частки зносу утворилися при обробці, тобто залежить від передісторії її виготовлення. Імовірність утворення частки зносу в точці з координатами (x, y) пропорційна ймовірності переходу з будь-якого стану в основний відповідно до правил відбору, що представляє собою $|\psi|^2$. Квадрат модуля ψ -функції відповідає поверхневій густині часток зносу і визначає шорсткість поверхні.

Визначимо тепер $|\psi|^2$. Якщо просумувати k функцій $|\psi|^2$, взятих у точці з координатою $x = 0$, то результат буде позбавлений усякого фізичного змісту, тому що в одній точці в даний момент часу може утворитися одна, а не кілька часток зносу. Припустимо, що в точці $x = 0$ імовірність виявлення системи в одному зі станів ψ_n описується функцією $|\psi_0|^2$. Функцію $|\psi_1|^2$ для опису системи необхідно визначати відносно координати $x - x_1^*$, функцію $|\psi_2|^2$ – відносно $x - x_2^*$ і т. д. Для $|\psi_k|^2$ можна в загальному вигляді записати формулу

$$|\psi_k|^2 = |\psi_k(x - x_k^*)|^2. \quad (5.6)$$

У (5.6) $x_0^* = 0$, а x_k^* визначається рекурентною формулою

$$x_k^* = x_{k-1}^* + \frac{\sqrt{2k-1}}{\alpha_{k-1}} + \frac{\sqrt{2k+1}}{\alpha_k} \quad (5.7)$$

З урахуванням цього можна розташувати квадрати модулів хвильових функцій у порядку натурального ряду за k і одержати вираз

$$|\psi_k(x)|^2 = C_0^2 \psi_0^2 + \sum_{k \geq 1} C_k^2 \psi_k^2(x - x_k^*) \quad (5.8)$$

Така послідовність функцій значно спрощує знаходження $|\psi_k|^2$. З умови неперервності для функції $|\psi_k|^2$ можна знайти довільні сталі, а саме:

$$C_k^2 \psi_k^2 = C_{k+1}^2 \psi_{k+1}^2$$

Поклавши для визначеності $C_0 = 1$, можна показати, що

$$C_k^2 = \frac{\psi_0^2(a_0)}{\psi_k^2[a_k \sqrt{2k+1}]}, \quad (5.9)$$

де $a_k = \alpha_k^{-1}$.

З урахуванням цього, а також ототожнюючи амплітуду коливань кластера a_k з половиною середнього розміру частки зносу, що утворилася, і скориставшись експериментальними даними вимірів часток зносу скла марки К8 ($a_0 = d_0/2 = 1,25$ мкм, $a_1 = 1,75$ мкм, $a_2 = 2,15$ мкм тощо), можна побудувати залежність $|\psi(x)|^2$ від x . Імовірність утворення часток зносу на поверхні уздовж напрямку x дорівнює $dP = |\psi|^2 dx$, а висота мікронерівностей має бути пропорційна d_k , причому з геометричних міркувань випливає, що коефіцієнт пропорційності становить половину розміру частки зносу ($d_k/2$). Виходячи з цього, можна одержати вираз для висоти мікронерівностей обробленої поверхні:

$$Z(x) = \frac{d_0}{2} \varphi_0^2\left(\frac{2x}{d_0}\right) + \frac{\varphi_0^2(1)}{2} \sum_{k>1} d_k \left[\frac{\varphi_k[2(x-x_k^*)/d_k]}{\varphi_k(\sqrt{2k+1})} \right]^2. \quad (5.10)$$

Мікропрофіль, побудований за допомогою даної залежності на основі експериментальних даних, має вигляд близький до реального (рис. 5.3).

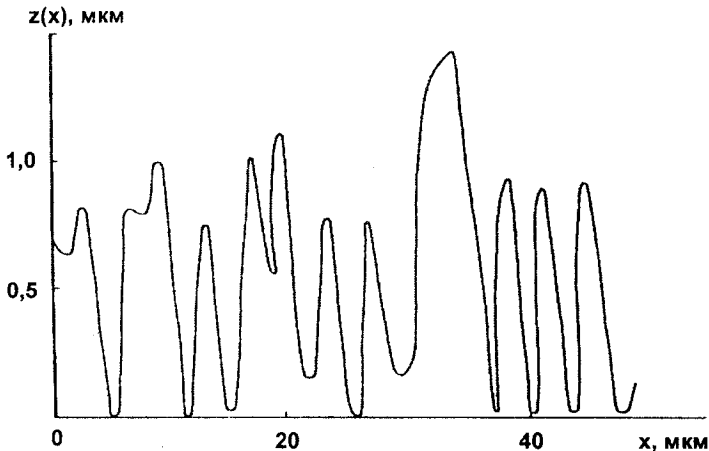


Рис. 5.3. Висота мікронерівностей поверхні

Формула (5.10) дозволяє розрахувати висоту мікронерівностей (профілограму) за розмірами часток зносу. Однак для одержання точного результату необхідні дуже громіздкі обчислення, що вимагають великих витрат часу. Логічним є їх спрощення для практичних цілей.

5.3. Розрахунки параметрів шорсткості оптичних поверхонь

Скориставшись введеною Л.С.Цеснеком величиною a_v – найвірогіднішого розміру часток зносу і допускаючи імовірність опису відриву часток зносу функцією $|\psi_0|^2$, маємо

$$Z(x) = \frac{a_v}{2} \sum_{k>0} \varphi_0^2 \left[\frac{2(x - ka_v)}{a_v} \right]. \quad (5.11)$$

де φ_0 – функції параболічного циліндра для $n = 0$ за формулою (5.5).

За допомогою формули (5.11) можна знайти висотні параметри нерівностей профілю R_a і R_{\max} (за ГОСТ 2789-73).

Найбільша висота нерівностей профілю R_{\max} дорівнює $0,29 a_v$.

Середньоарифметичне відхилення профілю R_a визначається за формулою

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |R_{\max} - Z(x)| dx, \quad (l - \text{базова довжина}).$$

За базову довжину можна прийняти половину періоду даної функції ($a_v/2$), а відхилення профілю поверхні варто відраховувати від R_{\max} , тому що оброблюваний матеріал відповідає області, що лежить вище лінії $Z(x)$. Таким чином,

$$R_a = R_{\max} - \frac{2}{a_v} \int_0^{\frac{a_v}{2}} Z(x) dx. \quad (5.12)$$

Обчислюючи інтеграл у (5.12), можна одержати, що $R_a = 0,04 a_v$.

Порівняння обчислених величин з тими, що спостерігаються на досліді, показує, що при шліфуванні скла ($a_v = 5,6$ мкм) розраховане значення R_{\max} (1,61 мкм) збігається з експериментальними даними (1,63–1,66 мкм), а розраховане значення R_a (0,22 мкм) лише на 10–20 % відрізняється від них (0,25–0,28 мкм).

Необхідно зазначити, що відношення $R_{\max}/R_a = 7,25$ є постійною величиною. Це узгоджується з результатами багатьох робіт, де приведені чисельні значення даного відношення, яке є близьким до отриманої величини.

Визначені за допомогою профілометра-профілографа моделі 252 висотні параметри R_{\max} і R_a плоских поверхонь оптичних деталей зі скла марки К8 після їх тонкого шліфування (у три переходи) інструментами з алмазних мікропорошків АСМ зернистістю 40/28, 20/14 і 10/7 наведені в табл. 5.1.

Із представлених у таблиці даних випливає, що для всіх зернистостей відношення R_{\max}/R_a близьке до розрахованої величини. Крім того, збіжність результатів розрахунків з експериментальними даними, що спостерігається при використанні інструменту з алмазних мікропорошків зернистістю 20/14 і менше, свідчить про можливість застосування запропонованої моделі для опису мікрорельєфу оброблених оптичних поверхонь (особливо для фінішних процесів обробки – тонкого і надтонкого шліфування та полірування).

Параметри шорсткості поверхонь оптичних деталей
при тонкому алмазному шліфуванні

Висотні параметри шорсткості	Зернистість алмазних мікропорошків		
	40/28	20/14	10/7
R_{\max} , мкм	4,58	1,59	1,10
R_a , мкм	0,54	0,22	0,15
R_{\max}/R_a	8,5	7,2	7,3

5.4. Комп'ютерне моделювання мікрорельєфу обробленої поверхні

У попередньому розділі розрахунок параметрів шорсткості поверхні скла здійснено на основі залежності висоти мікронерівностей від розміру часток зносу, що утворилися при його обробці. Однак ті припущення, що були зроблені при її виведенні, а саме – розташування квадратів модулів власних функцій кластерів у порядку натурального ряду за індексом k і залучення величини найвірогіднішого розміру частки зносу замість їхньої функції розподілу за розмірами, – трохи звужують можливості отриманих залежностей для аналізу реального процесу утворення мікронерівностей оброблюваної поверхні.

У зв'язку із зазначеним, розглянемо функцію $Z(x)$, що визначає висоту мікронерівностей поверхні, у загальному вигляді

$$Z(x) = \left[\frac{d_k}{2} \right]^2 |\psi|^2. \quad (5.13)$$

Виходячи з принципу суперпозиції, визначаючи амплітуду коливань кластера і враховуючи, що функції φ_k при різних k не перекриваються, для $Z(x)$ можна записати рівняння

$$Z(x) = \frac{1}{2} \sum_k C_k^2 d_k \varphi_k^2(2x/d_k). \quad (5.14)$$

Розглядаючи довільну послідовність функцій φ_k^2 , які утворюють функцію, пропорційну $Z(x)$, і враховуючи їх симетрію відносно $x = x_k^*$ та умови неперервності, можна записати вирази для $Z(x)$ і довільних сталих:

$$Z(x) = \frac{d_{k,0}}{2} \varphi_{k,0}^2 \left(\frac{2x}{d_{k,0}} \right) + \frac{1}{2} \sum_{i \geq 1} C_{k,i}^2 d_{k,i} \left[\varphi_{k,i} \left[\frac{2}{d_{k,i}} \left(x - \frac{x_{k,i} + x_{k,i-1}}{2} \right) \right] \right]^2. \quad (5.15)$$

$$C_{k,i}^2 = \frac{d_{k,i}}{d_{k,0}} \cdot \frac{\varphi_{k,0}(\sqrt{2k_0+1})}{\varphi_{k,i}(\sqrt{2k_i+1})}. \quad (5.16)$$

Таким чином, рівняння (5.15), у якому на послідовність k не накладаються ніякі обмеження, дозволяє розрахувати висоту мікронерівностей поверхні скла при обробці. Процедура розрахунку функції $Z(x)$ містить довільний вибір послідовності цілих чисел k , виходячи з розподілу часток зносу за розмірами. Саме це становить основу комп'ютерного моделювання мікрорельєфу обробленої оптичної поверхні.

Змодельємо мікропрофіль поверхні, що утворюється при шліфуванні скла. Функція густини розподілу часток зносу скла за розмірами описується розподілом Пуассона, а площі поверхні часток скла $S_{k,i}$ можна визначити в прийнятих позначеннях як добуток $(k_i + 1)S_0$ (S_0 – мінімальна площа поверхні частки зносу). У зв'язку з цим для розміру часток зносу, що утворюються при шліфуванні скла, використовується формула

$$d_{k,i} = \sqrt{\frac{(k_i + 1)S_0}{\pi}} \quad (5.17)$$

Розглядаючи процес шліфування скла марки К8 інструментом із алмазних мікропорошків АСМ 20/14 і поклавши параметр ξ розподілу Пуассона рівним 3,89, можна розрахувати функцію висоти мікронерівностей обробленої поверхні. Для цього застосовується метод Монте-Карло, де як вхідна випадкова величина використовується послідовність k_i , генерована комп'ютером, виходячи із розподілу Пуассона з параметром $\nu = 3,89$, який визначає як довільні сталі згідно з виразом (5.16), так і послідовність розташування хвильових функцій.

Типова профілограма поверхні скла, що утворена при шліфуванні, змодельована за допомогою комп'ютера, представлена на рис. 5.4. Її вигляд є близьким до отриманого експериментально за допомогою профілометра – профілографа моделі 252.

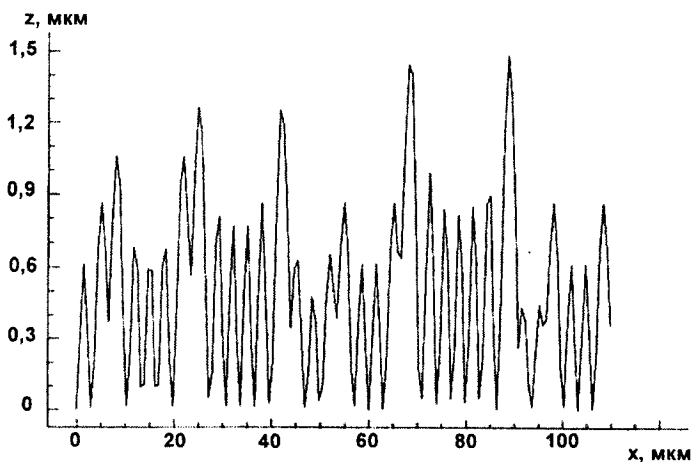


Рис. 5.4. Модельна профілограма шліфованої поверхні скла

Параметр шорсткості R_{\max} , знайдений як максимальне значення функції $Z(x)$, становить 1,49 мкм.

На основі результатів попередніх розділів можна оцінити найвірогідніший розмір часток зносу скла $a_v = 4,94$ мкм і параметри шорсткості обробленої поверхні при шліфуванні скла: $R_a = 0,04$ мкм, $a_v = 0,20$ мкм і $R_{\max} = 0,29$ мкм, $a_v = 1,43$ мкм. Останнім двом параметрам відповідають експериментально визначені значення: 0,22 мкм (відхилення 9 %) і 1,59 мкм (відхилення до 10 %) відповідно. З порівняння наведених величин випливає, що описаний метод розрахунку висоти мікронерівностей поверхні скла при шліфуванні дозволяє одержати результати, що добре узгоджуються з експериментальними.

Змоделюємо тепер мікропрофіль поверхні скла марки К8, що утворюється при її поліруванні інструментом "Аквапол". Із застосуванням методу Монте-Карло, як і в попередньому випадку, з урахуванням того, що розміри часток зносу при поліруванні скла $d_0 = 10$ нм, $d_{k,i} = (k_i + 1) d_0$, а параметр розподілу Пуассона $\nu = 0,67$, розрахуємо функцію $Z(x)$, що описує мікропрофіль поверхні скла.

Зі змодельованої профілограми (рис. 5.5) видно, що висоти окремих мікронерівностей полірованої поверхні коливаються в межах від 2 до 8 нм.

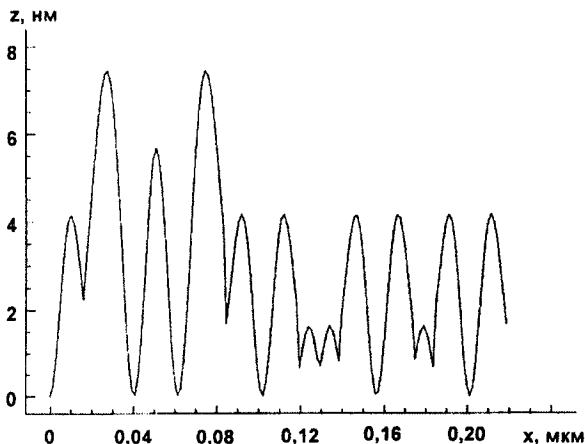


Рис. 5.5. Модельна профілограма полірованої поверхні скла

Це узгоджується з результатами досліджень тонкої структури полірованої поверхні скла методом багатопроменевої інтерференції Кехлера, згідно з якою структура поверхні являє собою ряд конусів висотою до 10 нм, причому найбільші з них мають висоту від 4 до 8 нм. Зіставлення величин мікронерівностей і параметрів шорсткості полірованої поверхні, оцінка яких дає $R_a = 1,2$ нм і $R_{\max} = 8,7$ нм, дозволяє стверджувати, що останні відповідають результатам спостережень мікронерівностей. Зокрема, результатам встановленим Брюхе і Поппа (за допомогою електронного мікроскопа – 1 нм), Твайманом (при фотографуванні за методом фазового контрасту – доли нм), Еренбургом (методом відбиття рентгенівських променів – близько 1 нм), Хівенсом (за допомогою смуг Фізо – 1–4 нм), Таланські (методом багатопроменевої інтерференції, що забезпечує роздільну здатність 0,3–0,5 нм, – 2 нм).

Використання сучасної профілометричної техніки з високою роздільною здатністю, наприклад інтерферометра "Zygo", для оцінки шорсткості полірованих поверхонь лінз діаметром 40 мм зі скла марки SK-7, оброблених інструментом "Аквапол" на верстаті "Opticam-SM" в умовах Центру виробництва оптики ("COM", University Rochester, США) дозволило визначити параметри шорсткості $R_a = 0,8$ нм і $R_{max} = 7,8$ нм, які практично збігаються з розрахованими за змодельованими на комп'ютері профілографами.

Як приклад, на рис. 5.6 наведено зображення вікна комп'ютера з профілограмою полірованої поверхні ОД діаметром 100 мм зі скла марки К8, обробленої за допомогою інструменту "Аквапол".

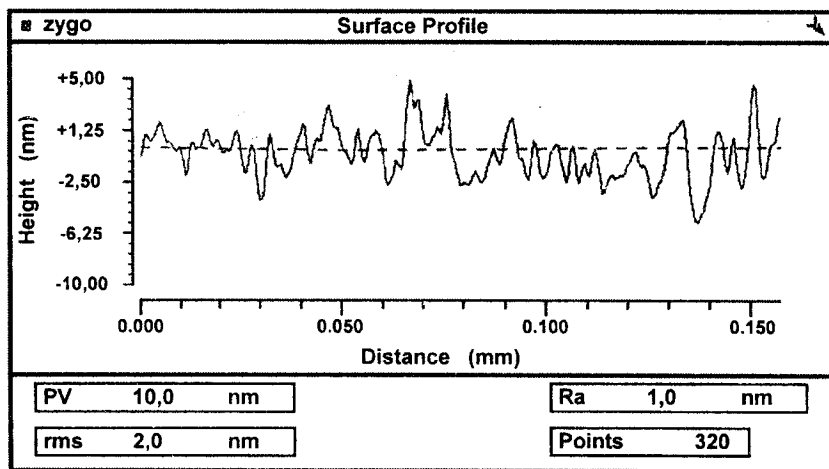


Рис. 5.6. Профілограма полірованої поверхні ОД зі скла, отримана за допомогою інтерферометра "Zygo" (США)

Вище показано, що висота мікронерівностей полірованої поверхні скла $Z(x)$ пропорційна розмірам часток зносу скла $d_k = d_0(k + 1)$, а їх розподіл за розмірами (по k) описується функцією Пуассона. Крім того, для розрахунків максимальної висоти мікронерівностей використовується формула $R_{max} = 0,29d_k$. Для реального профілю полірованої поверхні скла (рис. 5.6), можна припустити, що кількість виступів і западин однакове, а їх висота визначається R_{max} . У зв'язку з цим можна вважати, що у процесі полірування поверхні оптичної деталі зі скла утворюється мікропрофіль у вигляді виступів і западин з дискретними розмірами $h(k)$, які визначаються за формулою

$$h(k) = 0,145 d_0(k + 1),$$

а ймовірність спостереження k -го виступу чи западини $P(k)$ описується розподілом Пуассона:

$$P(k) = \frac{v^k \cdot \exp(-v)}{k!}, \quad v = 0,7.$$

На рис. 5.7 наведено розподіл Пуассона і експериментальні дані за визначенням кількості виступів і западин на профілограмі полірованої поверхні скла (рис. 5.6). Задовільна збіжність експериментальних і теоретичних даних є підтвердженням правильності описаних вище уявлень про механізм утворення мікрорельєфу оптичної поверхні при поліруванні.

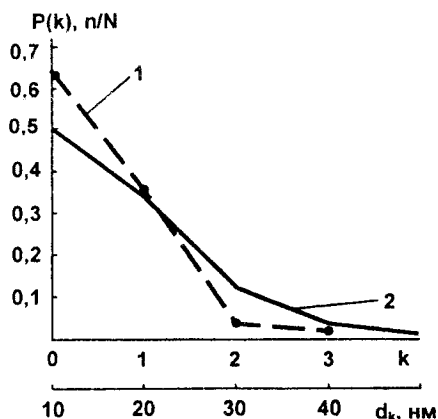


Рис. 5.7. Розподіл кількості виступів і западин полірованої поверхні скла за розмірами (1) і функція розподілу Пуассона (2)

Таким чином, розрахунок висоти мікрорельєфу поверхні і його комп'ютерне моделювання, засновані на застосуванні методу Монте-Карло, дозволяють одержати результати, що добре узгоджуються з експериментальними даними як для процесів шліфування, так і при поліруванні оптичних деталей зі скла.

5.5. Мікропрофіль полірованих поверхонь прецизійних оптичних деталей

Для забезпечення моделювання мікрорельєфу полірованої поверхні та аналізу впливу на нього умов процесу полірування і фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу необхідним є як узагальнення приведених результатів, так і їхня конкретизація.

Формування мікрорельєфу обробленої поверхні є результатом відриву з неї кластерів. Згідно з кластерною моделлю (розд. 4), енергія кластера може набувати значення $E_{cl}(n) = E_{cl}(0) \cdot (n + \frac{1}{2})$, а його розміри визначаються формулою

$$d_n = \sqrt{\xi[E_{cl}(n) - E_{cl}(0)] / \pi\sigma}, \quad (5.18)$$

де $\xi = \frac{\omega_{01}^4}{(\omega_{01}^2 - \omega_{02}^2)^2}$ – кількість фрагментів SiO_2 у кластері, ω_{01}, ω_{02} – частоти власних коливань молекул SiO_2 в оброблюваному матеріалі і CeO_2 в інструменті відповідно, σ – поверхнева енергія оброблюваного матеріалу.

Середній розмір кластерів визначається, виходячи з розподілу їх за розмірами $p(n, \nu)$ (розподілу Пуассона з параметром $\nu = \frac{E_{bind}}{E_{cl}}$, E_{bind} – енергія зв'язку оброблюваного матеріалу) за формулою

$$d_{cp} = \frac{\sum_n d_n p(n, \nu)}{\sum_n p(n, \nu)}. \quad (5.19)$$

Скористаємось схемою розрахунку мікропрофілю поверхні, запропонованою в попередніх розділах, доповнивши її розподілом кластерів за розмірами. Для цього суму за k у (5.14) розіб'ємо на доданки, окремі для кожного d_n . Кількість таких кластерів визначимо відносно кількості кластерів з фіксованим $n = n^*$ ($n^* \leq 4$, тому що часток з $n = 4$ за розподілом Пуассона з $\nu \approx 0,7$, характерним для процесу полірування, вміщується не більше 0,6 %):

$$k(n) = p(n, \nu) / p(n^*, \nu).$$

Тоді послідовність кластерів може бути зображена групами, що складаються з $k(n)$ штук кластерів d_n розмірами $l_n = d_n k(n)$. Сумарна її довжина $L = \sum_{n=0}^{n^*} l_n$ є відносною базовою довжиною для розрахунку шорсткості. Загальна кількість кластерів $K = \sum_n k(n)$.

Виходячи із зазначеного, у формулі (5.14) сума по k розбивається на доданки за схемою

$$\sum_{k=0}^K = \sum_0^{k(0)} + \sum_0^{k(1)} + \dots + 1,$$

причому в кожному доданку беруть свій розмір кластера d_n і функцію φ_n відносно зміщених координат, тобто замість x підставляють $x - kd_0$; $x - kd_1 - l_0$; $x - kd_2 - l_1 - l_0$ тощо.

Розрахуємо шорсткість поверхні скла марки К8, полірованої інструментом "Аквапол" на основі оксиду церію, скориставшись відомими значеннями величин:

$$\omega_{01} = 8,35 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1};$$

$$\omega_{02} = 8,765 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-1};$$

$$\sigma = 0,4 \text{ Дж/м}^2;$$

$$E_{bind} = 3,9 \text{ еВ}.$$

У результаті розрахунків можна одержати значення числа фрагментів SiO_2 у кластері $\xi = 96$, енергії кластера $E_{cl}(0) = 2,65$ еВ. Використовуючи ці значення, можна також проаналізувати $Z(x)$ і $Z(x, y)$ залежно від умов процесу полірування. Залежно від енергії кластера (переходів між рівнями n і $n = 0$) змінюються розміри d_n і їхній розподіл $p(n, \nu)$, а значить, і шорсткість обробленої поверхні. При цьому шорсткість оброблених поверхонь, яка утворюється в звичайному режимі полірування ($n = 0, 1, \dots, 4$), характеризується параметрами $R_a = 3,4$ нм; $R_{max} = 12,0$ нм.

У табл. 5.2 наведено результати вимірювань параметрів шорсткості R_a і R_{max} поверхонь деталей зі скла марки К8, оброблених інструментами на основі трьох полірувальних композитів "Аквапол – 1, – 2 і – 5" (вимірювання виконано на лазерному інтерферометрі "Zygo").

Таблиця 5.2

Параметри шорсткості полірованих поверхонь деталей зі скла марки К8

Полірувальний композит	Параметри	шорсткості
	R_{it} , нм	R_{max} , нм
Аквапол – 1	2 – 3	14 – 15
Аквапол – 2	1 – 2	11 – 19
Аквапол – 5	1,0 – 1,2	4 – 10

$$\overline{R_{it}} = 1,7$$

$$\overline{R_{max}} = 12,2$$

Наведені дані дозволяють зробити висновок, що при поліруванні скла марки К8 інструментом "Аквапол" досягається шорсткість поверхні з параметрами R_a і R_{max} , близькими до розрахованих значень.

Для аналізу висотних параметрів мікропрофілю полірованої поверхні скористаємось наближенням, відповідно до якого замість розподілу часток зносу за розмірами використовується величина найвірогіднішого розміру, як така, коли для кожного $n > 1$ візьмемо найбільшу величину, тому що саме вона визначає R_{max} .

Тоді, поклавши $L_n = 10d_n$, за формулою (5.11) можна визначити висотні параметри мікропрофілю в такий спосіб: найбільша і найменша висота нерівностей профілю:

$$R_{max} = Z(d_n) \quad R_{min} = Z(d_n/2); \quad (5.20)$$

середня лінія профілю R_s :

$$R_s = (R_{min} + R_{max})/2,$$

середнє арифметичне відхилення профілю R_a :

$$R_a = (1/L_n) \int_0^{L_n} [Z(x) - R_s] dx; \quad (5.21)$$

середнє квадратичне відхилення профілю R_q (rms):

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L_n} \int_0^{L_n} [Z(x) - R_s]^2 dx}. \quad (5.22)$$

За формулами (5.20) – (5.22) для різних значень d_n розраховано величини висотних параметрів шорсткості для двох оброблюваних матеріалів: скла марки К8 ($E_{hmd} = 3,9$ eВ) і кварцового скла марки КУ ($E_{hmd} = 4,6$ eВ) (табл. 5.3).

Результати розрахунку R_a , R_q і R_{\max}

Марка скла	К8					КУ				
	d_n , нм	8,1	11,4	14,0	16,1	18,0	5,7	8,1	9,9	11,4
R_a , нм	0,48	0,68	0,84	0,96	1,08	0,34	0,48	0,59	0,68	0,76
R_q , нм	0,79	1,11	1,36	1,57	1,75	0,55	0,79	0,96	1,11	1,24
R_{\max} , нм	2,37	3,33	4,09	4,71	5,26	1,67	2,37	2,90	3,33	3,76

Результати порівняння R_a , R_q і R_{\max} з експериментальними даними для поверхні скла марки К8, полірованої інструментом "Аквапол-5" за описаним вище інтенсивним режимом (за максимальних енергій кластерів, тобто при $n = 4$), наведені в табл. 5.4. Тут же наведено дані для поверхні кварцового скла марки КУ, полірованої інструментом Аквапол-7 за самим "м'яким" режимом (при притискуванні блоку деталей до інструменту – за рахунок власної ваги, без примусового тиску, швидкості обертання інструменту менше 100 об/хв).

Таблиця 5.4

Результати розрахунку та експериментів для скла марок К8 і КУ

Параметри шорсткості	К8		КУ	
	Розрахунок	Експеримент	Розрахунок	Експеримент
R_a , нм	1,08	1,1±0,1	0,34	0,26±0,06
R_q , нм	1,75	1,5±0,5	0,55	0,32±0,07
R_{\max} , нм	5,26	7,0±0,1	1,67	1,69±0,17

Із наведених у табл. 5.4 даних випливає, що розраховані значення висотних параметрів шорсткості полірованих поверхонь потрапляють у довірчі інтервали відповідних експериментально визначених значень.

Залежність параметра R_a полірованої поверхні від розміру кластерів, що відриваються з неї, для стекол марок К8 і КУ (табл. 5.3) може бути апроксимована лінійною функцією виду $R_a = 0,06 d_n$, що йде з початку координат. Однак це не має фізичного змісту, тому що існує мінімально припустимий розмір кластера, що відривається, d_n : для КУ-5,7 нм, для К8 – 8,1 нм і, відповідно, мінімально припустиме значення R_a : для КУ – 0,34 нм, для К8 – 0,48 нм. Аналогічно визначаються і мінімально припустимі значення R_q і R_{\max} .

Отримані значення висотних параметрів шорсткості можна трактувати на основі кластерної моделі будови поверхні кремнезему і його квазітетраедричної структури. Поверхня кремнезему складається із фрагментів $O=Si=O$ з довжиною зв'язку $Si=O$ $l_1 = 0,1606$ нм, з'єднаних більш слабкими зв'язками з довжиною $l_2 = 0,1612$ нм. З аналізу, проведеного в попередніх розділах, випливає, що для кварцу і кварцового скла (кут $OSiO - 144 \div 152^\circ$) відстань L_x між поверхневими фрагментами SiO_2 дорівнює 0,62 нм, відстань L_y між шарами фрагментів – 0,396 нм. Із геометричних міркувань випливає, що при зніманні оброблюваного матеріалу шляхом відриву окремих фрагментів SiO_2 можна було б до-

святити величини шорсткості порядку $0,5 \div 1,0$ від довжини зв'язку кремній–кисень: $R_{\max,a} \cong (L_x/2) \operatorname{tg}[(180^\circ - \angle \text{OSiO})/2] \cong 0,09$ нм, тобто атомно гладенька поверхня характеризується шорсткістю $\sim 0,1$ нм. Однак при поліруванні кремнезему такий механізм не може бути реалізований у зв'язку з тим, що для відриву кластера з оброблюваної поверхні необхідно, щоб його енергія була більша, ніж енергія утворення силіленового центра (розриву зв'язку Si=O), яка становить 5,03–5,05 еВ. Такою енергією (5,3 еВ) володіє кластер з розмірами 5,7 нм, до складу якого входить $\xi = 96$ фрагментів SiO_2 .

Кластер можна уявити у вигляді паралелепіпеда з товщиною, рівною 4 шарам фрагментів SiO_2 , у якому на поверхні розташовано $\xi/4$ фрагментів. При відриві таких кластерів утвориться шорсткість з $R_{\max} = 4L_y + R_{\max,a} = 1,68$ нм. Для оцінки величин R_a і R_q скористаємось такими міркуваннями. Виходячи з того, що мінімальний кластер складається із 96 фрагментів SiO_2 , можна допустити можливість їх утворення у вигляді паралелепіпедів 24×4 , 32×3 , 48×2 і 96×1 (добуток кількості поверхневих фрагментів на кількість шарів). Тоді модельну профілограму можна описати функцією $Z(x)$, утвореною профілями зазначених кластерів, що розташовані в порядку зменшення кількості шарів:

$$Z(x) = \begin{cases} R_{\max}, & 0 \leq x < c_1 L_x / 2 \\ R_{\max} - L_y, & c_1 L_x / 2 \leq x < c_2 L_x / 2 \\ R_{\max} - 2L_y, & c_2 L_x / 2 \leq x < c_3 L_x / 2 \\ R_{\max} - 3L_y, & c_3 L_x / 2 \leq x < c_4 L_x / 2 \end{cases} \quad (5.23)$$

де $c_1 = \sqrt{24}$, $c_2 = c_1 + \sqrt{32}$, $c_3 = c_2 + \sqrt{48}$, $c_4 = c_3 + \sqrt{96}$.

Область визначення функції $[0, L]$, $L = \frac{L_x}{2} [\sqrt{96} + \sqrt{48} + \sqrt{32} + \sqrt{24}]$ – базова довжина для розрахунку параметрів шорсткості.

Скориставшись формулами (5.21) і (5.22) при $R_z = 0$, можна розрахувати величини R_a і R_q , що можуть бути досягнуті при поліруванні поверхні кремнезему. Одержимо: $R_a = 0,44$ нм і $R_q = 0,72$ нм.

Результати аналізу, проведеного на основі кластерної моделі будови поверхні кремнезему і його квазітетраедричної структури, дозволили одержати значення висотних параметрів шорсткості полірованої поверхні, що добре узгоджуються з результатами, отриманими методом комп'ютерного моделювання.

Використовуючи чисельні значення висотних параметрів шорсткості, визначимо тепер їх співвідношення: $(R_{\max}/R_a) = 4,9$, $(R_{\max}/R_q) = 3,0$, $R_{\max} = 0,29d_n$, $R_a = 0,06d_n$, $R_q = 0,1d_n$. Ці співвідношення незначно відрізняються від раніше отриманих: $R_{\max}/R_a = 7,25$, $R_{\max} = 0,29d_n$, $R_a = 0,04d_n$. Їхнє відхилення не перевищує 34 %, що є прийнятним для таких складних і багатofакторних процесів, як полірування.

Розглянемо тепер вплив характеристики полірувального інструменту на формування мікрорельєфу оброблюваної поверхні деталі зі скла марки К8. Розрахуємо висотні параметри шорсткості полірованої поверхні R_a , R_q і R_{\max} , виходячи з енергії і розмірів кластерів, що відриваються, використовуючи співвідношення частот власних коливань фрагментів в оброблюваному матеріалі і в матеріалі полірувального порошку, який використано при виготовленні інструменту.

При цьому врахуємо ту обставину, що для скла характерними частотами є 443 см^{-1} ($8,35 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$), 568 см^{-1} ($10,71 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$), зумовлені коливаннями мостикових атомів кисню перпендикулярно до напрямку Si-Si як у площині кута Si-O-Si, так і перпендикулярно до цієї площини (згинання і хитання), і частота 811 см^{-1} ($15,3 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$), зумовлена в основному коливаннями атомів кремнію. Будемо також розглядати тільки ті процеси, для яких розподіл кластерів за розмірами описується розподілом Пуассона з параметром $\nu < 1$ (характерним для полірування).

Скориставшись відомими значеннями частот власних коливань ω_{02} (у см^{-1}): 467 – для UO_2 , 466 – для ThO_2 , 465 – для CeO_2 , 845 – для MgO , 550 – для Cr_2O_3 , 456 – для ZrO_2 , 550 – для Fe_2O_3 , одержимо розрахункові значення числа ξ фрагментів SiO_2 у кластерах, їх енергії E_{cl} , розміру d_0 і параметра розподілу Пуассона, а також мінімально припустимі значення висотних параметрів R_a , R_q і R_{\max} (табл. 5.5).

Таблиця 5.5

Шорсткість поверхні, полірованої різними полірувальними порошками

Полірувальний порошок	Параметри кластерної моделі				Висотні параметри шорсткості, нм		
	ξ	E_{cl} , еВ	d_0 , нм	ν	R_a	R_q	R_{\max}
UO_2	82	4,5	4,8	1,0	0,29	0,47	1,41
ThO_2	90	4,9	5,3	0,93	0,32	0,52	1,55
CeO_2	96	5,3	5,7	0,87	0,34	0,55	1,67
MgO	140	7,5	8,1	0,61	0,48	0,79	2,37
Cr_2O_3	256	14,1	15,2	0,33	0,91	1,48	4,45
ZrO_2	271	14,9	16,0	0,31	0,96	1,56	4,69
Fe_2O_3	271	14,9	16,1	0,31	0,96	1,57	4,70

З приведених у табл. 5.5 даних випливає, що для одержання оптичних поверхонь з мінімальною шорсткістю в полірувальному інструменті необхідно використовувати порошки на основі оксидів урану, торію і церію. Застосування оксидів UO_2 і ThO_2 є недоцільним через їх велику вартість і складності технології виробництва, тому порошки CeO_2 є і дотепер єдиними, які використовуються при поліруванні оптичних поверхонь зі скла та інших кремнеземовмісних матеріалів як у вільному стані, так і зв'язаному (в інструменті "Аквапол").

Таким чином, за допомогою комп'ютерного моделювання мікрорельєфу полірованої поверхні й експериментальних вимірювань методами лазерної інтерферометрії можна показати, що основними факторами, які впливають на мікрорельєф оброблюваної поверхні є: характеристика робочого шару інструменту (частота власних коливань ω_{02} молекул полірувального порошку), фізико-хімічні властивості оброблюваного матеріалу (поверхнева енергія σ , енергія зв'язку E_{bind}) і умови процесу полірування (тиск p_a , швидкість U відносного переміщення інструменту і деталі, кількість МОТС – води, що визначають енергію і розміри кластерів, які відриваються).

Розділ 6

МЕХАНІЗМ ФОРМОУТВОРЕННЯ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

6.1. Закономірності формування макрорельєфу оптичної поверхні

У розділі 3 (у першій частині) показано, що інтенсивність знімання оброблюваного матеріалу і зносу робочої поверхні полірувального інструменту можуть бути обчислені на основі рівняння зносу, і є пропорційними кількості і об'єму кластерів, що відриваються з поверхонь. Вважаючи, що інтенсивність V зносу полірувального інструменту залежить від довжини шляху тертя елементарної ділянки його робочої поверхні по оброблюваній поверхні деталі, для V можна одержати вираз

$$V(r) = K p_a(r) \frac{U(r)}{U(r) + U_0} \cdot L(r) \quad (6.1)$$

де K – коефіцієнт пропорційності, r – радіус колових зон інструменту, p_a – номінальний тиск притискання інструменту до оброблюваної деталі, U – відносна швидкість інструменту і деталі, U_0 – характеристична швидкість, L – довжина шляху тертя елемента інструменту по оброблюваній поверхні.

Розглянемо функцію $f(U) = U/(U + U_0)$. Введена до неї величина характеристичної швидкості U_0 для процесу полірування скла інструментом на основі оксиду церію становить 1,2 м/с. З огляду на ту обставину, що полірування оптичних поверхонь зазвичай здійснюється при відносно низьких швидкостях (при частоті обертання інструменту діаметром 400 мм близько 100 об/хв – $U = 2$ м/с), оцінимо функцію f на ділянці $[0; 2U_0]$ методом інтегрального квадратичного апроксимування. Тоді

$$f(U) = \frac{3 \ln 3}{8} \cdot \frac{U}{U_0}.$$

Середня величина відхилення на ділянці $[0; 2U_0]$ не перевищує 15 %.

Рівняння (6.1) можна звести до вигляду

$$V(r) = K^* p_a(r) U(r) L(r), \quad (6.2)$$

де K^* – коефіцієнт пропорційності.

Отримане рівняння можна прийняти як базове для розрахунків коефіцієнта заповнення поверхні інструменту робочим шаром і технологічних параметрів процесу обробки (тонкого алмазного шліфування й полірування) оптичних поверхонь.

6.2. Формоутворення плоских поверхонь оптичних деталей при обробці методом притирання

При обробці оптичних деталей за методом притирання найбільші труднощі представляє формоутворення плоских поверхонь. Останнім часом розпочато створення умов для управління точністю формоутворення оптичних поверхонь за рахунок використання інструментів зі зв'язаним абразивним чи полірувальним порошком. Конструкція їхнього робочого шару проектується на базі існуючих і розроблювальних методик розрахунку форми поверхонь інструменту й оброблюваної деталі, що притираються одна до одної. Усі вони засновані на гіпотезі Престона і сталості тиску в зоні контакту інструменту та оброблюваної деталі. Однак відсутність аналізу розподілу тиску по колових зонах інструменту і деталі ускладнює як розуміння закономірностей формоутворення оптичних поверхонь, так і використання зазначених методик для практичних цілей.

Розподіл тиску в контактній оброблюваній поверхні оптичної деталі й інструменту описується гіперболічною залежністю. Особливу точку, у якій $p_a \rightarrow \infty$ при $r \rightarrow \infty$, можна усунути шляхом обмеження тиску граничною міцністю оброблюваного матеріалу σ_p . З урахуванням цього, розподіл тиску по колових зонах верхньої ланки (інструменту чи оброблюваної деталі) з радіусом ρ описується формулою (величина σ_p визначається через коефіцієнт Пуассона ν і модуль пружності E):

$$p_a(\rho) = \begin{cases} \frac{P}{2\pi R_1 \rho}, & p_a \leq \sigma_p, \\ \sigma_p, & p_a > \sigma_p \end{cases}, \quad (6.3)$$

де P – зусилля притискання інструменту до оброблюваної деталі, R_1 – радіус верхньої ланки.

Прирівнюючи p_a і граничну міцність σ_p матеріалу, що притаманна склу марки К8 (5,8 ГПа), можна знайти радіус особливої точки ρ_0 . У реальних умовах при обробці плоских поверхонь оптичних деталей на верстаті моделі PLM-400, коли $R_1 = 175$ мм і $P = 4$ кН, шуканий радіус $\rho_0 = 0,6$ мкм, тобто $\rho_0 \ll R_1$.

Розглядаючи схему обробки, коли верхня ланка – інструмент, а нижня – деталь, можна розрахувати внесок у процес знімання матеріалу з оброблюваної поверхні поблизу особливої точки. Елементарна ділянка інструменту діаметром $2\rho_0$, що розташована в його центрі, диспергує оброблюваний матеріал по спіральній траєкторії, площа якої значно менша, ніж загальна площа оброблюваної поверхні. Це дозволяє зробити висновок про дуже малий внесок у процес знімання матеріалу елементом робочого шару інструменту поблизу особливої точки, яким можна знехтувати.

Раніше було показано, що на точність формоутворення плоскої поверхні при її обробці з усіх кінематичних і режимних параметрів процесу найбільше впливає несиметрія штриха e_0 . Враховуючи це, а також беручи до уваги, що тиск в усіх точках нижньої ланки, що лежать на тому самому радіусі r , неодна-

ковий через їх різне віддалення від точки прикладання навантаження, можна знайти розподіл середнього тиску по колових зонах нижньої ланки (рис. 6.1).

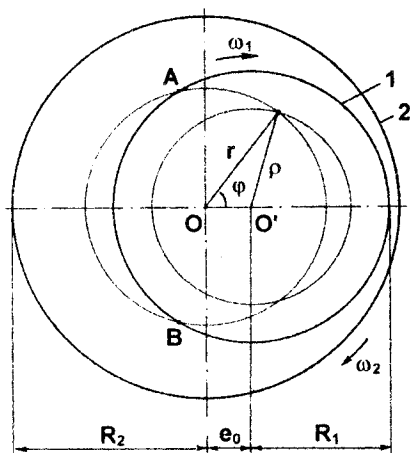


Рис. 6.1. Схема обробки плоскої оптичної поверхні

У загальному випадку для визначення величини середнього тиску по коловим зонам нижньої ланки необхідно усереднити вираз (6.3) за кутом φ , вибираючи як межу інтегрування функцію φ_k :

$$\varphi_k = \begin{cases} \pi, & r < R_1 - e_0, \\ \arccos\left[\frac{r^2 + e_0^2 - R_1^2}{2re_0}\right], & R_1 - e_0 < r < R_1 + e_0, \\ 0, & r > R_1 + e_0 \end{cases} \quad (6.4)$$

Тоді

$$\overline{p_a(r,t)} = \frac{1}{\varphi_k} \int_0^{\varphi_k} p_a(r) d\varphi = \frac{PF(\varphi_k, k)}{\pi R_1 \varphi_k (r + e_0)} \quad (6.5)$$

де $F(\varphi_k, k)$ – неповний еліптичний інтеграл 1-го роду; $k = \frac{2\sqrt{re_0}}{r + e_0}$ – модуль інтеграла.

Для умов обробки, за яких $R_1 = 70$ мм, $R_2 = 100$ мм, $e_0 = 15$ мм, результати розрахунків за формулою (6.5) представлені на рис. 6.2. (крива 1). Функція

$\xi = \frac{F(\varphi_k, k)}{\varphi_k (r + e_0)}$ пропорційна середньому тиску і залежить від радіуса колових зон нижньої ланки r , маючи особливу точку при $r = e_0$, яку можна усунути (формула (6.3)).

Нелінійність функції ξ в області $[R_1 - e_0, R_1 + e_0]$ визначається виглядом функції φ_k , наведеної на рис. 6.2 (крива 2), тобто характером зміни дуги (а значить і площі) контакту колової зони радіусом r з поверхнею верхньої ланки (дуга АВ на рис. 6.1).

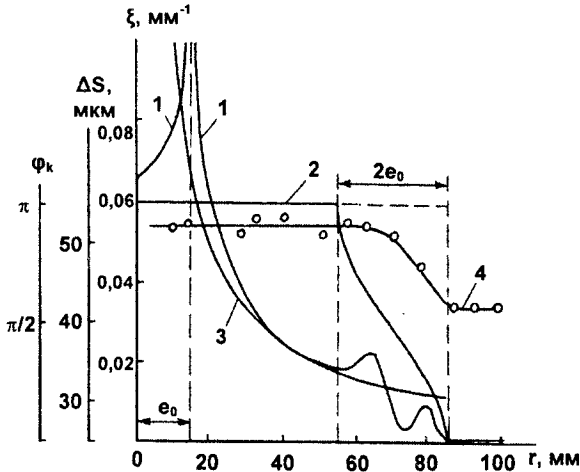


Рис. 6.2. Залежності ξ (1), φ_k (2), r^{-1} (3) і зносу інструменту ΔS (4) від радіуса колової зони

На рис. 6.2 представлена також функція (r^{-1}) (крива 3), яка описує гіперболічну залежність середнього тиску від радіуса колових зон r , подібну функції (6.3). Аналіз наведених залежностей дозволяє зробити висновок про те, що розподіл середнього тиску по колових зонах нижньої ланки з великим ступенем точності (за винятком особливих точок) описується гіперболічною функцією (6.3) при заміні в ній $\rho \rightarrow r$. Крім того, нелінійність розподілу тиску в області $2e_0$ при $r \in [R_1 - e_0, R_1 + e_0]$ обумовлює в ній нерівномірний знос інструменту (нижньої ланки), що підтверджується експериментальними даними (рис. 6.2, крива 4).

Розглянемо тепер, як змінюється розподіл тиску при зворотно-поступальному переміщенні інструменту і деталі відносно один одного. Для цього припустимо, що обробка деталі відбувається без виходу верхньої ланки за край нижньої, штрих (зворотно-поступальне переміщення) – симетричний ($e_0 = 0$) і в момент часу $t = 0$ інструмент і деталь розташовані на одній осі.

Зміну ексцентриситету l з часом можна описати функцією

$$l = (R_2 - R_1) \sin\left(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t\right), \quad (6.6)$$

де τ – час подвійного ходу кривошипа верстата.

Тоді, розглядаючи на поверхні верхньої ланки точку, що лежить на радіусі ρ і розташована відносно центра нижньої ланки на радіусі $r = \rho + l$, відповідно до (6.3) і (6.5) для розрахунку середнього тиску за час подвійного ходу одержимо

$$\overline{p_a(r,t)} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p_a(r,t) dt = \frac{P}{2\pi R_1 \sqrt{r^2 - (R_2 - R_1)^2}} \quad (6.7)$$

Отримана формула (6.7) справедлива за виконання умови $|r| > R_2 - R_1$, тобто для крайніх зон радіусом r , у яких середній тиск зменшується зі збільшенням r .

Для з'ясування залежності середнього тиску від r при $|r| < R_2 - R_1$ звернемося до схеми (рис. 6.3), на якій показано розташування інструменту і деталі при їхньому відносному переміщенні. Сусідні, послідовно зайняті верхньою ланкою положення перебувають на відстані b одне від одного: $b = 2L t_1 / \tau$ (L – довжина штриха, t_1 – час одного оберту верхньої ланки). Для процесу обробки, згідно з прийнятими припущеннями, виконується умова $b \ll R_1, R_2$.

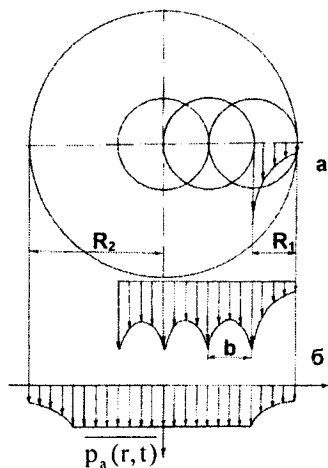


Рис. 6.3. Залежність середнього тиску від радіуса колових зон

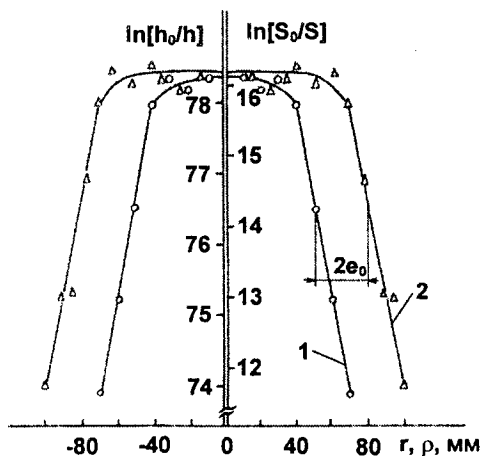


Рис. 6.4. Залежності зносу інструменту і знімання скла з оброблюваної поверхні деталі від радіуса їхніх колових зон

Таким чином, тиск, розподілений за коловими зонами нижньої ланки, можна вважати постійним у часі в області $|r| < R_2 - R_1$ і спадним при збільшенні r відповідно до формули (6.7) в області $|r| > R_2 - R_1$ (рис. 6.3, крива б).

Отриманий результат узгоджується з відомим положенням про вирівнювання тиску в процесі обробки і дозволяє охарактеризувати точність формоутворення плоских поверхонь оптичних деталей при шліфуванні й поліруванні, а також визначити через несиметрію штриха e_0 ширину крайніх зон, у яких спостерігається відхилення форми поверхонь інструменту та оброблюваної деталі за рахунок зменшення тиску.

На рис. 6.4 у напівлогарифмічному масштабі приведені експериментальні залежності зносу інструменту і знімання скла з оброблюваної поверхні деталі від радіуса їх колових зон, отримані за описаних вище умов (h_0 , h – висоти деталі зі скла; S_0 , S – висоти робочого шару інструменту спочатку і після обробки відповідно).

Із рис. 6.4 видно, що відхилення форми інструменту (нижньої ланки) від площини спостерігається в крайній зоні шириною $2e_0$. Похибка форми відповідає "підйому краю" нижньої ланки, що є безпосереднім наслідком отриманих функцій розподілу тиску і підтверджується наявними дослідними даними.

Більш того, для підвищення точності формоутворення за рахунок сталості тиску по всій площі поверхонь інструменту і деталі величина виходу верхньої ланки за край нижньої має бути не менш $2e_0$.

Очевидно, що умови забезпечення високої точності формоутворення плоскої поверхні оптичної деталі зводяться до вимоги площинності робочої поверхні інструменту і рівномірного зношування її в процесі полірування, тобто $V = \text{const}$.

Схему полірування плоскої оптичної поверхні наведено на рис. 6.1. Для розв'язку задачі про характер зношування робочого шару полірувального інструменту по колових зонах радіусом ρ (коли інструмент – верхня ланка) чи r (коли інструмент – нижня ланка) можна зробити такі припущення:

1) кутова швидкість обертання верхньої ланки $\omega_1 = 0$. Роль обертання верхньої ланки зводиться лише до того, щоб усі ділянки поверхонь брали участь у процесі полірування;

2) шлях тертя елемента поверхні робочого шару інструменту по оброблюваній поверхні L визначається тільки коефіцієнтом його заповнення по колових зонах $k_j(\rho)$ чи $k_j(r)$.

Для розрахунку інтенсивності зношування робочої поверхні інструменту по колових зонах з урахуванням таких припущень використовується рівняння (6.2).

Розглянемо процес полірування плоскої поверхні при положенні інструменту зверху (рис. 6.1). Тоді середня відносна швидкість обертання інструменту і деталі визначається величиною $\omega_2 |r_x|$ (ω_2 – кутова швидкість обертання нижньої ланки).

Можна показати, що середня відстань від елементів колової зони інструменту радіусом ρ до центра оброблюваної деталі (початку координат) r_x визначається за формулою (φ – полярний кут)

$$r_x = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} r d\varphi. \quad (6.8)$$

Тут

$$r = e_0 \cos \varphi \pm \rho \sqrt{1 - \left(\frac{e_0}{\rho}\right)^2 \sin^2 \varphi}. \quad (6.9)$$

Підставляючи (6.9) у (6.8), знаходимо r_x і вираз для розрахунку відносної швидкості інструменту та деталі U у вигляді

$$U(\rho) = \frac{2}{\pi} \omega_2 \rho E(e_0 / \rho) \quad (6.10)$$

де E – повний еліптичний інтеграл 2-го роду.

Враховуючи викладене і виходячи з (6.2), можна визначити функцію розподілу коефіцієнта заповнення поверхні інструменту робочим шаром по колових зонах:

$$k_i(\rho) = \frac{\text{const}}{p_a(\rho) \rho E(e_0 / \rho)} \quad (6.11)$$

Як показує рівняння (6.11), точність формоутворення плоских оптичних поверхонь залежить від конструкції робочого шару інструменту, кінематичних (e_0 – несиметрія штриха) і режимних (p_a – тиск) параметрів процесу полірування, тобто розрахунок найбільш раціональної конструкції інструменту має сенс тільки для визначених режимів обробки і настроювання верстата.

Якщо розглянути рівняння (6.11) за припущення про сталість тиску $p_a = \text{const}$ і скористатись граничними умовами: $k_i = 1$, коли $\rho = e_0$ (робочий шар суцільний), то можна одержати розподіл $k_i(\rho)$ у вигляді

$$k_i(\rho) = \frac{e_0}{\rho E(e_0 / \rho)} \quad (6.12)$$

Відповідно до формули (6.12) можна дослідити залежність $k_i(\rho)$ (рис. 6.5, крива 1) щодо процесу полірування плоскої поверхні блоку оптичних деталей діаметром 180 мм інструментом діаметром 150 мм за схемою: інструмент – угорі, деталь – внизу. Полірування здійснюється при $e_0 = 10$ мм.

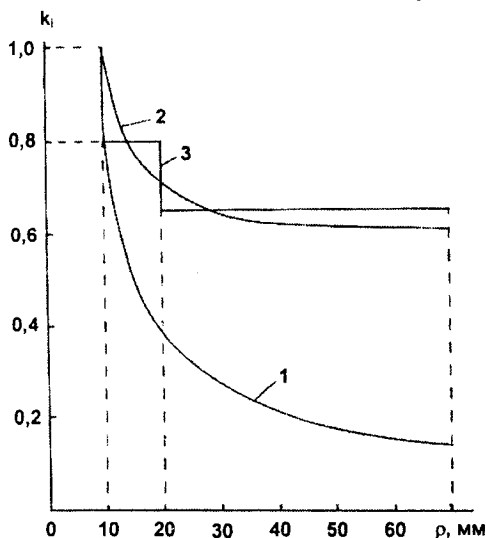


Рис. 6.5. Залежності коефіцієнта заповнення від радіуса колових зон інструменту

Робочий шар інструменту являє собою 8 променів, що виходять із центра (по 6 полірувальних елементів "Аквапол" діаметром 10 мм на кожному промені). У центрі інструменту – отвір діаметром 20 мм.

Така конструкція аналізувалася для процесу шліфування плоских поверхонь оптичних деталей при положенні інструменту внизу. Зменшення коефіцієнта заповнення зі збільшенням радіуса колових зон інструменту відповідно до виразу (6.12) приводило до досить високої точності формоутворення оптичних поверхонь при шліфуванні.

Як показала експериментальна оцінка точності формоутворення при використанні інструменту з такою ж конструкцією робочого шару для полірування, форма обробленої деталі – увігнута ("яма"), форма інструменту – опукла ("горб"), неплосцинність обох не менше 7 мкм, що вказує на значне "послаблення" краю інструменту. Незадовільні результати експериментальної перевірки точності формоутворення оброблених поверхонь ОД і характеру зношування полірувального інструменту, конструкція якого виконана відповідно до розрахунку за формулою (6.12), дали підставу вважати припущення про сталість тиску в процесі полірування неспроможним.

При урахуванні розподілу тиску функцію розподілу коефіцієнта заповнення поверхні інструменту робочим шаром по колових зонах (при тих же граничних умовах) можна представити у вигляді (рис. 6.5, крива 2):

$$k_i(\rho) = \frac{1}{E(e_0 / \rho)} \quad (6.13)$$

Для дослідної перевірки був виготовлений інструмент із полірувальних елементів "Аквапол", розташованих на його поверхні відповідно до функції (6.13). Функцію $k_i(r)$ для даного випадку представлено на рис. 6.5 (залежність 3). Інструмент з такою конструкцією робочого шару випробовувався за вищеприписаних умов. Досліди показали, що точність форми полірованих плоских поверхонь оптичних деталей стабільна в часі й оцінюється величиною $N < 3$ інтерференційних кілець, що відповідає 2-му класу точності оптичних деталей.

Розглядаючи процес полірування плоскої поверхні для випадку, коли інструмент – нижня ланка, при зазначених припущеннях, для середньої відносної швидкості обертання інструменту і деталі можна записати вираз $\omega_2 r$, а для середнього тиску – співвідношення (6.3).

Урахувавши це і скориставшись граничними умовами: при $r = \frac{e_0}{4}$, $k_i = 1$ (робочий шар – суцільний), можна визначити функцію розподілу коефіцієнта заповнення поверхні інструменту робочим шаром по колових зонах r :

$$k_i(r) = \frac{4\varphi_k(r + e_0)}{5\pi r F(\varphi_k, k)} \quad (6.14)$$

Для $e_0 = 20$ мм, $R_1 = 160$ мм, $R_2 = 180$ мм функцію (6.14) наведено на рис. 6.6 (крива 1). Для експериментальної перевірки формули (6.14) використовувався інструмент із полірувальних елементів "Аквапол", розташованих на його поверхні відповідно до функції, апроксимація якої за формулою (6.14) зображена на рис. 6.6 (залежність 2).

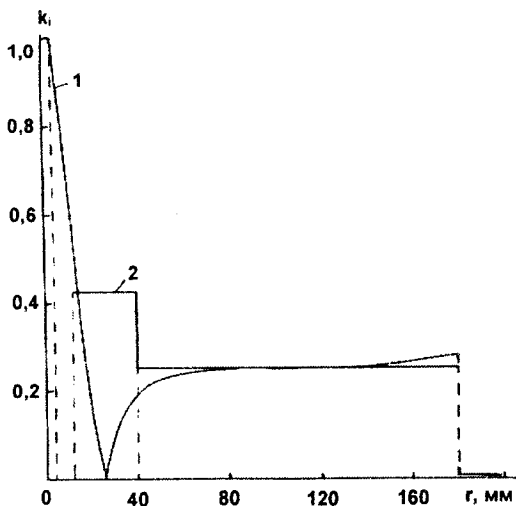


Рис. 6.6. Залежності коефіцієнта заповнення поверхні інструменту робочим шаром

У результаті випробовувань інструменту з такою конструкцією робочого шару було встановлено, що зношування його робочого шару відбувається рівномірно. Форма його поверхні практично не змінюється, що забезпечує високу і стабільну в часі точність формоутворення плоских оптичних поверхонь ($N = 3-5$ інтерференційних кілець).

Порівняння полірувальних інструментів з різною конструкцією робочого шару (відповідно до формул (6.13) і (6.14), а також концентричне розташування полірувальних елементів) за характером зношування інструменту і точністю формоутворення плоских оптичних поверхонь ілюструється табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Показники працездатності полірувальних інструментів з різною конструкцією робочого шару

Конструкція робочого шару	Коефіцієнт рівномірності зносу, σ	Відхилення від площинності обробленої поверхні, N , інтерференційних кілець
Згідно з (6.13)	0,08	< 3
Згідно з (6.14)	0,10	3-5
Робочий шар складається з елементів, розташованих по концентричних колах	0,56	> 10 мкм

Інструменти, робочий шар яких виконаний відповідно до вищеописаної методики, порівняно з інструментом, який традиційно застосовувався в минулому, володіють більш рівномірним зношуванням (коефіцієнт рівномірності зносу

σ для них у 5,6–7,0 разів менше, ніж для інструменту з концентричним розташуванням елементів).

Таким чином, при розробці конструкції полірувального інструменту необхідно враховувати вплив розподілу тиску по кругових зонах верхньої ланки на характер зміни форми поверхонь інструменту та деталі. Для заданих режимних і кінематичних параметрів процесу полірування завжди можна розрахувати конструкцію робочого шару інструменту, що забезпечує стабільну і високу точність формоутворення плоских оптичних поверхонь.

Описана методика розрахунку конструкції робочого шару інструменту (локального та інтегрального коефіцієнтів заповнення його поверхні робочим шаром), заснована на прийнятних припущеннях, яка враховує розподіл тиску і кінематичні параметри настроювання верстата, дозволяє виготовити інструмент для обох схем його розташування (зверху і знизу). Цей інструмент рівномірно зношується в процесі полірування і зберігає плоску форму робочої поверхні протягом тривалого часу, що є необхідною й достатньою умовою точного формоутворення плоских оптичних поверхонь.

6.3. Формоутворення сферичних поверхонь оптичних деталей

Очевидно, забезпечення високої точності формоутворення сферичних поверхонь оптичних деталей досягається завдяки виконанню умов, за яких радіус сферичної поверхні робочого шару інструменту не змінюється в часі.

Розглядаючи діаметральний переріз сферичної поверхні полірувального інструменту в полярній системі координат (рис. 6.7) і записуючи рівняння кола 1 у вигляді $\xi_1 = R = \text{const}$ (R – радіус сферичної поверхні), а рівняння кола 2, що описує твірну поверхні інструменту в процесі зносу, у системі координат XOY – у вигляді

$$x^2 + (y - a)^2 = \xi^2, \quad (6.15)$$

де $a = S_0$ – величина зносу в центрі інструменту, а також скориставшись перетворенням координат: $x = \xi \cos \varphi$, $y = \xi \sin \varphi$ з урахуванням того, що $a \ll R$ і полярний радіус не може бути від'ємним, (6.15) можна перетворити на такий вигляд:

$$\xi = a \sin \varphi + R \left(1 - \frac{a^2 \cos^2 \varphi}{2R^2} \right). \quad (6.16)$$

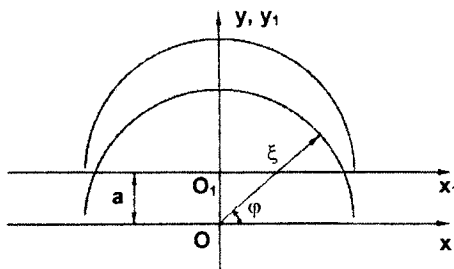


Рис. 6.7. Діаметральний переріз сферичної поверхні полірувального інструменту

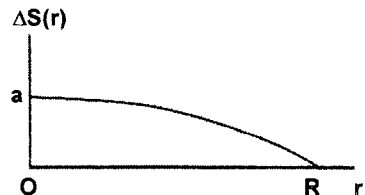


Рис. 6.8. Функція зносу сферичної поверхні інструменту по колових зонах

Тоді закономірність зношування інструменту по колових зонах, при яких радіус його сферичної поверхні не змінюється, визначається різницею $\Delta S(r) = \xi - \xi_1$. При введенні нової змінної $r = R \cos \varphi$ – радіуса колових зон інструменту, – для величини зносу інструменту по колових зонах одержимо вираз

$$\Delta S(r) = \frac{S_0 \sqrt{R^2 - r^2}}{R} \quad (6.17)$$

Графік функції (6.17) наведено на рис. 6.8. Із нього видно, що в процесі обробки сферичних поверхонь оптичних деталей тільки тоді забезпечується сталість радіуса кривини робочої поверхні інструменту, коли її зношування по колових зонах відбувається не рівномірно, а відповідно до виразу (6.17).

На рис. 6.9 наведено схему обробки сферичної поверхні. Для розв'язку задачі про характер зношування інструменту (верхня ланка) по колових зонах введемо сферичні координати, початок яких збігається з центром сферичної поверхні оброблюваної деталі (нижня ланка). Тоді координати точки M , що лежить у круговій зоні інструменту r , визначаються за допомогою виразу $M = M(R, \varphi, \vartheta)$ (R – радіус кривини сферичних поверхонь інструменту і деталі, φ – кут (довгота) у площині XOY , ϑ – кут (широта) у площині, перпендикулярній XOY).

Для розрахунку зносу інструменту по колових зонах радіусом r використовується рівняння (6.2) і припущення, які обґрунтовано в попередньому розділі.

Для знаходження величини відносної швидкості інструменту і деталі U значення вектора швидкості $\omega_1 R \sin \vartheta$ (рис. 6.9), що лежить завжди в горизонтальній площині і спрямований по дотичній до кола (кругової зони), потрібно усереднити за координатними змінними φ, ϑ і l (l – горизонтальна проекція відстані між центрами інструменту та деталі).

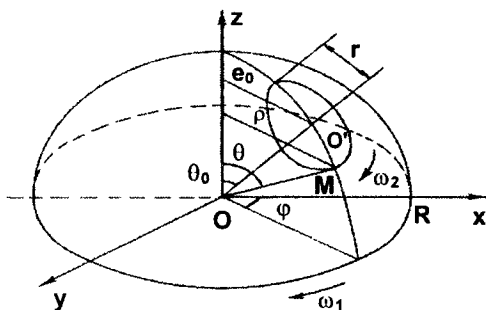


Рис. 6.9. Схема обробки сферичної поверхні оптичної деталі

Тоді можна одержати

$$U = \frac{1}{(\varphi_2 - \varphi_1)(\vartheta_2 - \vartheta_1)(l_2 - l_1)} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{l_1}^{l_2} dl \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \omega_1 R \sin \vartheta d\vartheta = \frac{e_0 \omega_1 r}{R \arcsin\left(\frac{r}{R}\right)} \quad (6.18)$$

де $\varphi_1, \varphi_2, l_1, l_2, \vartheta_1, \vartheta_2$ – межі, у яких змінюються відповідні координатні змінні, а

$$\vartheta_{2,1} = \vartheta_0 \pm \arcsin\left(\frac{r}{R}\right), \vartheta_0 = \arcsin\left(\frac{e_0}{R}\right).$$

Унаслідок аналізу двох можливих схем, що застосовуються зазвичай на використовуваному устаткуванні, – нормальної (верстати типу ШП) і радіальної (верстати типу LP-50 тощо), для знаходження величини тиску p_a для обох схем може бути використана формула

$$p_a(r) = c_1 \frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{R}, \quad (6.19)$$

у якій $c_1 = \text{const}$ має розмірність тиску.

Інтенсивність зносу робочого шару інструменту по кругових зонах радіусом r відповідно до прийнятих припущень з урахуванням граничних умов: при $r = 0$ (центр інструменту), $k_i(r = 0) = 1$ – визначається за формулою

$$\Delta S^p(r) = \frac{s_0 r \sqrt{R^2 - r^2}}{R^2 \arcsin\left(\frac{r}{R}\right)} \cdot k_i(r). \quad (6.20)$$

Для забезпечення високої точності формоутворення необхідно, щоб відношення $\Delta S^p(r)$ до $\Delta S(r)$ не залежало від r . Із цього випливає, що коефіцієнт заповнення поверхні інструменту робочим шаром має змінюватися по колових зонах відповідно до формули

$$k_i(r) = c_2 \frac{\arcsin\left(\frac{r}{R}\right)}{\frac{r}{R}}. \quad (6.21)$$

При цьому в процесі полірування форма сферичної поверхні інструменту буде мати незмінний радіус кривини, що забезпечить високу точність формоутворення оптичних поверхонь.

Із виразу (6.21) випливає, що для збільшення розмірної стійкості інструменту коефіцієнт заповнення має збільшуватись від центра до краю. Покладаючи, що на краю інструменту при $r = D/2$ (D – діаметр інструменту) робочий шар суцільний ($k_i = 1$), і визначаючи величину c_2 , для коефіцієнта заповнення можна одержати формулу

$$k_i(r) = \frac{D \arcsin\left(\frac{r}{R}\right)}{2r \arcsin\left(\frac{D}{2R}\right)}. \quad (6.22)$$

Графік функції (6.22) приведено на рис. 6.10 (крива 1).

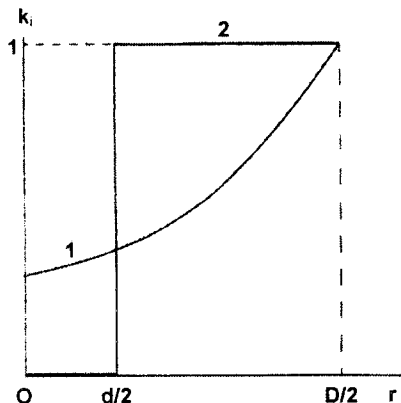


Рис. 6.10. Залежність коефіцієнта заповнення від радіуса колових зон

Виготовлення полірувального інструменту з розташуванням робочого шару на його поверхні відповідно до (6.22) виявляється складним, у зв'язку з чим використовується спрощений варіант конструкції з таким же значенням інтегрального коефіцієнта заповнення, відповідно до якого послаблення робочого шару в центрі (зменшення k_i) досягається за рахунок центрального отвору діаметром d . При цьому площа робочого шару залишається такою ж, змінюється лише вигляд кривої (рис. 6.10, крива 2). Площа робочого шару полірувального інструменту з конструкцією (6.22) визначається криволінійним інтегралом $S = \int_C 2\pi r k_i(r) dl$, де C – контур, що являє собою коло радіусом R , який збігається з твірною сферичної поверхні інструменту.

Враховуючи, що $dl = \frac{Rdr}{\sqrt{R^2 - r^2}}$, для площі S можна отримати вираз

$$S = \frac{\pi DR}{2} \arcsin\left(\frac{D}{2R}\right).$$

Площа робочого шару інструменту з центральним отвором (рис. 6.10, крива 2) визначається як різниця площ кульових сегментів із висотами:

$$h_1 = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad \text{і} \quad h_2 = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2}$$

за формулою $S = 2\pi R(h_1 - h_2)$.

Порівнюючи вказані площі, можна одержати вираз для діаметра центрального отвору d :

$$d = 2\sqrt{R^2 - \left[\frac{D}{4} \arcsin\left(\frac{D}{2R}\right) + \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}}\right]^2}. \quad (6.23)$$

Для інструменту, виготовленого у вигляді напівсфери, можна одержати спрощений вираз

$$d = 2R \sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{4}\right)^2}. \quad (6.24)$$

Для полірування лінз об'єктивів у виробництві використовуються саме такі інструменти зі зв'язаним полірувальним порошком у вигляді сферичних притирів із центральним отвором.

Для обробки чотирилінзового блоку з радіусом $R = 15$ мм використовується інструмент діаметром $D = 30$ мм (напівсфера) з робочим шаром товщиною 5 мм і діаметром центрального отвору $d = 18,5$ мм (розраховане значення за формулою (6.24) становить 18,6 мм).

Застосування інструментів, виготовлених у вигляді суцільних сферичних притирів з центральним отвором, дозволяє при поліруванні сферичних поверхонь оптичних деталей досягти точності $N = 3-5$ і $\Delta N \leq 0,3$ інтерференційних кілець.

Розглянемо тепер закономірності формоутворення ввігнутих сферичних поверхонь. Це потрібно у зв'язку з тим, що вищерозглянуті залежності, які виведені для випадку обробки опуклої сферичної поверхні, не можуть бути використані для розрахунку конструкції інструменту (коли інструмент – нижня ланка) і параметрів настроювання верстата при поліруванні ввігнутої оптичної поверхні через принципові відмінності у функціях розподілу тиску і швидкості.

Схему обробки ввігнутої сферичної поверхні при розташуванні полірувального інструменту знизу наведено на рис. 6.11. Для аналізу величини інтенсивності зносу $V(r)$ за коловими зонами (радіусом r) інструменту скористаємось рівнянням (6.1), у якому $L(r) = k_i(r)$ ($k_i(r)$ – коефіцієнт заповнення поверхні інструменту робочим шаром). З урахуванням того, що кутовою швидкістю обертання деталі можна знехтувати ($\omega_1 = 0$), середня відносна швидкість визначається як $U(r) = \omega_2 r$ (ω_2 – кутова швидкість обертання інструменту). Для того, щоб у процесі обробки сферичної поверхні оптичної деталі забезпечувалася сталість радіуса кривини робочої поверхні інструменту, необхідно, щоб вона зношувалася відповідно до виразу (6.17). За таких умов коефіцієнт заповнення поверхні інструменту робочим шаром має змінюватись відповідно до формули

$$k_i(r) = k_3 \frac{(R^2 - r^2)^{1/2}}{p_a(r)} \left(1 + \frac{U_0}{\omega_2 r}\right), \quad (6.25)$$

де k_3 – константа.

Для розподілу тиску p_a уздовж радіуса колових зон верхньої ланки ρ (у даному випадку – оброблюваної поверхні ОД) для обох можливих схем, що застосовуються в існуючому устаткуванні – нормальної (верстата типу ШП) і радіальної (верстата типу LP-50 та ін.), справедливою є формула (6.19) при заміні в ній $r \rightarrow \rho$. Декартові координати точки M , яка розташована на оброблюваній поверхні на колі радіусом r (рис. 6.11) можна записати у вигляді

$$X = r \cos \varphi, Y = r \sin \varphi, Z = R \cos \vartheta,$$

а координати точки K – центра оброблюваної поверхні ($\xi = OK$):

$$X_1 = \xi \sin \vartheta_0 \cos \varphi_0, Y_1 = \xi \sin \vartheta_0 \sin \varphi_0, Z_1 = \xi \cos \vartheta_0.$$

Із врахуванням того, що $\xi^2 = R^2 - \rho^2$, знаходимо

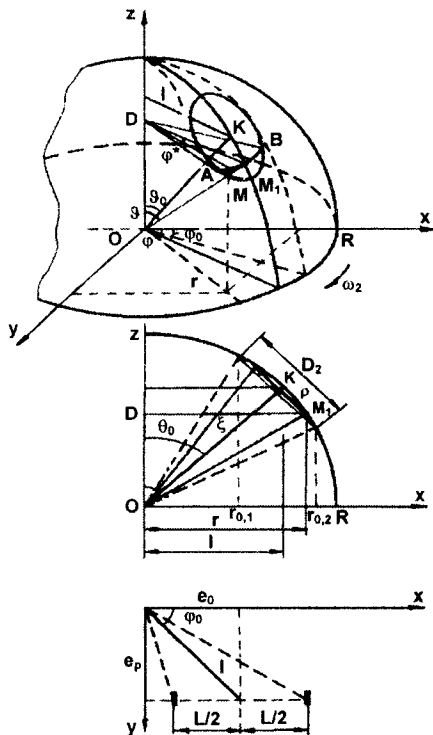


Рис. 6.11. Схема полірування вигнутої сферичної поверхні

$$\rho = \left[(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2 \right]^{1/2} =$$

$$= \left\{ R^2 - \left[r \sin \vartheta_0 (\cos \varphi_0 \cos \varphi + \sin \varphi_0 \sin \varphi) + (R^2 - r^2)^{1/2} \cos \vartheta_0 \right]^2 \right\}^{1/2}.$$

Тоді

$$p_a(r, \varphi, \vartheta_0) = k \left[r \sin \vartheta_0 (\cos \varphi_0 \cos \varphi + \sin \varphi_0 \sin \varphi) + (R^2 - r^2)^{1/2} \cos \vartheta_0 \right]. \quad (6.26)$$

Кут між осями інструменту та оброблюваної деталі (при її середньому положенні) дорівнює

$$\vartheta_0 = \arcsin \left[\frac{(e_0^2 + e_p^2)^{1/2}}{R} \right] \quad (6.27)$$

і змінюється при переміщенні "за штрихом" від $\vartheta_0^{(1)}$ до $\vartheta_0^{(2)}$:

$$\vartheta_0^{(2,1)} = \arcsin \left\{ \frac{\left[e_p^2 + (e_0 \pm L/2)^2 \right]^{1/2}}{R} \right\}. \quad (6.28)$$

Вважаючи, що $\varphi_0 = 0$, можна показати, що в межах діаметра деталі D_1 кут φ^* дорівнює

$$\varphi^* = \arccos \left\{ \frac{\left[\left(R^2 - D_1^2/4 \right)^{1/2} - \left(R^2 - r^2 \right)^{1/2} \cos \vartheta_0 \right]}{r \sin \vartheta_0} \right\} \quad (6.29)$$

Крім того, залежно від співвідношення діаметрів інструменту й деталі, а також коефіцієнта покриття, кут φ змінюється в межах від $-\varphi_1$ до φ_1 :

$$\varphi_1 = \begin{cases} \pi, r \leq r_{0,1}; \\ \varphi^*, r_{0,1} < r < r_{0,2}; \\ 0, r \geq r_{0,2} \end{cases} \quad (6.30)$$

а $r_{0,1}$ і $r_{0,2}$, які визначаються з умови дотику кіл із радіусами $r = r_0$ і $\rho = D_1/2$, становлять величини $r_{0(2,1)} = R \sin[\arcsin(D_1/2R) \pm \vartheta_0]$.

Усреднюючи (6.26) за кутом φ , можна отримати

$$P_a(r, \vartheta_0) = \frac{k_4}{\varphi_1} \int_0^{\varphi_1} p_a(r, \varphi, \vartheta_0) d\varphi = k_4 \left[\frac{r \sin \vartheta_0 \sin \varphi_1}{\varphi_1} + \left(R^2 - r^2 \right)^{1/2} \cos \vartheta_0 \right]$$

і вираз для коефіцієнта заповнення поверхні інструменту робочим шаром, при якому його радіус кривини не змінюється в процесі роботи:

$$k_i(r) = k_5 \cdot \left(R^2 - r^2 \right)^{1/2} \left(1 + \frac{U_0}{\omega_2 r} \right) \left[\frac{r \sin \vartheta_0 \sin \varphi_1}{\varphi_1} + \left(R^2 - r^2 \right)^{1/2} \cos \vartheta_0 \right]^{-1}. \quad (6.31)$$

Діаметр інструменту знаходять із умови збіжності краю інструменту з краєм деталі в середньому положенні (при $L = 0$) і визначають як $D_2 = 2r_{0,2}$. Довжину штриха визначають за умови того, що величина виходу верхньої ланки за край нижньої становить $2e_0$, згідно з виразом $L = \left[(3R/2)^2 - 4e_p^2 \right]^{1/2} - 2e_0$, або цю довжину вибирають як незалежний параметр настроювання поряд з e_0 і e_p .

Таким чином, вибрані коефіцієнт заповнення $k_i(r)$, діаметр інструменту D_2 та кінематичні параметри e_0 , e_p і L забезпечують у процесі полірування незмінну форму сферичної поверхні інструменту ("гриба") і стабільну точність формування ввігнутих поверхонь деталей.

Переходячи до аналізу конструкції інструменту і кінематичних параметрів настроювання верстата необхідно зазначити, що при обробці ввігнутих поверхонь існує два різних варіанти:

1) при обробці блоків оптичних деталей (до напівсфери) використовується інструмент, діаметр якого дещо відрізняється від діаметра блоку (обробка здійснюється "через центр");

2) при обробці оптичних деталей поодиноці, зокрема окулярних лінз, діаметр інструменту приблизно вдвічі більше діаметра деталі; обробка здійснюється з незначним віддаленням деталі за центр інструменту.

У першому випадку величина $r_{0,1}$ дорівнює половині й більше $D_2/2$, кут $\varphi_1 = \pi$ для всіх центральних зон інструменту, тобто його центр постійно перебуває в контакті з оброблюваною поверхнею. У другому випадку величина $r_{0,1}$, як правило, мала, тобто центр інструменту в постійному контакті з оброблюваною поверхнею не перебуває.

На рис. 6.12 наведено результати розрахунку коефіцієнта заповнення поверхні інструменту робочим шаром для першого випадку щодо процесу полірування блоку ОД діаметром $D_1 = 28$ мм (чотири лінзи діаметром 15 мм з радіусом кривини $R = 14,56$ мм) для різних значень e_0, e_p і L (при $\omega_2 = 50$ с⁻¹). Видно, що при зміщенні оброблюваної поверхні на край інструменту (при збільшенні e_0 і e_p) для забезпечення постійного значення радіуса кривини поверхні необхідно "послаблювати" його крайні зони або зменшувати діаметр. Іншими словами, при збільшенні e_0 і e_p центр інструменту взаємодіє з крайніми зонами блока ОД при більших значеннях відносної швидкості, більше зношується, а тому його (центр) потрібно "підсилити" (або послаблювати край).

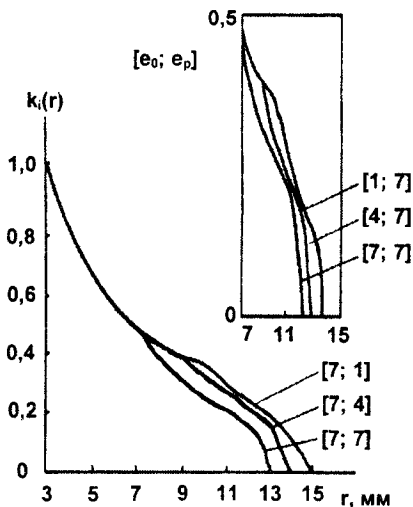


Рис. 6.12. Залежність $k_i(r)$ для різних комбінацій e_0 і e_p

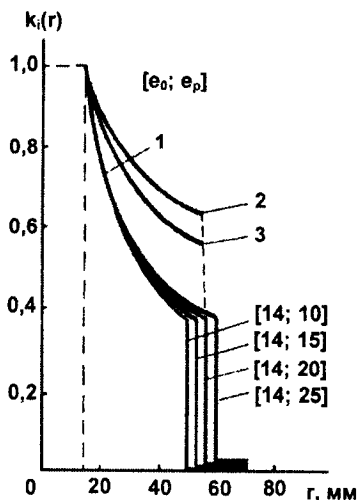


Рис. 6.13. Залежність $k_i(r)$ для різних e_0, e_p : 1 – $\omega_2 = 20$ с⁻¹; 2 – $\omega_2 = 65$ с⁻¹; 3 – $\omega_2 = 100$ с⁻¹;

Цей висновок підтверджується дослідними даними. Дійсно, при обробці ввігнутих сферичних оптичних поверхонь діаметр інструменту вибирають меншим

від діаметра оброблюваного блока і правлять його форму за допомогою "підрізання краю".

Для аналізу другого випадку розглянемо процес полірування окулярної лінзи діаметром 68 мм з рефракцією +3D (діоптрії) з радіусом кривини оброблюваної поверхні $R = 137,72$ мм. На рис. 6.13 наведено залежності $k_i(r)$ для різних значень e_p (при $e_0 = 14$ мм). Видно, що при зміщенні деталі за край інструменту, на відміну від попереднього випадку, для забезпечення постійної форми робочого шару інструменту необхідно підсилювати його крайні зони. На цьому ж рисунку наведено відповідні залежності (криві 1–3), які побудовані для різних значень ω_2 . Їх порівняння дає змогу зробити висновок про те, що при підвищенні частоти обертання інструменту необхідно збільшувати коефіцієнт заповнення робочим шаром його крайніх зон.

При використанні полірувального інструменту – диска діаметром 140 мм (з елементів "Аквалол" ЭП-1 діаметром 20 мм, розташованих по колових зонах згідно з табл. 6.2, у якій m і r_{0m} – номер і радіус зони, n кількість елементів у зоні) з коефіцієнтом заповнення, розрахованим за умови, що проекція діаметра елемента на напрямок r становить величину $d_r = d[1 - (r/R)^2]^{1/2}$, при всіх значеннях кінематичних параметрів настроювання цей інструмент буде зношуватись "на яму" (підсилений край, залежність $k_i(r)$, рис. 6.14, крива 1). При цьому на оброблюваній поверхні буде утворюватись "горб" (рис. 6.15, крива 1).

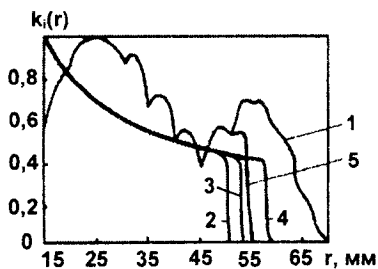


Рис. 6.14. Залежності $k_i(r)$:
експериментальні (1 – $\varnothing 140$ мм;
5 – $\varnothing 110$ мм) і теоретичні (2 – $e_p = 10$ мм;
3 – $e_p = 15$ мм; 4 – $e_p = 20$ мм)

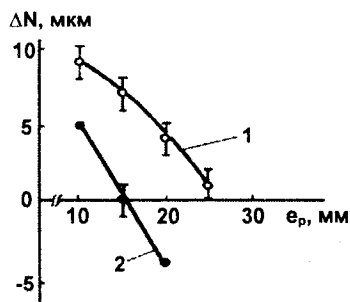


Рис. 6.15. Залежність відхилення форми ΔN від величини зміщення штриха: 1 – $\varnothing 140$ мм; 2 – $\varnothing 110$ мм

Таблиця 6.2

Конструкція робочого шару інструменту

m	1		2		3			4	5
r_{0m} , мм	20	25	30	35	40	45	50	55	60
n , шт.	3	3	3	3	2	2	2	6	6

Для підвищення точності формоутворення таких поверхонь потрібно послабити край інструменту (або зменшити його діаметр) і, тим самим, наблизити-

ти криву $k(r)$ до теоретичних залежностей (криві 2–4). Залежність коефіцієнта заповнення такого інструменту (діаметром 110 мм) від r наведено на рис. 6.14 (крива 5). Ця крива накладається на сімейство розрахованих кривих 2, 3 і 4.

Порівняння зазначених кривих дозволяє зробити висновок про те, що для збереження в часі форми робочої поверхні інструменту вказаної конструкції необхідно використовувати певне настроювання верстата (по зміщенню штриха $e_p = 15$ мм), оскільки крива 5 розташована найближче до кривої 3. При цьому відхилення форми обробленої поверхні від тієї, яка задана, мінімальне (рис. 6.15, крива 2). Більше того, із порівняння $k(r)$ з теоретичними залежностями 2 і 4 випливає, що такий інструмент при зменшенні зміщення штриха до $e_p = 10$ мм зношуватиметься на "яму" (край підсилений порівняно до умов, що відповідають кривій 2), а оброблювана деталь – на "горб", і навпаки, при збільшенні зміщення штриха до $e_p = 20$ мм зношуватиметься на "горб" (край послаблений порівняно до умов, що відповідають кривій 4), а оброблювана поверхня деталі – на "яму", що також узгоджується з дослідними даними (рис. 6.15, крива 2).

Таким чином, описана методика розрахунку конструкції робочого шару полірувального інструменту, кінематичних та режимних параметрів настроювання верстата дозволяє визначити умови, за яких полірування вигнутих оптичних поверхонь здійснюється із забезпеченням необхідної точності їх форми завдяки сталому радіусу кривини робочої поверхні інструменту.

6.4. Формоутворення циліндричних поверхонь оптичних деталей

Відомі інформаційні джерела в галузі технології виробництва оптичних деталей, крім незначних практичних рекомендацій, не містять результатів досліджень із механіки формоутворення зовнішніх циліндричних оптичних поверхонь.

Особливістю процесів алмазно-абразивної обробки таких деталей є забезпечення їх циліндричності, тобто мінімальних відхилень від закругленості і прямолінійності профілю поздовжнього перетину, обумовлених різницею між найбільшим і найменшим діаметрами у взаємно перпендикулярних напрямках поперечного і поздовжнього перетинів. Тому необхідною умовою забезпечення високої точності формоутворення таких поверхонь є виконання вимоги $Q(z, \varphi) = \text{const}$ (рис. 6.16).

Продуктивність полірування Q відповідно до формули (6.2) може бути описана в такий спосіб:

$$Q(z, \varphi) = k p_a(z, \varphi) U(z, \varphi) L_r(z, \varphi). \quad (6.32)$$

Увівши циліндричні координати $x = R \cos \varphi$, $y = R \sin \varphi$, $z = z$, і скориставшись функцією розподілу тиску, можна показати, що

$$p_a(z, \varphi) = \frac{P}{b l_k \sqrt{z^2 + R^2 \sin^2 \varphi}}, \quad (6.33)$$

де b – довжина дуги контакту інструменту та оброблюваної деталі, R – радіус циліндричної поверхні.

Довжина контакту в напрямку твірної циліндричної поверхні l_k може бути визначена через довжину перекриття інструменту і деталі l_n , і коефіцієнт заповнення поверхні інструменту робочим шаром $k_i(z, \varphi)$ за формулою $l_k = l_n k_i$, в якій l_n визначається функцією (рис. 6.16, б):

$$l_n = \begin{cases} \frac{L_2}{2}, & l \leq \frac{L_1 - L_2}{2} \\ \frac{L_1 - l}{2}, & \frac{L_1 - L_2}{2} < l \leq \frac{L_1}{2} \end{cases} \quad (6.34)$$

де L_1 і L_2 – довжини оброблюваної деталі й інструменту відповідно.

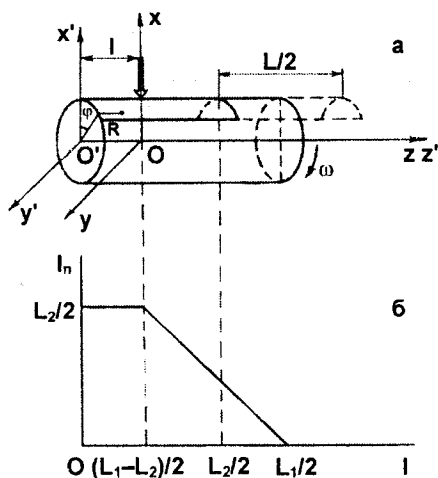


Рис. 6.16. Схема обробки циліндричної поверхні

Враховуючи, що відносна швидкість переміщення деталі та інструменту $U = \omega R$ не залежить від z і φ (ω – кутова швидкість обертання деталі), а шлях тертя L_f може бути визначений як добуток l_k на функцію

$$n(z) = \begin{cases} 1, & z < L_2/2 \\ 0, & z \geq L_2/2 \end{cases}$$

з рівняння (6.32) випливає, що добуток функцій $p_a(r, \varphi)$ і $n(z)$ не повинен залежати від φ і z , тобто $p_a(z, \varphi) \cdot n(z) = \text{const}$.

Оскільки величина тиску змінюється при переміщенні інструменту по оброблюваній деталі (при зміні l від 0 до $L/2$, L – довжина штриха), його необхідно усереднити за l :

$$p_a(z, \varphi)_{cp} = \frac{2P}{hL \cdot k_l(z, \varphi) \cdot \sqrt{z^2 + R^2 \sin^2 \varphi}} \left[\frac{L_1}{L_2} - 1 + \ln\left(\frac{L_2}{L}\right) \right]. \quad (6.35)$$

Крім того, завдяки осьовій симетрії залежності $p_a(\varphi)$ і $k_l(\varphi)$ є несуттєвими, оскільки незалежно від їх вигляду з оброблюваної деталі при обертанні буде зніматися матеріал з продуктивністю, яка не залежить від φ . У зв'язку з цим, функцію розподілу тиску усереднюють за значеннями кута φ , причому як межі

інтервалу беруть $\left[0, \frac{\pi}{2}\right]$. У реальних умовах максимальне значення кута

$\varphi_{\max} \leq \frac{\pi}{2}$ і визначається величиною довжини дуги контакту інструменту та оброблюваної деталі h .

Таке розширення меж зміни кута φ не вносить додаткових похибок у визначення величини коефіцієнта заповнення $k_l(z)$ і приймається для спрощення розрахунків.

З урахуванням того, що

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{z^2 + R^2 \sin^2 \varphi}} = \frac{K(k)}{\sqrt{R^2 + z^2}},$$

де $K(k)$ – повний еліптичний інтеграл 1-го роду, $k = \frac{R}{\sqrt{R^2 + z^2}}$ – модуль інтеграла, можна показати, що для коефіцієнта заповнення поверхні інструменту робочим шаром у напрямку координати z справедлива формула

$$k_l(z) = \frac{\text{const} \cdot K(k)}{\sqrt{z^2 + R^2}} \left[\frac{L_1}{L_2} - 1 + \ln\left(\frac{L_2}{L}\right) \right] \cdot n(z). \quad (6.36)$$

Для процесу полірування зовнішньої циліндричної поверхні оптичних носіїв інформації зі скла: трубок діаметром 9 мм і довжиною 45 мм розраховують згідно з залежністю (6.36) коефіцієнт заповнення і використовують інструмент у вигляді притира довжиною 40 мм із суцільним робочим шаром (рис. 6.17, пряма 2). Ця пряма відповідає співвідношенню: $k_l(z) = A$, в якому величина A визначається за умови рівності площ під кривими згідно з формулою

$$A = \frac{z_2 - z_1}{z_2} \int_{z_1}^{z_2} k_l^*(z) dz,$$

у якій $k_i^*(z)$ – є нормованою на одиницю функцією (крива 1, рис. 6.17), а $z_1 = 4$ мм, $z_2 = 20$ мм – координати. Порівняння функцій, які описуються кривою 1 і прямою 2, показує, що зазначений інструмент, коефіцієнт заповнення якого в центрі і на краях збільшено, а в середніх зонах ($4 \text{ мм} < z < 14 \text{ мм}$) зменшено відносно розрахованого, у процесі полірування зношуватиметься в центрі і на краях менше, а в середніх зонах більше, утворюючи сідлоподібну форму обробленої поверхні.

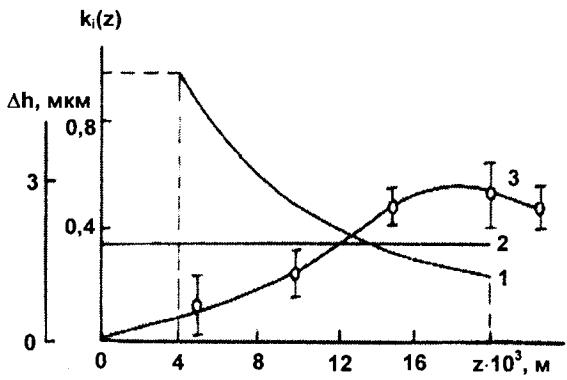


Рис. 6.17. Залежності коефіцієнта заповнення поверхні інструменту робочим шаром $k_i(z), k_i^*(z)$ і відхилення від прямолінійності твірної циліндричної поверхні $\Delta h(z)$

Така форма оброблених поверхонь і спостерігається на практиці. Відхилення від прямолінійності твірної циліндричної поверхні $\Delta h(z)$ (рис. 6.17, крива 3) при цьому не перевищує 3 мкм, що задовольняє вимоги, які висуваються до оптичних носіїв інформації зі скла.

Розділ 7

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ОПТИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

7.1. Технологічні процеси обробки типових оптичних деталей

До типових оптичних деталей відносять плоскопаралельні пластини, лінзи та призми. Технологічні процеси обробки таких деталей включають одні й ті самі операції механічної обробки, але методи їх реалізації різні. Спільними для вказаних технологічних процесів є допоміжні операції, пов'язані з базуванням, установкою та розбиранням блоків ОД.

Кожна операція механічної обробки (різання, свердління, грубе, тонке і надтонке шліфування, полірування) виконується за умов, коли заготовка ОД певним чином зорієнтована в просторі відносно положення інструменту, пристрою й верстата. Похибки форми і взаємного розташування ОП визначаються не тільки похибками, які виникають у процесі їх формування, а й похибками установки, які виникають при встановленні ОД (похибки базування, закріплення, похибки пристрою, похибки закріплення ОД чи блоку на верстаті тощо).

Точність установки заготовок на пристрої залежить від методу її закріплення. До цього часу в оптичній технології для закріплення заготовок ОД використовуються методи, які базуються на дії сил тертя, міжмолекулярної взаємодії чи капілярного натягу.

Закріплення заготовки механічним затискуванням здійснюється за допомогою лещат, цангових патронів та аналогічних пристроїв. Цей метод закріплення заготовок ОД використовується в операціях грубої обробки, оскільки внаслідок напружень і деформацій при затискуванні деталі похибки взаємного розташування ОП і лінійних розмірів ОД можуть перевищити 3 кутових хвилини і 50 мкм відповідно.

Закріплення заготовки приклеюванням здійснюється за допомогою речовин і хімічних сполук, які мають високу адгезію до матеріалів ОД і пристрою, не вносять суттєвих похибок базування при установці, не призводять до деформації заготовки при зміні агрегатного стану, не вступають у хімічну взаємодію з матеріалом заготовки. Для закріплення заготовок ОД часто використовуються термопластичні матеріали (смоли, парафіни, віск для приклеювання, шелак, сплави металів з низькою температурою плавлення) і речовини, що сублімують.

Смоли для приклеювання – це сплави, до складу яких входять такі компоненти:

- ✓ *каніфоль* (продукт переробки живиці, температура розм'якшення якої становить 65–80° С, розчиняється в ацетоні, етанолі, ефірі, бензині);
- ✓ *пек сосновий* (продукт переробки деревини з великим вмістом смоли, температура розм'якшення якої становить 45–60° С, розчиняється в ацетоні, бензині);

- ✓ *парафін нафтовий* (температура плавлення $T_{пл} = 38-65^{\circ}\text{C}$, стійкий до дії лугів і кислот);
- ✓ *бітум* (асфальтосмолиста речовина, продукт переробки важких нафтових залишків, температура розм'якшення якого $60-90^{\circ}\text{C}$);
- ✓ *віск бджолиний* (продукт плавлення вошини, температура плавлення $T_{пл} = 38-50^{\circ}\text{C}$, стійкий до дії кислот, розчиняється в ацетоні і бензині);
- ✓ *шелак* (природна смола, продукт біологічної діяльності тропічних комах, температура плавлення $T_{пл} = 45-70^{\circ}\text{C}$, розчиняється в лугах, етанолі).

Парафіни для приклеювання – це сплави парафіну (15–20 %) із воском (80–85 %) із додаванням каніфолі (0–50 %).

Віск для приклеювання – сплави каніфолі (80–90 %) з воском (10–20 %).

Найчастіше зі сплавів металів з низькою температурою плавлення ($60-90^{\circ}\text{C}$) використовується сплав Вуда (вісмут-53%, олово-20%, свинець-15%, кадмій-12%) з температурою плавлення $60,5^{\circ}\text{C}$.

Речовини, що сублімують, зокрема, суміш алкіновмісних фреонів, переходять у твердий стан при $60-70^{\circ}\text{C}$, при нагріванні до температури $120-130^{\circ}\text{C}$ стають летючими сполуками.

Установлення заготовок кріпленням методом приклеювання відрізняється простотою, але через значні похибки встановлювання обумовлює таку точність оброблених оптичних поверхонь, яка не перевищує точність заготовки перед приклеюванням.

Закріплення заготовки гіпсовим розчином, який згодом твердіє, використовується при обробці поверхонь призм. Суть цього методу полягає в тому, що на поверхні притира (установлювальній поверхні) встановлюються заготовки на оброблювані поверхні, а вільний простір між заготовками й корпусом заповнюється розчином гіпсу, який після затвердіння фіксує заготовки саме в цьому положенні.

Закріплення заготовки за допомогою сил міжмолекулярної взаємодії (оптичний контакт) базується на використанні ефекту притягання Ван дер Ваальса поверхонь з малою шорсткістю, які збігаються за формою. Цей метод забезпечує найбільшу точність базування. Його використовують при виготовленні пластин і призм з високими вимогами до точності форми і взаємного розташування ОП.

Закріплення заготовки за рахунок дії сил капілярного натягу рідини засноване на тому, що установлювальний елемент пристрою (виконаний з поруватого матеріалу) просочують рідиною з великим коефіцієнтом поверхневого натягу, яка обумовлює притягання поверхонь заготовки та установлювального елемента. Використовується цей метод при тонкому шліфуванні й поліруванні точних поверхонь пластин та призм.

Закріплення заготовки проморожуванням полягає в тому, що установлювальний елемент пристрою (виконаний із поруватого матеріалу) просочують водою, яку після базування заготовок охолоджують до замерзання. Метод використовується при тонкому шліфуванні та поліруванні точних поверхонь пластин і призм з оптичних матеріалів, при обробці яких неможливо застосувати інші методи закріплення через їх поруватість чи неможливість нагрівання тощо.

Закріплення заготовки вакуумним притискуванням обумовлено силами, які виникають при відкачуванні повітря з об'єму простору між поверхнями заготовки та установлювального елемента пристрою. Цей метод використовується

на грубих операціях обробки великогабаритних ОД, оскільки похибки форми поверхонь, які виникають при деформаціях, значні.

Закріплення заготовок пластин, лінз, призм (збирання блоку) за допомогою описаних методів є першою операцією у більшості варіантів технологічних процесів. Після неї ідуть різні операції механічної обробки ОД, в проміжках між якими і після останньої (полірування) поряд зі збиранням блоків здійснюються розбирання блоків, промивання заготовок, нанесення захисних лаків на поліровані поверхні, очищення і протирання полірованих поверхонь.

Розбирання блоків здійснюється залежно від методу закріплення заготовок на пристроях. У випадку закріплення заготовок приклеюванням розбирання блоку виконується при охолодженні його до температури $-(30-50)^{\circ}\text{C}$, при якій внаслідок великої різниці коефіцієнтів лінійного розширення смол для приклеювання $((6-10)\cdot 10^{-3}\text{ град}^{-1})$ і більшості оптичних матеріалів $((6-10)\cdot 10^{-7}\text{ град}^{-1})$ з'єднання руйнується і заготовки відокремлюються від пристрою. Другий метод розбирання блоку полягає в тому, що його занурюють у рідину, яка здійснює ультразвукові коливання. Звукові хвилі (з частотою 20 кГц), які виникають під дією випромінювачів, вмонтованих у стінки та дно спеціальної посудини, обумовлюють виникнення ударних хвиль з великим локальним тиском, завдяки яким заготовки відокремлюються від пристрою. При використанні третього методу руйнування з'єднання заготовок з пристроєм відбувається при ультразвукових коливаннях самого блоку внаслідок різних частот вимушених і власних коливань пристрою, смоли для приклеювання і матеріалу оптичної деталі.

У випадку закріплення заготовок за допомогою сил міжмолекулярної взаємодії (оптичного контакту) розбирання блоку відбувається під дією на кожну окрему заготовку локального нагріву або охолодження (унаслідок температурних деформацій і руйнується з'єднання заготовка-пристрій). Другий спосіб руйнування з'єднання заготовка-пристрій базується на розклинювальній дії рідини, яка через канали в установлювальному елементі пристрою під тиском подається в зону контакту поверхонь заготовки і пристрою. Третій спосіб заснований на ультразвукових коливаннях рідини й описаний вище для випадку закріплення заготовок приклеюванням.

Нанесення захисних лаків на поліровані поверхні має на меті їх захист від пошкоджень при механічній обробці інших поверхонь заготовки. Залежно від методу закріплення заготовки, матеріалу ОД і операції механічної обробки використовуються різні типи лаку (цапон-лак, бітумний лак, фторорганічний лак Ф-32Л, нітроемалі НЦ на основі нітроцелюлози, матові емалі ХС і ПФ тощо).

Промивання заготовок необхідне для того, щоб видалити з поверхонь забруднення, розчинити залишки смол для приклеювання і захисних лаків. Здійснюється промивання за допомогою різних рідин, які використовуються залежно від стадії процесу механічної обробки. Після операцій грубого, тонкого і надтонкого шліфування, а також полірування чи суспензією, чи інструментом зі зв'язаним полірувальним порошком, використовується вода. Після розбирання блоків, які пройшли операції шліфування, для видалення смол для приклеювання використовуються розчини лугів NaOH і KOH 5–10 % концентрації, які добре розчинюють віск, парафін тощо. Для розчинення смол для приклеювання та захисних лаків на полірованих поверхнях застосовуються органічні розчинники (ацетон, бензин, етанол та їх суміші). Для промивання полірованих поверхонь використовується 1 % розчин SnCl_2 у концентрованій соляній кислоті.

Очищення полірованих поверхонь оптичних деталей здійснюється за допомогою різних розчинників (ефір етиловий, спирт етиловий ректифікат, претолейний ефір та їх суміші).

Протирання полірованих поверхонь промитих оптичних деталей виконується серветками з м'яких тканин (батист, фланель), а також гіроскопічною ватою.

7.1.1. Технологічний процес виготовлення плоскопаралельних пластин

При виготовленні пластин із пресованих заготовок технологічний процес містить у собі такі операції (рис. 7.1): збирання блоку, грубе шліфування першої поверхні, розбирання блоку, збирання блоку, грубе шліфування другої поверхні, розбирання блоку, промивання заготовок, збирання заготовок у стовпчики для обробки за периметром, обробка за периметром, розбирання стовпчиків, промивання заготовок, нанесення фасок, збирання блоку, тонке шліфування першої поверхні, надтонке шліфування першої поверхні, полірування першої поверхні, нанесення захисного лаку на поліровану поверхню, розбирання блоку, промивання заготовок, збирання блоку, тонке шліфування другої поверхні, надтонке шліфування другої поверхні, полірування другої поверхні, розбирання блоку, промивання заготовок.



Рис. 7.1. Схема технологічного процесу виготовлення плоскопаралельних пластин

Шліфування поверхонь пластин (грубе, тонке і надтонке) виконується за допомогою алмазних інструментів. Якщо відносна товщина заготовок (відношення товщини до діаметра) менше 0,1, то для грубого шліфування використовується інструмент з алмазних порошоків зернистістю не більше 80/63. Обробка пластин за діаметром (периметром) та нанесення фасок на ребра пластин виконуються на круглошліфувальних або фрезерних верстатах алмазними інструментами різних форм. Тонке шліфування здійснюється на верстатах типу ШП методом притирання в 1-2 переходи залежно від вимог до конкретного виду плоскопаралельних пластин. Зернистість алмазних порошоків в інструментах має бути в межах від 40/28 до 10/7. Надтонке алмазне шліфування здійснюється інструментом із алмазних порошоків зернистістю від 10/7 до 5/3. Полірування поверхонь пластин виконується за допомогою інструментів зі зв'язаним полірувальним порошком типу "Аквапол" або традиційними методами за допомогою полірувальних порошоків (поліриту, оксиду церію тощо) у вільному стані на пекоканіфольних полірувальниках.

Інструменти для тонкого і надтонкого шліфування і полірувальний інструмент для обробки поверхонь пластин виконуються у вигляді планшайб, робочий шар яких складається з окремих, дискретно розташованих елементів: алмазних таблеток АТБ діаметром 6, 8, 10, 14 мм і висотою 3 і 5 мм, або полірувальних елементів "Аквапол" ЕП-1 діаметром 10, 15, 20 мм і висотою 5, 10 мм.

Якщо за технологічним процесом передбачено полірування поверхонь пластин за допомогою полірувальних порошоків у вільному стані на пекоканіфольних полірувальниках, а вимоги за точністю формоутворення перевищують $N = 0,3-0,5$, то додатково вводиться операція доводки ОП деталей у сепараторах (дисках зі скла з отворами для пластин).

7.1.2. Технологічний процес виготовлення лінз

Технологічний процес виготовлення лінз включає операції механічної обробки виконавчих поверхонь, а також операції центрування (для забезпечення збіжності геометричної осі з оптичною віссю лінзи) і зняття фасок. Залежно від масштабів виробництва, використовуються два варіанти технологічного процесу. Для невеликих оптичних виробництв властиво оброблювати лінзи з використанням двох встановлювань. При першому виконується грубе шліфування, при другому – тонке, надтонке шліфування та полірування. Закріплення заготовок лінз у цьому випадку здійснюється приклеюванням товстим шаром смоли (еластичний метод блокування ОД). Для багатосерійного виробництва лінз властивою є обробка поверхонь з використанням одного встановлювання. У цьому випадку базування заготовок забезпечується закріпленням на підкладинки з тканини, яка просочена смолою для приклеювання (жорсткий метод блокування ОД).

Згадані варіанти технологічного процесу обробки лінз відрізняються лише тим, що операції грубого шліфування першої та другої поверхонь за першим варіантом виконуються послідовно одна за одною, а за другим варіантом – рознесені в часі. На рис. 7.2. наведено загальну схему (для обох варіантів) технологічного процесу виготовлення лінз із пресованої заготовки.

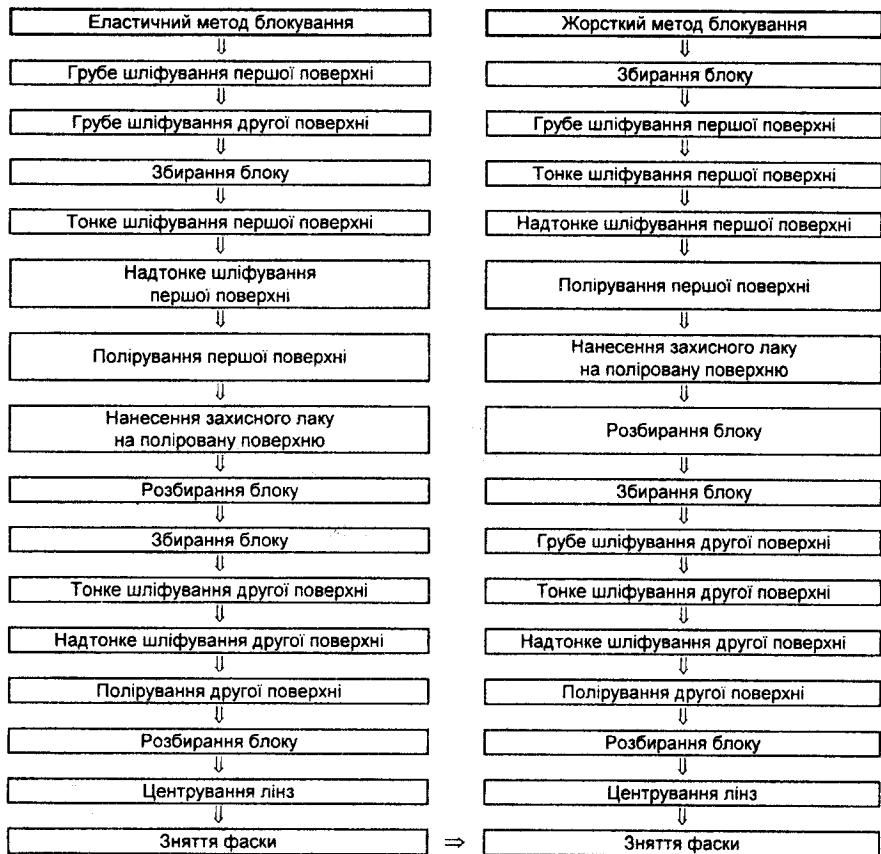


Рис. 7.2. Схема технологічного процесу виготовлення лінз

Грубе шліфування сферичних поверхонь лінз виконується за допомогою алмазного інструменту типу 12A2 за методом жорстких осей на верстатах типу "Алмаз". Операції тонкого й надтонкого алмазного шліфування та полірування виконуються за методом притирання на верстатах типу ШП інструментами – сферичними притирами. Сферичні притири для виконання вказаних операцій механічної обробки, як і планшайби для обробки плоских поверхонь пластин, складаються з окремих елементів АТ6 і ЕП-1. Сферичні притири для полірування лінз невеликих розмірів виконуються суцільними з центральним отвором у вигляді елементів "Аквапол" ЕП-2 різних діаметрів і радіусів кривини.

При поліруванні лінз з оптичних матеріалів, які не можуть бути відполірованими за допомогою описаних методів, застосовуються інші полірувальні порошки (алмазні субмікропорошки, оксид хрому, оксид заліза, оксид торію, чистий оксид церію тощо) у вигляді суспензій на полірувальниках з некоканіфольної смоли.

Заключними операціями технологічного процесу виготовлення лінз є операції центрування та зняття фасок.

7.1.3. Технологічний процес виготовлення призм

Найбільшого поширення у використанні (в оптичних приладах і системах) набули призми типу AP-90°. На прикладі саме цих ОД найпростіше скласти уявлення про технологічний процес виготовлення призм.

Технологічні процеси виготовлення призм складаються з операцій механічної обробки виконавчих і допоміжних поверхонь. Як правило, обробку призм починають з допоміжних граней, які після обробки використовуються як установлювальні бази для виконання наступних операцій обробки. Ці грані обробляються на верстатах для двобічної обробки двома однаковими інструментами при закріпленні призм у спеціальних сепараторах. Їх обробку виконують за кілька переходів алмазними шліфувальними інструментами з різною зернистістю алмазних порошків.

При обробці виконавчих (відбивальних і заломлювальних) поверхонь призм поряд з високими вимогами до точності їх форми надзвичайно важливими є вимоги до точності взаємного розташування поверхонь. Для їх обробки використовуються кілька схем побудови технологічних процесів виготовлення призм, які відрізняються способами установки заготовок на пристроях і кількістю змін установлювальних баз.

При обробці поверхонь з використанням одного встановлювання заготовки після збирання у стовпчик, зорієнтований на верстаті таким чином, що його вісь перпендикулярна осі обертання інструменту типу 12A2, подаються в напрямку інструменту на відстань, величина якої запрограмована для кожної грані. При реалізації цієї схеми використовуються одні й ті самі технологічні бази, але в різних позиціях.

Обробка поверхонь при зміні установлювальних баз може відбуватись за схемами, які визначаються способами встановлення заготовок. При закріпленні заготовок за допомогою розчинів, що твердіють, унаслідок того, що оброблювана поверхня зорієнтована в просторі щодо поверхні інструменту, а не інших її граней, точність взаємного розташування поверхонь призми не перевищує 5-6 кутових хвилин.

При закріпленні заготовок на проміжний установлювальний елемент похибки взаємного розташування поверхонь залежать від паралельності оброблюваної поверхні і відповідного елемента пристрою, який фактично є допоміжною вимірювальною базою. Два найбільш поширені варіанти установки заготовок "зі зміною установлювальних баз" відрізняються конструкціями пристроїв і методами закріплення заготовок. При використанні цих варіантів установки технологічний процес виготовлення призм характеризується як різним рівнем точності форми поверхонь і їх взаємним розташуванням, так і продуктивністю процесу обробки.

При використанні першого варіанта спочатку обробляють гіпотенузні грані. При цьому встановлення заготовок 1 виконують "за чорною базою" (рис. 7.3), використовуючи пристрій 2, який має пази, в яких розташовують заготовки, приклеєні на необроблені або шліфовані грані. Для зменшення пірамідальності призм заготовки закріплюють у пазах стовпчиками. При обробці катетних граней заготовки 1 базують і закріплюють на проміжному установлювальному елементі 2, який являє собою зрізаний під кутом 45° металевий брус, надійно з'єднаний з основою 3 (рис. 7.4). Після обробки перших катетних граней бруси вивільняють, повертають на 90° і знову закріплюють на основі, забезпечуючи

можливість обробки інших катетних граней. При кожній установці контролюється площинність оброблюваної поверхні та її паралельність щодо допоміжної вимірювальної бази. Похибки взаємного розташування поверхонь призм визначаються похибками установки і зміни установлювальних баз.

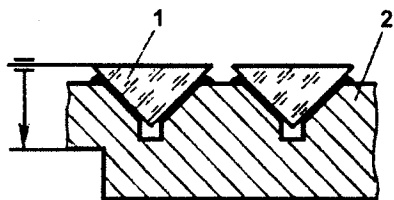


Рис. 7.3. Установка заготовок за "чорною базою"

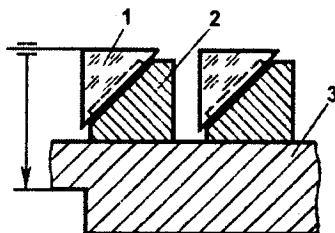


Рис. 7.4. Установка заготовок за проміжним установлювальним елементом

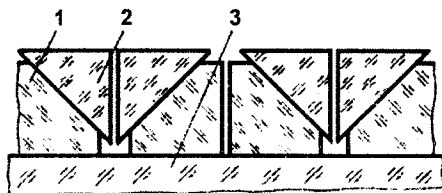


Рис. 7.5. Установка заготовок на оптичний контакт

З використанням другого варіанта обробки поверхні гіпотенузні грані призм обробляються при установці заготовок так само, як і в першому. Для обробки катетних граней призм 2 використовується пристрій 1, лінійні розміри, форма і взаємне розташування елементів якого виконані з такою точністю й шорсткістю, які забезпечують можливість закріплення на ньому заготовок за рахунок сил міжмолекулярної взаємодії (рис. 7.5).

Висока точність пристрою, незначні похибки установки і можливість застосування оптичних методів контролю паралельності оброблюваної поверхні щодо допоміжної вимірювальної бази забезпечують точність взаємного розташування виконавчих поверхонь призм 1–5 кутових секунд.

7.2. Обробка поверхонь специфічних оптичних деталей

До специфічних оптичних деталей відносять деталі, які відрізняються від типових більш складною технологією виготовлення (пробне скло, деталі у вигляді кулі (кулеподібні лінзи), багатогранні призми, деталі з асферичними поверхнями, великогабаритні ОД тощо), матеріалом, з якого виготовлені (оптичні кристали, в т.ч. водорозчинні, оптична кераміка, полімерні оптичні матеріали), особливою конструкцією і призначенням (волоконна оптика, деталі оптичних квантових генераторів (ОКГ), деталі інфрачервоної (ІЧ) техніки).

7.2.1. Оптичні деталі зі скла

Пробне скло – оптичний калібр, зразок, призначений для зберігання і перевірки радіусів кривини плоских і сферичних оптичних поверхонь інтерференційним методом.

Існують основні пробні стекла ОПС для зберігання і передачі вторинним еталонам. КПС – контрольні пробні стекла служать для перевірки робочих пробних стекел РПС, які використовуються для контролю ОД. Виготовляються ці пробні стекла з оптичного скла марок ЛК5, ЛК7 і кварцового скла марок КВ, КУ-1, КУ-2 тощо.

Діаметри пробного скла: ОПС – 1–130 мм, КПС і РПС – до 220 мм (рис. 7.6). ОПС виготовляються парами, які складаються з опуклого (+) та увігнутого (-) калібрів, які спряжені своїми вимірювальними поверхнями. Виконавчі поверхні ОПС з радіусом кривини від 0,5 до 37,5 мм шліфуються на шліфувально-полірувальних верстатах типу ШП "вручну" при використанні абразивних суспензій на чавунних і латунних шліфувальниках.

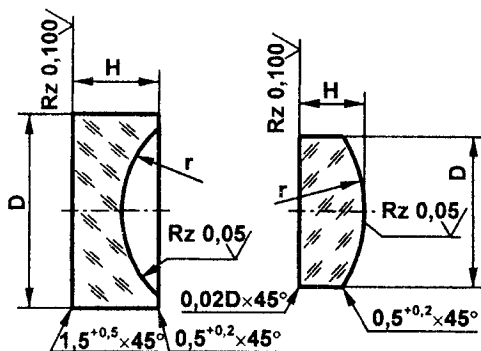


Рис. 7.6. Увігнуте та опукле пробні стекла

Потрібного значення радіуса кривини оброблюваних поверхонь досягають шляхом поступової його зміни, яка є наслідком зміни кривини робочої поверхні шліфувальника. Полірування робочих поверхонь пари ОПС здійснюється за допомогою полірувальних порошоків у вільному стані на полірувальниках з леко-каніфольної смоли при постійному контролі локальних ("місцевих") похибок їх форми (при накладанні опуклої та увігнутої поверхонь одна на одну).

Обробка ОПС з радіусом кривини $R > 37,5$ мм відбувається за дещо іншою технологією. Тонке шліфування заготовок виконується за схемою "скло по склу": одна заготовка – нижня ланка, друга – верхня ланка. Почерговою зміною положення заготовок (зверху – знизу) досягають керованої зміни радіусів кривини їх поверхонь. Полірування заготовок виконується в два етапи. На першому виконується попереднє полірування обох ОПС і контроль точності їх спряження. Половина вимірної похибки усувається наступним поліруванням однієї з поверхонь. При цьому як пробне скло використовується друга поверхня. Потім навпаки: друга половина похибки спряження усувається поліруван-

ням другої поверхні при її контролі за допомогою першої, яка виконує функцію пробного скла.

Обробка виконавчих поверхонь КПС і РПС здійснюється за звичайною технологією при обов'язковому контролі ОПС або за допомогою інтерферометра.

Кулеподібні лінзи – спеціальні ОД, які являють собою частину кулі з відносною товщиною (відношенням товщини до діаметра) 0,4–0,65 (рис. 7.7), оброблюються за особливою технологією.

Технологічний процес обробки таких деталей засновано на тому, що закріплення заготовок не передбачається. Обробка заготовок на операціях грубого й тонкого шліфування та полірування відбувається методом обкатування. Грубе шліфування заготовок (кубиків) на спеціальному верстаті надає їм попередню форму кулі. Формування правильної геометричної форми і забезпечення потрібних розмірів кульок здійснюється за допомогою сепаратора, який розташований між двома планшайбами, що обертаються в зустрічних напрямках.

Шліфування кульок здійснюється на планетарних верстатах за допомогою спеціальних конструкцій інструменту та пристроїв, які забезпечують їх рівномірну обробку. Полірування кульок відбувається за допомогою двох полірувальників, на поверхні яких прорізани канавки глибиною 0,25 діаметра кульки, при використанні суспензії поліриту за два технологічні переходи. Після першого переходу всі кульки розподіляються за діаметром (через 0,1 мкм), а після другого – контролюється їх діаметр з похибкою – 0,01 % від діаметра кульки. Така точність вимірювання діаметра, а відповідно і радіуса кривини майбутньої лінзи, забезпечує надійність контролю її форми та усуває необхідність використання пробного скла.

Багатогранні призми використовуються в пристроях сканування, в апаратурі для швидкісної кінозйомки, у приладах для вимірювання кутів. Високі вимоги до точності плоских граней призм та їх взаємного розташування зумовлюють великі складнощі технологічних процесів їх виготовлення. Першою операцією їх обробки є обробка допоміжних бічних поверхонь, які в подальшому використовуються для закріплення заготовок у стовпчики. Потім за допомогою спеціальних пристроїв проводять грубе алмазне шліфування граней кругами форми 12А2. Тонке шліфування й полірування граней виконується за умови примусового виправлення (корегування) форми поверхонь інструментів.

Оптичні деталі з асферичними поверхнями використовуються для збільшення поля зору та світлосили оптичної системи, а також для корекції її аберацій. ОД з еліпсоїдними поверхнями використовуються в системах накачування ОКГ, з параболічними й гіперболічними – у системах самонаведення ракет, з асферичними поверхнями вищих порядків – в об'єктивах приладів високої роздільної здатності.

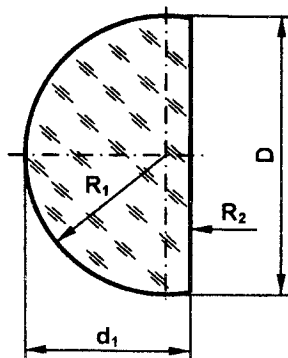


Рис. 7.7. Кулеподібна лінза

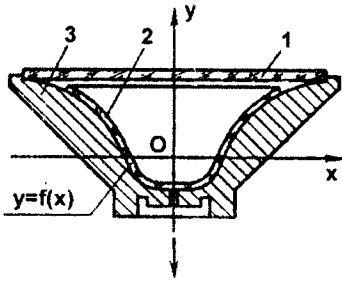


Рис. 7.8. Заготовка в методі примусового молірування

Існують кілька видів обробки асферичних поверхонь: метод примусового молірування (за допомогою вакууму) з плоскої полірованої заготовки (рис. 7.8), метод програмованого квазівільного притирання за допомогою пружного пелюсткового інструменту (рис. 7.9), метод "ножа" (рис. 7.10) для обробки параболічних поверхонь ("ніж" притирається до оброблюваної поверхні по лінії й при горизонтальному переміщенні утворює перерізи параболічної форми), метод нарощування шарів змінної товщини випаровуванням речовин у вакуумі тощо.

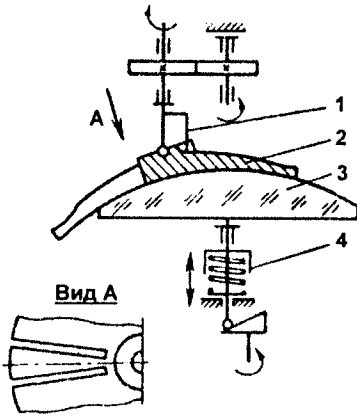


Рис. 7.9. Схема методу квазівільного притирання за допомогою пружного пелюсткового інструменту:
1 – пристрій, 2 – інструмент, 3 – Од

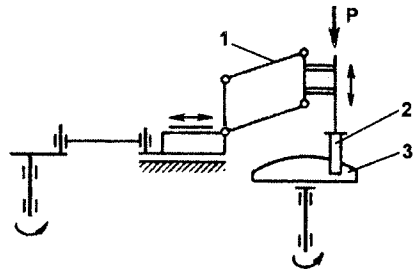


Рис. 7.10. Схема обробки за методом "ножа":
1 – пристрій, 2 – інструмент, 3 – Од

Найбільш поширеними є методи асферизації поверхонь шляхом зняття припуску з "найближчої сфери" квазівільним притиранням. Обробка асферичних поверхонь такими методами має ті ж самі засади для проектування технологічних процесів, що й обробка плоских і сферичних поверхонь:

- ◆ знімання припуску пропорційне роботі, що витрачається в процесі притирання;
- ◆ квазівільне притирання дозволяє формоутворення поверхні з оптичною точністю;
- ◆ рівняння для визначення роботи, що витрачається на певній ділянці оброблюваної поверхні, служить основою для створення керованих процесів формоутворення асферичної поверхні;

- ♦ обробка асферичних поверхонь відбувається при систематичному технологічному контролі, результати якого використовуються як зворотний зв'язок для керування процесом формоутворення.

Великогабаритні оптичні деталі – дзеркала та інші оптичні деталі, розміри яких перебільшують 1000 мм, використовуються в приладах астрофізичної оптики. Особливості виготовлення таких деталей полягають у тому, що кожна з них випускається в єдиному екземплярі й її конструктивні та технологічні параметри задаються вимогами конкретного оптичного приладу (наприклад телескопа тощо). Технологія обробки таких деталей за переліком операцій механічної обробки практично не відрізняється від традиційної. Наприклад, шліфування й полірування сферичного дзеркала діаметром 1260 мм з радіусом кривини 50 м здійснювалось за допомогою шліфувального й полірувального інструментів діаметром 850 мм (повнорозмірним інструментом) за методом притирання. Останнім часом для підвищення точності формоутворення поверхонь великогабаритних оптичних деталей, у тому числі й асферичних, використовується операція "ретуш" за допомогою інструментів, діаметр яких значно менший від розмірів оброблюваної деталі. Виконання цієї операції вимагає багаторазового постійного контролю загальної форми ОП і локальних похибок.

7.2.2. Оптичні деталі з кристалів

Поряд з ОД зі скла в багатьох галузях науки і техніки використовуються деталі з кристалічних матеріалів: кварцу, рубіну, ніобата літію, танталата літію, KH_2PO_4 (KDP), LiF, CaF_2 , Si, Ge, GaAs, InSb, NaCl, KCl тощо. Процеси механічної обробки кристалів дещо складніші, ніж скла. Це пов'язано з тим, що при їх обробці необхідно враховувати орієнтацію кристала, анізотропію його властивостей, наявність площин спайності, розчинність у воді, хімічні і токсикологічні характеристики.

Технологічний процес виготовлення ОД з кристалів включає операції механічної обробки: різання, свердління, шліфування та полірування. Різання багатьох кристалів виконується за допомогою звичайних алмазних відрізних кругів. Як МОТС застосовується вода. Для різання дуже дорогих кристалів (CdTeHg, які вирощуються за космічною технологією), коли товщина пропили має бути мінімальною, використовуються ультратонкі алмазні круги з товщиною 30–50 мкм. Напівпровідникові кристали (Si, Ge, GaAs) розрізають за допомогою кругів із внутрішньою різальною кромкою (АКВР). Водорозчинні кристали розрізаються за допомогою дроту або вологої нитки. Нитка, вологість якої підтримується постійною за допомогою спеціальних пристроїв (зволожувача і опріснювача), рухаючись через кристал, розчиняє його. Швидкість руху нитки становить близько 0,5 м/с. При цьому механічний вплив на кристалічну ґратку водорозчинного кристала є мінімальним.

Для свердління отворів у кристалах застосовують те ж устаткування й інструменти, що й при свердлінні скла. Як МОТС при свердлінні водорозчинних кристалів використовують насичені розчини їхніх солей. Механічну міцність і термостійкість деталей з цих кристалів підвищують поліруванням стінок отворів без застосування абразивних матеріалів – за рахунок розчину речовини, що часто не забезпечує точності їх розмірів і форми.

Шліфування та полірування кристалів здійснюється тими ж методами, що описані вище щодо деталей з оптичного скла. Встановлення заготовок виконується за допомогою відомих методів на спеціальних пристроях. Багато криста-

лів мають низьку термостійкість і значні залишкові напруги. Щоб уникнути руйнування виробів, блоки з фіксацією положення заготовок приклеюванням збирають і розбирають у термостаті. Швидкість нагрівання й охолодження не мають створювати в заготовках різницю температур, що перевищує їх термостійкість. Теплофізичні властивості матеріалу пристрою для приклеювання мають бути погоджені з відповідними властивостями кристала. При значній невідповідності коефіцієнтів теплопередачі в заготовках, що охолоджуються, може виникнути різниця температур, що перевищує термостійкість кристала. У такому випадку кристал зруйнується. Велика різниця коефіцієнтів термічного розширення призводить до виникнення напруг у заготовках, унаслідок чого точність формоутворення їх поверхонь погіршується.

При нагріванні блоку деталей, виготовлених з водорозчинних і гігроскопічних кристалів, волога, адсорбована полірованою поверхнею, може призвести до втрати нею прозорості. Щоб уникнути цього, поліровані поверхні до розбирання блоку захищають шаром лаку (цалон-лак, фторпласт тощо).

Механізм процесу шліфування, його закономірності, поділ на операції (грубе, тонке і надтонке шліфування) ті ж, що й при обробці скла. В умовах серійного виробництва найбільш продуктивним способом виконання операції грубого шліфування твердих кристалів (наприклад SiO_2 , Al_2O_3 , Si, Ge) є обробка алмазними інструментами у вигляді планшайб на спеціалізованих верстатах. У малосерійному виробництві грубе шліфування виконують на звичайних шліфувальних верстатах алмазним інструментом форми 12A2 з алмазних порошоків зернистістю 160/125–125/100.

Тонке шліфування твердих кристалів у більшості технологічних процесів виконують за допомогою алмазних інструментів або водяних суспензій абразивів у вільному стані (у більшості випадків – алмазних порошоків, іноді карбіді бору із зернистістю 20/14–3/2). Шліфування м'яких і водорозчинних кристалів виконують мікропорошками електрокорунду зернистістю M20–M5. Рідкою фазою суспензії є насичені розчини солей цих кристалів, спирт, гліцерин. Для зменшення глибини порушеного шару та ймовірності утворення дефектів (подряпин, виколів) використовують інструмент зі скла, крихкість якого виключає можливість закріплення зерен абразивного порошку.

Тонке шліфування водорозчинних кристалів можна замінити безабразивною обробкою – розчиненням поверхневого шару, утвореного грубим шліфуванням. Шліфувальник являє собою металевий чи скляний корпус з точною плоскою чи сферичною поверхнею, на яку натягають і закріплюють тонку (бязь, батист) чи наклеюють товсту (сукно, фетр) тканину. Вода за температури 30–40° С, яка подається в щілину між поверхнями інструменту і деталі, розчиняє кристал. Такий процес не утворює порушеного шару, тому механічна міцність і термостійкість деталей вищі порівняно з цими параметрами для деталей, які оброблені шліфуванням за допомогою абразивних порошоків у вільному стані. Безабразивна обробка виконує одночасно функцію попереднього полірування.

Полірування кристалів відрізняється розмаїтістю застосовуваних абразивних матеріалів і рідкої фази суспензії.

При поліруванні рубіну (сафіру) матеріалом полірувальника можуть бути метали (олово, мідь), кварцове скло, агат. Як абразивні матеріали використовуються алмазні пасти із зернистістю від 5/3 до 1/0.

Полірування кварцу виконують із використанням тих же матеріалів, що й при поліруванні оптичного скла. Полірування м'яких кристалів (NaCl, KCl, KI,

Слї тощо) поділяють на дві стадії – попереднє й остаточне. Завдання першої стадії – швидке видалення порушеного шару та надання поверхні виробу форми, близької до необхідної. Як полірувальний порошок використовується оксид хрому, одержуваний відновленням біхромату калію сіркою. Завдання другої стадії – зменшення мікронерівностей полірованої поверхні, надання їй необхідної точності та оптичної чистоти. Полірувальний порошок – дрібнодисперсний оксид хрому, матеріал полірувальника – смола з восковим покриттям, яка, маючи малу твердість, сприяє підвищенню оптичної чистоти поверхні. Як рідку фазу суспензії використовують воду, гліцерин та їхні суміші.

При поліруванні м'яких кристалів поверхня полірувальника не підрізається і не виправляється шляхом взаємного притирання з виробом. Її періодично коректують скляним інструментом, точність форми поверхні якого відповідає точності готової деталі. За високих вимог до точності деталей їх доводять у сепараторах. Форму і взаємне розташування поверхонь контролюють інтерференційним методом.

Полірування водорозчинних і гігроскопічних кристалів виконують "насухо", після чого поверхня водою не промивається, тому що внаслідок розчинення можуть бути розкриті дефекти (подряпини, точки), що утворилися при шліфуванні. Роботу виконують у гумових рукавичках чи напальниках, тому що при торканні пальцями полірованих поверхонь вони можуть помутніти. Заготовки зберігають в ексикаторах із прожареним і обезводненим хлористим кальцієм. Поліровані поверхні готових деталей піддають повному комплексу захисту з використанням вакуумного просушування деталей для видалення вологи з поверхні та прогрівання в термостаті, захист полірованих поверхонь наприклад шаром лаку.

7.2.3. Оптичні деталі з полімерних матеріалів

Ефективність використання полімерних матеріалів в оптичній технології обумовлена їх низькою вартістю, високою продуктивністю методів переробки, а також можливістю сполучення в одній деталі оптичних і механічних функцій. За якістю передачі оптичного зображення полімерні деталі значно поступаються аналогічним деталям з неорганічного скла. Полімерні матеріали найбільш доцільно застосовувати при масовому та великосерійному виробництві оптичних деталей невідповідального призначення: лінз візорних пристроїв фото- і кіноапаратів, світлопроводів, захисних стекол тощо.

Полімерна оптика є засобом для вирішення нових технічних завдань, пов'язаних зі зниженням маси й поліпшенням технологічності конструкцій оптичних деталей, підвищенням ефективності виробництва. Із полімерів найчастіше в оптичних пристроях використовують поліметилметакрилат і полістирол.

Для виготовлення оптичних деталей застосовують майже всі методи переробки полімерних матеріалів. Основними характеристиками кожного з них є продуктивність і точність одержуваних деталей. При визначенні способу виготовлення полімерної оптики враховують як вимоги, що висунуто до показників якості полімерних деталей, так і серійність їх виробництва.

Конструкційні і технологічні особливості оптичних полімерних деталей визначаються їх функціональним призначенням, способом кріплення та методом виготовлення.

Захисні стекла, шкали, ковпаки та інші деталі виготовляють головним чином з поліметилметакрилату, що має відносно високу ударну в'язкість і стійкість до природного старіння. Товщина полімерних захисних стекол 0,8–2,0 мм. Для плоскопаралельних пластин припустиму криволінійність задають не більше за 10–15'.

Полімерні дзеркала невисокої точності застосовують у невідповідальних вузлах оптичних приладів (освітлювальних пристроях, видошукачах камер тощо). Оптимальна товщина полімерних дзеркал становить 2,0–2,5 мм.

Кріплення оптичних полімерних деталей виконують приклеюванням, вальцюванням або притискивними планками.

Низька стійкість полімерів до стирання визначає місцезоташування полімерних деталей усередині оптичних приладів. Ці деталі, як правило, захищають деталями з неорганічного скла або встановлюють у тих місцях приладу, де нанесення пошкоджень у вигляді подряпин стає неможливим.

Технологія виготовлення оптичних деталей із полімерних матеріалів містить як формоутворювальні операції один із методів переробки пластмас або механічну обробку.

Лиття під тиском термопластів дозволяє повністю автоматизувати основні операції процесу формоутворення всіх видів оптичних деталей. Вихідний матеріал (гранули) висушують у вакуумних шафах до залишкової вологості не більше 0,06 %, оскільки наявність вологи в гранулах призводить до появи пухирів у литих деталях. Для лиття під тиском оптичних деталей із термопластів застосовують, як правило, такі ж стаціонарні форми, як і для лиття металів.

Пресування термопластів є ефективним при виробництві великогабаритних модулів і деталей різної товщини. Цей процес використовують також при виготовленні плівкових ешелетів. Його застосовують для серійного виробництва оптичних деталей, хоча пресування є менш продуктивним, ніж лиття під тиском. Технологія пресування зводиться до наступного. У прес-форму, розігріту до температури плавлення полімеру, завантажують матеріал у вигляді заготовки з поверхнями, максимально наближеними за формою до остаточного вигляду. Під тиском розплавлений матеріал набуває необхідної форми. Температуру нагрівання прес-форми задають у межах 150–250°C залежно від марки полімеру. Тиск пресування становить 20 МПа. Для пресування термопластів використовують звичайні преси для переробки реактопластів. Пресуванням одержують деталі з більш високою точністю заломлювальних поверхонь і з меншими значеннями подвійного променезаломлення порівняно з тими, що отримують при використанні лиття. Це пояснюється мінімальним переміщенням матеріалу в прес-формі та достатнім часом релаксації макромолекул у пластичному стані в процесі пресування.

Полімеризація термореактивних полімерів у формі застосовується в дрібносерійному виробництві оптичних деталей з високими вимогами до однорідності матеріалу і якості поверхонь – пластин Шмідта, контактних лінз тощо. Процес полімеризації у формі зводиться до наступного. Використовується суміш рідкого мономера з ініціатором полімеризації. Кількість ініціатора, що вводиться в суміш, становить 0,02–0,1 % від маси мономера. Суміш вакуумують для видалення пухирців повітря і заливають у форму. Форма зазвичай складається з двох половин – пуансона і матриці, виготовлених зі скла або метала. Формувальні поверхні мають шорсткість за 14-м класом. Полімеризацію мономера у формі виконують у термошафі чи автоклаві при температурах 30–60° С. Усадку матеріалу в

процесі полімеризації компенсують з'єднанням обох половинок форми за допомогою струбцин або інших пружних елементів.

Штамування листових термопластів застосовується для одержання великогабаритних деталей, виготовлення яких іншими способами вимагає громіздких і дорогих машин. Цей метод особливо зручний при дрібносерійному виробництві, що пояснюється простотою формувального інструменту. Штамуванням виготовляють прозорі кришки, ковпаки, захисні маски, відбивачі тощо. Готову для штампування заготовку рівномірно прогривають до розм'якшеного стану, розміщують у штамп-форму, пресують і після пресування охолоджують під тиском. Зняту зі штамп-форми заготовку готують до остаточної обробки – обрубання краю, зачищення задирок, полірування на бязевих чи бавовняних кругах за допомогою оксиду хрому.

Устаткування для штампування термопластів складається з нагрівача, що допускає прогрівання листового матеріалу до температури 250–300° С, і звичайних пресів, які застосовуються для переробки термореактивних пластмас.

Механічна обробка блокових термопластів застосовується в дрібносерійному виробництві, коли використання дорогого пресового обладнання чи устаткування для лиття є економічно недоцільним. Термопластичні матеріали легко піддаються всім видам механічної обробки на звичайному металорізальному устаткуванні. Однак якість поверхні полімерних деталей, одержуваних методом різання, не відповідає вимогам, що висуваються до оптичних деталей. Для цих деталей є необхідною додаткова обробка – оптичне полірування на смоляному полірувальнику за допомогою оксиду хрому або алмазного порошку АСМ 1/0. При цьому в масляно-охолоджуюче технологічне середовище (МОТС) додається гліцерин.

7.2.4. Волоконні елементи

Волоконні елементи – гнучкі і тверді світловоди, джугти, спечені шайби, фони та волоконні лінзи – використовують в оптичних приладах для передачі й комутації світлових сигналів, передачі оптичного зображення, перетворення форми світлового сигналу чи оптичного зображення оптичної системи.

Одножильний світловод є основою всіх волоконних елементів. Він має основну жилу з оптичного середовища з високим показником заломлення n_2 , що оточена світло-ізолювальною оболонкою з низьким показником заломлення n_1 (рис. 7.11).

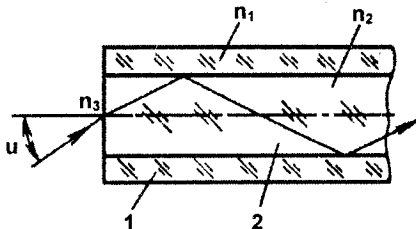


Рис. 7.11. Поширення променів в одиничному світловоді

Поширення променів в окремому світловоді відбувається завдяки багаторазовим повним внутрішнім відбиванням усередині основної жили на межі поділу "жила-оболонка".

Оптичне волокно – гнучкі світловоди, в яких діаметр перерізу дорівнює кільком сотим часткам міліметра і менше.

Одножильний світловод характеризується формою і розмірами перерізу, числовою апертурою A і коефіцієнтом світлопропускання τ . Переріз світловодів може бути круглим, квадратним чи шестиграним. Числова апертура A визначає світлосилу світловоду (максимальний кут u конічного пучка променів, що можуть пройти по світловоду):

$$A = n_3 \sin(u) = \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \quad (n_1, n_2, n_3 - \text{відповідно показники заломлення матеріалу оболонки, жили і середовища на вході у світловод}).$$
 Числова апертура залежить від обраних матеріалів жили та оболонки.

Коефіцієнт світлопропускання τ враховує всі втрати світла у світловолокну залежно від довжини ходу променя в ньому, числової апертури, прозорості матеріалу і стану поверхні на межі поділу "жила-оболонка". Коефіцієнт τ – основна оптична характеристика одножильного світловоду, від його значення багато в чому залежить не тільки кількість світла, що пройшло через волоконний елемент, а й закономірності перенесення та формування зображення на вихідному торці останнього.

Світловоди з оптичного скла мають високу однорідність і прозорість у видимій та інфрачервоній областях спектра, достатню механічну міцність, і є досить технологічними у виготовленні. Втрати світла в матеріалі жили не мають перевищувати 0,05–0,10 % на 1 см товщини зразка.

Скла жили й оболонки мають бути сумісними за їх фізико-хімічними властивостями. Сумісними вважаються скла, на межі поділу яких за температури термічної обробки не відбувається кристалізація, утворення пухирців і взаємна дифузія іонів. Наявність зазначених дефектів на межі поділу приводить до різкого збільшення розсіювання світла та зниження світлопропускання. Різниця коефіцієнтів термічного розширення стекел жили та оболонки в області температур від $+20^\circ\text{C}$ до температури спікання має бути не більше $2 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$. Велика різниця коефіцієнтів розширення приводить до утворення напружень на межі жили та оболонки, що знижує роздільну здатність волоконних елементів і може викликати тріщини і відшарування на межі поділу.

Світловоди з оболонкою витягують зі стекел двох різних марок, розплавлених чи розм'якшених одночасно. У цих умовах значення в'язкості стекел жили й оболонки не мають відхилитись більше, ніж на половину порядку від середнього значення в'язкості $\eta = 6 \cdot 10^{10} \text{ Па} \cdot \text{с}$, а різниця температур, що забезпечує це значення в'язкості, має бути в межах $\pm 50^\circ\text{C}$.

Технологічний процес варіння стекел для світловодів волоконних елементів принципово не відрізняється від процесів варіння безбарвного оптичного скла. Світловоди без оболонки добре витягуються з кварцу, вони мають високу однорідність і прозорість у видимій і ультрафіолетовій областях спектра, високу механічну міцність. Однак застосування кварцу для світловодів з оболонкою є дуже обмеженим. Останнє пояснюється високою температурою розм'якшення кварцу, його хімічною активністю за температур плавлення і технологічною несумісністю з більшістю придатних для оболонок матеріалів, що мають низький показник заломлення.

Для виготовлення оптичного волокна застосовують також високопрозорі полімерні матеріали: співполімери метилметакрилату і метилакрилату. Полімерні волокна є термостійкими до 80°C , гнучкими, без руйнування витримують багаторазове вигинання. На відміну від більшості стекел, які використовуються для виготовлення оптичного волокна, полімери є радіаційно стійкими при γ -опромінуванні до 10^4 Р і не зменшують світлопропускання через появу забарвлення після опромінення. Через недостатньо високу оптичну однорідність полімерні волокна застосовують головним чином у системах для передачі світла і в сцинтиляторах.

Багатожилінні світловоди для волоконно-оптичних елементів виготовляються перетяжкою пакета одножилінних світловодів в один багатожилінний за температури пластичної деформації скла. Для цього одножилінні світловоди довжиною до 1200 мм, однакові за геометричними розмірами і ретельно очищені від забруднень і жирових плям, укладаються в пакет, що за формою перерізу відповідає шестигранному, круглому або квадратному багатожилінному світловоду.

Гнучкі волоконні джгути являють собою пучок оптичних волокон, захищених гнучкою оболонкою і жорстко закріплених на торцях. Використовують їх для передачі світла й зображення в тому випадку, коли необхідна рухливість передавального елемента або його окремих ділянок. Джгути випускаються в різних варіантах виконання залежно від форми торця, виду оболонки і наконечників.

На рис. 7.12 показано джгут 4 із круглими торцями 1 діаметром d , у полівінілхлоридній оболонці 3 з фасонними наконечниками 2 на кінцях. Стандартні джгути випускають довжиною до 1500 мм і діаметром d до 15 мм.

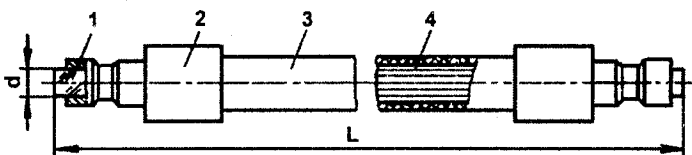


Рис. 7.12. Гнучкий волоконний джгут

Гнучкі джгути для передачі світла і зображення виготовляють у такій технологічній послідовності. Намотане на бобіну волокно через пази на циліндричній поверхні корпуса бобіни скріплюється струбцинами і розрізається на джгути. Розрізаний джгут розпрямляють, один кінець його закріплюють і виконують віброукладення для видалення поламаних волокон та одержання ідентичності розташування волокон на торцях. Після сушіння торці джгута закріплюють, витримують під вакуумом за кімнатної температури до тверднення і полірують. Проклеєні квадратні джгути з відполірованими торцями поділяють на заготовки меншого перерізу шляхом розколювання ножом на торцях. На остаточно підігнані за розмірами перерізу волоконні джгути надягають оболонку, наприклад, з латексу, поліхлорвінілової трубки, і приклеюють наконечники. Торці зібраних джгутів, що виступають з наконечників на 0,5–1,5 мм, підлягають остаточній обробці – шліфуванню та поліруванню.

Спечені волоконні пластини використовують у приладобудуванні для виготовлення екранів електронно-променевих трубок, фотокатодів і вхідних вікон електронно-оптичних перетворювачів, волоконних лінз тощо. Напівфабрикатом для виготовлення пластин є скляні багатожильні тверді світловоди чи волокно. Технологічний процес виготовлення спечених пластин починається з підготовки світловодів (їх розрізають на шматки довжиною 100–150 мм, ретельно очищають від забруднень, жирових плям і щільно укладають у прес-форми). Пресування виконують у вакуумних прес-печах. Спечену заготовку відпалюють для зняття залишкових термічних напруг і після охолодження розпилюють алмазним кругом на пластини. Поверхні пластин обробляють до заданих розмірів деталі тими ж методами, що й оптичні деталі зі скла.

Фокуси – волоконні елементи з конічними світловодами застосовуються для зміни масштабу зображення й вирівнювання кривини поля оптичних систем. Фокуси діаметром до 20–25 мм виготовляються зі спеченого пучка твердих багатожильних світловодів або волокна при їх розтягуванні в подвійний конус за температури пластичної деформації скла.

Мікроканальні пластини являють собою елементи, що складаються з великої кількості прямих скляних капілярів діаметром 10–20 мкм з товщиною стінок каналів 1,5–3,0 мкм. Використовують їх для посилення яскравості зображення в електронно-оптичних перетворювачах. Існує кілька технологічних методів виготовлення мікроканальних пластин, основним з яких є метод видалення з оболонки світловодів спечених волоконних пластин серцевини – жили шляхом хімічного травлення. Торці пластини перед травленням шліфують і полірують.

7.2.5. Оптичні деталі квантових генераторів

Оптичні квантові генератори (ОКГ) з активним тілом із неодимового скла або ітрій-алюмінієвого гранату, що випускаються серійно, знаходять широке застосування в науці і техніці.

Активні тіла (рис. 7.13) виготовляють за технологією аналогічною технології виготовлення плоскопаралельних пластин. Особливістю такого виду ОКГ є те, що завдяки дуже великому значенню відношення його довжини до діаметра (більше 20) обробка циліндричної і торцевих поверхонь ускладнюється.

Неодимові генераторні лазерні стекла (ГЛС) для виготовлення активних тіл ОКГ варять у горшкових печах і розливають у блоки, які розрізають алмазними кругами на бруски – дроти. Далі дроти блокують по кілька штук для шліфування та полірування обох торців (неодимове скло обробляється майже як скло марки К8). Через поліровані торці дротів контролюють їх свильність.

Заготовки активних тіл з дротів вирізають за допомогою алмазних кругів або висвердлюють алмазними трубчастими свердлами. За діаметром вони обробляються алмазними кругами 1А1.

Наступними операціями – шліфуванням і поліруванням за звичайних режимів обробки, – доводять торці стрижнів до відповідного класу чистоти.

Для поштучної обробки стрижнів на операціях шліфування й полірування торців (рис. 7.14) використовують пристрій 4, завдяки якому стрижень 1 затискується обкладниками з текстоліту 2 і встановлюється перпендикулярно до робочої поверхні 8 інструменту 9 за допомогою шару смоли для приклеювання 6. Навколо оброблюваного торця стрижня закріплюють шматки скла того ж складу що й стрижень ("паразитні" шматки). При встановленні стрижень 1 за

допомогою юстирувальних гвинтів 3 базується на суцільному скляному диску з точною за формою поверхнею.

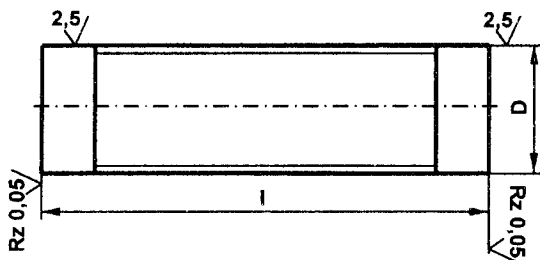


Рис. 7.13. Активне тіло ОКГ

Поверхні торців доводять поліруванням у пакетних пристроях з точністю $\lambda/20 \dots \lambda/50$. Перпендикулярність торців до осі активного тіла витримують з точністю до $1'$.

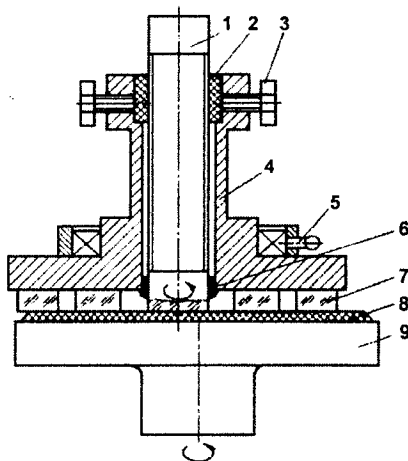


Рис. 7.14. Схема шліфування та полірування торців активного тіла ОКГ

Освітлювач ОКГ виготовляється з кварцового скла. Отвори в ньому виконуються за допомогою алмазних свердел. Внутрішня поверхня отворів обробляється до досягнення такої ж шорсткості, як і на бічній поверхні стрижня. Зовнішні й торцеві поверхні освітлювача також обробляються за допомогою алмазних інструментів.

Вікна і дзеркала резонатора ОКГ виготовляються зі скла марки К8, БК10, ЛК4 або плавленого кварцу за технологією, що використовується при виготовленні плоскопаралельних пластин. До точності таких ОД висуваються такі ж

вимоги, як і до торців активних тіл. Покриття з високою відбивальною здатністю (багат шарові діелектричні або металеві) наносять на них методами вакуумного випаровування або катодного розпилення. Основні вимоги щодо якості покриття вікон і дзеркал зводяться до високих значень коефіцієнта відбиття або пропускання світла та оптичної міцності.

Вимоги щодо лазерних дзеркал з кварцового скла марки КУ стосуються шорсткості виконавчих поверхонь ($R_a < 1$ нм; $R_{\max} \leq 2$ нм), точності їх форми ($N \leq 0,5$ інтерференційного кільця), оптичної чистоти ($P0-10\dots P0-40$) і відбивальної здатності (коефіцієнт розсіяння світла $K_v \leq 0,003$ %).

Тонке шліфування поверхонь лазерних дзеркал здійснюється за допомогою шліфувальних кругів 6A2T, що складаються з алмазних елементів діаметром 10 мм, висотою 5 мм, з 10 %-ною концентрацією алмазних мікропорошків зернистістю 20/14 на металевій зв'язці М6-14 (АТ6 10x5 – АСМ 20/14 – 10 % – М6-14). При шліфуванні знімається припуск $\Delta h = 0,2-0,3$ мм і забезпечується шорсткість обробленої поверхні $R_a \leq 0,25$ мкм.

Полірування поверхонь лазерних дзеркал виконується плоскими полірувальними кругами форми 6A2T діаметром 200 мм з товщиною робочого шару 10 мм у два переходи. Послідовно використовують інструменти з полірувальних композитів Аквапол-5 і Аквапол-7. Полірування блоку ОД виконують на шліфувально-полірувальному верстаті типу ШП. Перший перехід полірування інструментом "Аквапол-5" здійснюється при частоті обертання інструменту $n = 100$ об/хв і тиску $p_a = 0,075$ МПа. Другий перехід полірування інструментом "Аквапол-7" відбувається при значеннях режимних параметрів, менших у 2,0-6,0 разів.

Контроль шорсткості оброблених поверхонь за параметрами R_a , R_q і R_{\max} і точності форми виконавчих поверхонь за параметром N лазерних дзеркал виконують за допомогою інтерференційних методів, наприклад, безконтактних лазерних інтерферометрів Zygo NEW Vien-5000 і Maxim-GP (об'єктив – 20° або 50° Mirau, Filter-Median) і інтерферометра моделі ІНКО-250 (К.Цейс-Йєна, Німеччина) відповідно. Для визначення коефіцієнта розсіяння світла K_v і класу оптичної чистоти P (за американським стандартом Scratch/dig-S/d) використовують спеціальне устаткування (наприклад, стенди СТ-164 і Ю-36, розроблені та атестовані ЦКБ "Арсенал" (Київ) спільно з ВНЦ "ГОИ им. С.И.Вавилова" (Санкт-Петербург, Росія) і оптичний мікроскоп зі збільшенням 32^x.

Результати оцінки стану оброблених поверхонь лазерних дзеркал за описаною вище технологією (з використанням інструменту з закріпленими полірувальними порошками) наведено в табл. 7.1.

Із таблиці видно, що величина K_v полірованої поверхні спадає при зменшенні висотних параметрів шорсткості (рис. 7.15). Тому, щоб досягти найвищої відбивальної здатності обробленої поверхні лазерного дзеркала з коефіцієнтом розсіяння $K_v < 0,003$ %, потрібно забезпечити величину її шорсткості не гіршу, ніж $R_a = 0,30$ нм. Така шорсткість досягається в умовах нанотехнології полірування оптичних поверхонь (рівень "High-Tech") – при послідовному використанні полірувальних інструментів "Аквапол-5" і "Аквапол-7".

Стан поверхонь лазерних дзеркал зі скла марки КУ після полірування інструментами "Аквапол-5" і "Аквапол-7"

Полірувальний композит		Аквапол-5	Аквапол-7
Шорсткість обробленої поверхні	R_a , нм	1,0–1,2	$0,29 \pm 0,09$
	R_q , нм	1–2	$0,36 \pm 0,11$
	R_{max} , нм	4–10	$2,1 \pm 0,61$
Середнє значення коефіцієнта розсіяння відбитого світла	$K_v \cdot 10^3$, %	4,5	3,3
Клас оптичної чистоти		P0–40...P11	P0–10...P0–40
Scratch/dig	S/d	Краще, ніж 60/40	20/10
Вихід придатних деталей із вказаними вимогами	%	60–70	58–89

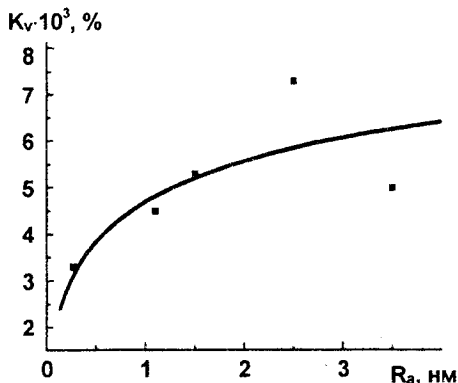


Рис. 7.15. Залежність коефіцієнта розсіяння світла від шорсткості полірованої поверхні лазерного дзеркала з кварцового скла марки КУ

Інтерференційні стопи в багатьох випадках використовуються як дзеркала в резонаторах (рис. 7.16) і виготовляються зі скла марки К8 у вигляді пластин і кілець. Кільця виготовляють з пластин шляхом висвердлювання за допомогою трубчатих алмазних свердел. Подальша обробка виконується аналогічно до обробки пластин. З'єднуються кільця і пластини за допомогою посадки на оптичний контакт.



Рис. 7.16. Інтерференційна стопа

Першу поверхню пластини обробляють для посадки на оптичний контакт. У даному випадку при його використанні обробляють і другу поверхню. При цьому витримують дуже високі вимоги щодо відхилення від площинності і клиноподібності.

На якість обробки пластин інтерференційних стоп накладають такі ж значення граничнодопустимих відхилень, як і на торці активних тіл оптичних квантових генераторів.

7.2.6. Деталі металооптики

Традиційною фінішною операцією при виготовленні металевих оптичних поверхонь є полірування полірувальними порошками у вільному або зв'язаному стані. Про механізм полірування металів відомо все ще дуже мало, тому для побудови технологічних процесів полірування металевих поверхонь зазвичай використовують методи полірування скла.

Попередня обробка деталей металооптики здійснюється за звичайними технологіями металообробки (грубе обточування, чистове обточування, термообробка, притирання).

Полірування виконують залежно від фізико-механічних властивостей оброблюваного металу за допомогою різних полірувальних порошків і полірувальних смол.

Використовується також **електролітичне полірування**, дія якого заснована на принципі анодного розчинення металу в середовищі електроліту з утворенням оксидної плівки й подальшим видаленням її з мікро- і макронерівностей за допомогою притирів і полірувальних порошків.

Одним із найсучасніших методів полірування металооптики є прецизійне **алмазне мікроточіння**. При його використанні можна обробляти поверхні складної (довільної) форми, а в самому процесі відсутнє таке негативне явище, як шаржування обробленої поверхні. Крім того, значно підвищується продуктивність обробки. Поряд з цими перевагами існують і складності, які пов'язані з необхідністю використання спеціальних прецизійних верстатів, різців зі спеціальною геометрією, приміщень, які задовольняють дуже жорсткі вимоги за сталістю температури ($\pm 0,1$ °C), відсутністю вібрацій, шуму і пилу (запиленість повітря не має перевищувати 50 часток пилу розміром не більше 1 мкм на 1 л).

Знаходить використання й **іонно-променева обробка** металевих оптичних поверхонь. Полірування цим методом засновано на розпиленні металу при бомбардуванні іонами інертного газу. Якщо у вакуумі іонний промінь (потік

прискорених іонів) направити на поверхню металу, то внаслідок зіткнень іонів з атомами поверхні останні можуть вибиватись з неї, тобто поверхня почне розпилюватись. При зіткненні іонів з атомами мішені в результаті створення каскаду атомних зіткнень у шарі на поверхні металу можуть утворюватись різні дефекти. Для зменшення впливу цього явища при обробці металевої поверхні потрібне відпалювання радіаційних дефектів. Вакуумне відпалювання зазвичай призводить до зростання шорсткості поверхні внаслідок збільшення на ній зерен через рекристалізацію.

Формування оптичної поверхні іонним пучком можна забезпечити за допомогою різних методів: асферизації через маску, сканування іонного пучка, переміщення оброблюваної поверхні за заданою програмою.

Для одержання високої чистоти поверхні металевої деталі застосовується іонне бомбардування в тліючому розряді. Одним із ефективних способів очищення поверхні від оксидних шарів є розпилення перехідного шару іонами інертних газів. Тут можливі 2 підходи: використання іонних пучків і застосування плазми газового розряду. Обробку зразків проводять зазвичай в умовах *in situ* в електронних спектрометрах, а останнім часом – й у вимірювальних вакуумних камерах еліпсометрів. Однак цим методом важко одержати неінтенсивні потоки низькоенергетичних іонів, за допомогою яких можна було б обробити поверхню в режимі, коли ефекти імплантації іонів у глибину під поверхню мінімальні. Щодо цього вигідно відрізняється обробка металодзеркал у плазмі аномально тліючого розряду, коли енергії іонів, що бомбардують поверхню, можуть становити десятки еВ.

Розглянемо характерні явища в такій плазмі, які відносяться до енергетики прикатодної області розряду постійного струму I_a , оскільки об'єктом обробки є зразок-катод. Ділянка вольт-амперної характеристики (ВАХ) розряду в розряджених газах, де іонізація ще слабка, описується лавинною теорією Таунсенда. Але при певному розрядному струмі I_a відбувається найбільша кількість іонізацій у лавині саме біля анода, що має потенціал V_a . Через малу рухомість іонів щодо електронів потенціал простору біля анода підвищується й змінюється слабо по довжині трубки. Розподіл потенціалу такий, що електричне поле сконцентровано біля катода, а біля анода послаблюється, хоча його величина лише трохи менша ніж V_a . Ділянка ВАХ, де V_a спадає зі зростанням I_a , пов'язана з появою просторового розряду в розрядному проміжку. При цьому формується область прикатодного падіння потенціалу, а за нею вздовж значної частини трубки – позитивний стовп плазми нормального тліючого розряду. Характерна його риса – незалежність катодного потенціалу від величини розрядного струму і тиску P_0 газу, що при $V_a = \text{const}$ супроводжується в міру зростання струму розширенням робочої площі катода. Уже в цьому режимі розряду є можливим очищення катода від адсорбованих шарів. Інтенсифікація процесу за рахунок збільшення кількості іонів на одиницю поверхні катода-зразка та їх енергії досягається звуженням катодного простору і зростанням анодної напруги, тобто переходом до аномально тліючого розряду.

У сучасних системах іонної обробки поверхонь металодзеркал використовують аномально тліючий розряд спектрально чистого Ar. У тих режимах розряду, які застосовуються в типовій установці при вибраній відстані 6 см між катодом і анодом візуально спостерігаються всі належні йому шари різної світимості як в умовах стаціонарного прокачування аргону через розрядну камеру, так і її ізоляції від системи напускання газу. Катодна пляма рівномірно

покриває всю поверхню дзеркала. Для сформованого в квазіоднорідному полі позитивного стовпа та іонного пучка, який зростає за густиною в прикатодній області, можна розрахувати енергетичні та інші його параметри. Саме цим пучком і бомбардується приповерхневий шар, коли, майже не відчувши співударів на відстані товщини d_m темного простору, іони падають на катод (d_m у нормальному й аномальному розрядах співвідносяться приблизно як 5:1).

Основою зазначених розрахунків є розвинена Зігмундом теорія розпилення речовин, що базується на кінетичному рівнянні Больцмана, і запропонований Томпсоном підхід, в яких розглядаються двочастинкові зіткнення в моделі твердих сфер. Розпилення прилеглого до поверхні шару атомів іонами інертних газів – результат розвинення каскадів незалежних парних зіткнень іона маси m_1 і атома масою m_2 розпилюваної мішені (катада), енергія зв'язку якого на поверхні становить зазвичай одиниці еВ (5,2 еВ у Fe). Тому за таких енергій іонів у аномально тліючому розряді вже починається розпилення катада в режимі первинного вибивання атомів. Енергія іонів з віддаленням від катада на відстань $d \approx d_m$ спадає за експоненційним законом, а їх кількість, навпаки, зростає.

Варіюючи або тиск газу P_0 у розрядному проміжку (а, відповідно, і пробивну напругу V_m , що є функцією добутку $P_0 \cdot d_c$, де другим співмножником є величина міжелектродної відстані в трубці (діодне розпилення)), або V_a , змінюють енергію іонів, що бомбардують поверхню.

Для чистих металів встановлено значення порогових енергій розпилення, які, наприклад, для Ti, Cr, Fe, Co, Ni і Cu становлять 24, 23, 12, 11, 9 і 7 еВ відповідно.

У теорії розпилення, заснованій на розгляді каскадів зіткнень, потрібно, щоб енергія первинних частинок E_p була на два-три порядки більша за середню поверхневу енергію зв'язку U_0 атома. Коефіцієнт розпилення, що визначається як середня кількість атомів, усунених з поверхні твердого тіла однією падаючою частинкою, задається виразом

$$Y = 0,042 \cdot \frac{F_d(E_p, \varphi_p, x)}{\rho \cdot U_0}$$

де x – координата розпиленої частинки відносно точки входу первинної частинки (у випадку розпилення при нормальному падінні $x = 0$) під кутом φ_p до поверхні, ρ – густина атомів матеріалу мішені, F_d – функція розподілу поглинутої енергії з глибиною.

Для багатьох металів і сплавів залежності $Y(E_p)$ експериментально визначені й подані у відповідній літературі. Значення Y різних елементів відрізняються більше, ніж на порядок. Характерно, що при бомбардуванні металу іонами з енергією, нижчою від порогової довжини, усуваються тільки слабкозв'язані атоми, за рахунок чого згладжуються нерівності поверхні і зменшується її шорсткість.

Достовірні значення Y лежать у межах 10^{-5} – 10^3 атомів на одну частинку, що впала, причому зі зростанням заряду Z_1 первинних частинок Y збільшується, але сам коефіцієнт пропорційності є функцією відношення m_2/m_1 . Вважають, що порогова енергія E_{nop} розпилення не залежить від m_1 і що $E_{nop} \approx 4U_c$, доки $m_1 < 20$ (в іонів Ar $m_1 = 39,94$). При великих відношеннях мас

$(m_2/m_1 > 5)$ $E_{пор} = U_c I (1 - \gamma_n) \gamma_n$, де $\gamma_n = 4 m_1 \cdot m_2 / (m_1 + m_2)^2$ – коефіцієнт передачі енергії, а U_c – енергія сублімації. Через відмінність Y для чистих металів після бомбардування може змінюватися компонентний склад поверхневого шару від композиції в об'ємі у сплаві, виготовленому на основі таких металів. Складність тут полягає в тому, що Y компоненти сплаву може різко відрізнятися від її індивідуального Y , характерного хімічно чистій, окремо взятій компоненті.

Зняття приповерхневого шару досягається при густинах струму порядку кількох mA/cm^2 (цьому відповідає потік 10^{16} іонів/ $\text{cm}^2 \cdot \text{с}$). Тоді одному mA/cm^2 при бомбардуванні за 1 с еквівалентом служить розпилення кількох моношарів. Виходячи з цього можна оцінити, що необхідно створити потік у кілька десятків mA/cm^2 і вище при обробці металевої поверхні, щоб процес очищення домінував над осадженням шарів залишкового газу вже при 10^{-6} Тор, коли ще приблизно один його моношар протягом 1 с може залишатися на поверхні катода. Тому після здійснення бомбардування в камері створюють високий вакуум, або заповнюють її аргоном, щоб послабити нові окиснювальні процеси.

До цього часу розглядався лише один аспект динамічного процесу у плазмі газового розряду – ефекти ерозії поверхні катода при нормальному падінні на нього іонів, що включають випаровування і розпилення прилеглих до неї шарів. Але разом з цим відбувається й імплантація іонів у глибину зразка, що виникає зазвичай при достатньо високих енергіях іонів і дозах опромінення, хоча її поява не виключена і при низьких E_p . При цьому поява імплантації пояснюють міграцією іонів на значні відстані від поверхні в результаті генерації на ній при зіткненнях частинок пружних хвиль, що проникають на ще більші глибини в приповерхневому шарі. Незважаючи на те, що товщина шару зменшується зі зменшенням E_p і може бути набагато менше товщини скін-шару, нехтувати цим ефектом при обробці металодзеркал не можна.

Підвищення E_p , помітно спотворюючи приповерхневий шар і порушуючи ближній порядок в атомній структурі, в одних випадках приводить до аморфізації поверхні, а в інших, навпаки, до появи областей з високою концентрацією точкових дефектів, і врешті – до її кристалізації. Як приклад зазначимо, що товщина шару зі зміненою структурою у сплаві Ni-Cu зростає від 1 нм при 500 еВ до 2,0–2,5 нм при 2 кеВ. У випадку бомбардування низькоенергетичними іонами надпорогової величини товщина імплантованого шару, що залягає безпосередньо під поверхнею мішені, значно менша.

Основу установки для очищення поверхні складають вакуумна камера і система відкачування та напускання газу, суміщені з гоніометром-еліпсометром. Конструкція камери і спосіб її кріплення до основи дозволяють зручно проводити юстування зразка при зняттю балоні і не порушувати геометрію досліджу в подальшому при з'єднанні двох її з'ємних частин. Кількома циклами напускання й відкачування газу понижують парціальний тиск залишкового кисню у вакуумній камері. Після останнього напускання Ag проводять його відкачування до $P_0 \sim 5 \cdot 10^{-2}$ Тор. Потім у вакуумній камері запалюється тліючий розряд і здійснюється розпилення приповерхневих шарів матеріалу катода. При цьому протягом всього часу розряду відбувається відкачування системи і необхідний тиск $P_0 \sim (5-10) \cdot 10^{-2}$ Тор підтримується одночасним напусканням Ag через вентиль.

Напруга в розряді встановлюється за допомогою високовольтного блока живлення ПВ-2-2 і становить 0,5–2 кВ, а струм з густиною 1–10 А/м² вимірюється амперметром М-1104. Доцільність бомбардування поверхні зразків саме в цих умовах була встановлена таким чином. При визначенні методом Бітті фотострумів I_0 , I_{45} , та I_{90} до і після бомбардування було помічено, що I_{45} найбільш чутлива до стану поверхні величина, причому при знятті шару забруднень I_{45} зменшується, а оптична провідність σ_1 шкіль-шару зростає. Використавши синхродетектор та фотоопір, можна простежити за зміною I_{45} у процесі бомбардування. Із врахуванням особливостей геометричної форми розрядного об'єму та основи для кріплення зразка (ефективність розпилення залежить від кута падіння іонів на мішень), габаритів вакуумної камери і застосованих режимів обробки поверхні, за формулою Чаїлда були оцінені енергії E_p , що бомбардують поверхню катода. Залежно від V_a значення E_p змінювались від кількох десятків еВ до кількох сотень еВ, але не перевищували 0,5 кеВ.

Залежно від типу зразка та його агрегатного стану зміна і стабілізація еліпсометричних параметрів поверхні в процесі її бомбардування відбуваються протягом 0,5–2,0 хв. Тому сумарний час бомбардування тонких (товщиною порядку 30 мкм) металевих стрічок в усіх циклах обробки не має перевищувати 3 хв, оскільки по закінченні часу разом з розпиленням відбувається підігрівання зразка і може зростати адсорбція залишкових хімічно активних газів, що спостерігається на полівалентних і перехідних металах. За оцінками гранична доза опромінення під час бомбардування не має перевищувати 10^{18} см⁻². Більш тривале бомбардування стає ефективним при очищенні великогабаритних дзеркал для потужних лазерів.

Вимірювання температури зразка в процесі його бомбардування за допомогою термопари хромель-алюмель, яку щільно встановлено між притисною планкою тримача зразка і досліджуваною поверхнею у випадку тонких металевих стрічок (або з тильної сторони для суцільних масивних металевих дзеркал) показало, що протягом першої хвилини приповерхневий шар може прогріватися до 340–350 К, а потім його температура змінюється мало. Тому в аморфних зразках у вигляді вузьких тонких стрічок за рахунок джоулевого тепла навіть при короткочасних бомбардуваннях не виключена можливість стимуляції процесів низькотемпературної структурної релаксації.

Поряд з описаними методами виготовлення деталей металооптики використовується **плазмова обробка**, суть якої полягає в тому, що при низькому тиску у плазмі газового розряду відбуваються певні плазмохімічні процеси. Вони пов'язані з тим, що у плазмохімічному реакторі під дією непружних зіткнень молекул реагентів з електронами утворюються вільні атоми і радикали, які мають дуже високу хімічну активність. Саме вони адсорбуються на поверхні і вступають у хімічний зв'язок з поверхневими атомами, унаслідок чого утворюються сполуки, які десорбуються з поверхні у вигляді газової фази та усуваються з реактора за допомогою відкачування. При цьому досягається ефект полірування та очищення поверхні.

До фінішної обробки металевих поверхонь можна віднести і нанесення на них тонких плівок, яке може бути виконано як традиційними способами діодно-

го й тріодного катодного розпилення, так і сучасними, більш продуктивними, *методами іонного осадження* (випарування у вакуумі та іонного нанесення плівки), *магнетронним методом* (збільшення густини газу біля мішені під дією магнітного поля) і за допомогою *активації хімічних реакцій у плазмі*.

7.2.7. Деталі інтегральної оптики

В інтегрально-оптичних схемах для перетворення електричних сигналів в оптичні й оптичних в електричні використовується елементна база, яка складається з джерел випромінювання, фотоприймачів і мікрохвелеводів. Замість звичайних лінзових оптичних елементів у оптичних і оптоелектронних приладах інтегральної оптики використовуються планарні хвелеводні лінзи (лінзи Люнеберга, геодезичні лінзи, лінзи типу дифракційної ґратки).

Інтегрально-оптичний фокусуєчий елемент (лінза Люнеберга) являє собою підкладинку з показником заломлення n_p , на яку послідовно нанесено два

хвелеводні шари з різними показниками заломлення n_0 і n_1 . Верхній шар має змінний за товщиною профіль, який утворює градієнт ефективного хвелеводного показника заломлення. Відхилення в межах 1 % профілю шару від заданого призводить до значного (у 5 разів) збільшення фокальної плями і зміни фокусної відстані. Основний технологічний метод забезпечення заданого профілю такої лінзи – метод напilenня через маску.

Геодезична лінза являє собою заглиблення в підкладинці сферичної або асферичної форми, яке утворюється за допомогою механічної обробки. Шліфування і полірування цього заглиблення є надзвичайно складною проблемою через мініатюрність деталі. Тільки алмазне точіння дозволяє забезпечити надмікронну точність профілю і глибини з одночасною високою оптичною якістю оброблених поверхонь.

Лінзи типу дифракційної ґратки технологічно простіші за геодезичні та лінзи Люнеберга. В основу технології їх обробки покладено короткохвильову (ультрафіолетову) фотолітографію та електронну літографію.

Хвелеводні структури інтегральної оптики виготовляють на пасивних або активних підкладинках. Зазвичай підкладинки зі скла, в яких показник заломлення приповерхневого шару змінено за допомогою реакцій іонного обміну або іонної імплантації, складаються з різних оксидів та нітридів, які отримують методами тонкоплівкової технології, із полімерних плівок, утворених полімеризацією, фотополімеризацією чи осадженням з розчину, а також з плівок активних діелектриків (ніобату та танталату літію) і напівпровідників ($A^{III}B^V$ і $A^{II}B^{VI}$), як і всі елементи інтегральної оптики вимагають при виготовленні дуже високого технологічного рівня і перебувають у стадії інтенсивного розвитку на базі нових фізичних ідей і розробок.

7.3. Перспективи розвитку оптичної технології та впровадження нових наукових розробок

Сучасний розвиток фізики твердого тіла, оптики, електроніки, лазерної та оптоелектронної техніки, удосконалення і розробка комп'ютерної техніки обумовлюють необхідність розв'язання принципово нових завдань, які пов'язані з потребами в галузі наукових досліджень і їх практичного застосування та з

використанням нових явищ і ефектів. Створення нових оптичних матеріалів і використання нетрадиційних для оптики матеріалів (наприклад карбїду кремнію або силїційованого карбїду кремнію "Sicar") призводять до необхідності модернізації технологїчних процесів, інструментів і устаткування або розробки принципово нових технологїй обробки оптичних поверхонь. Розширення галузей використання нових методів обробки (алмазне мікроточїння, асферизації за рахунок нанесення покриттів тощо) також обумовлює необхідність розробки нових технологїчних процесів обробки оптичної поверхні та інструментів для їх реалізації.

Перспективи розвитку оптичної технологїї полягають саме в тому, що оптика як розділ фізики була, є і буде в майбутньому передовим краєм науки і техніки. Важко уявити собі галузь сучасної науки і техніки, в якій би не використовувались прилади і дослідницьке устаткування з оптичними, оптико-механічними, лазерними або оптоелектронними пристроями. Їх удосконалення можливе лише за наявності розвинутої оптичної технологїї.

У галузі космічної астрономії для виготовлення великогабаритних дзеркал космічних телескопів і асферичної оптики замість алюмінієвих сплавів і полікристалічного кремнію запропоновано використовувати карбїд кремнію або силїційований карбїд кремнію "Sicar" як матеріали з меншою густиною і більш високою хїмічною стійкістю. Як наслідок цього, створюється нова технологїя обробки оптичних поверхонь таких деталей.

Нанесення на алюмінієве дзеркало конструкційного покриття на основі нікелю (шару до 200 мкм) для підвищення його експлуатаційних характеристик стало причиною розробки нових методів асферизації та зональної ретуші оптичної поверхні з металевим покриттям.

У галузі розробки і використання деталей ІЧ техніки з германію, кремнію або карбїду кремнію (глибоко охолоджуваної оптики – ІЧ об'єктивів, систем сканування, W-аксиконів лазерних резонаторів, спроможних працювати за температури 10 К на довжинах хвиль світла $\lambda = 1-25$ мкм) головні проблеми виникли через складнощі забезпечення оптичної чистоти оброблених поверхонь. Ці проблеми почали вирішуватись тільки завдяки застосуванню для їх обробки методу алмазного мікроточїння.

При розробці нових конструкцій ОД, зокрема деталей з асферичними поверхнями не тільки 2 порядку, а й більш високих порядків, виникла ідея створення комбінованих деталей (полімерна композиція, нанесена фотополімеризацією під дією УФ випромінювання на підкладинку зі скла). Для асферизації поверхні такої деталі потрібні принципово нові технологїї її обробки.

Для підвищення терміну експлуатації звичайних оптичних деталей (лінз, призм тощо) в екстремальних умовах останнім часом для їх виготовлення почали використовувати корунд, який за своїми фізико-механічними властивостями вигідно відізняється від скла. Це призвело до необхідності розробки технологїї фінішної обробки деталей із корунду, яка дозволяє досягти виконання вимог щодо оптичної чистоти поверхні. Зазначене повністю відноситься й до ОД із твердих кристалів гранату і лейкосапфіру з відносною товщиною, меншою за 1/30, коли задовольняються вимоги за точністю форми ($N < 2$) і оптичною чистотою (PII – PIII). Традиційна технологїя обробки ОД з таких матеріалів, яка базується на застосуванні алмазних мікро- і субмікропорошків, дозволяє досягти лише оптичної чистоти PIV – PV, що пов'язано з наявністю на обробленій поверхні подряпин ("алмазного фону"). Крім того, для досягнен-

ная необхідної точності форми виконавчих поверхонь при обробці таких ОД необхідно використовувати оптичний контакт.

У вакуумних камерах НВЧ-приладів високих енергій для виведення випромінювання доцільно використовувати діелектричні вікна з лейкосапфіру або з бронеліту (кераміки на основі оксиду берилію), обробка яких є складною проблемою, і вирішення її може відбутися лише на основі нових нетрадиційних технологій прецизійної обробки оптичних поверхонь.

У лазерних системах запису, зчитування і відтворення інформації використовуються полігональні дзеркала, точність виконання кута пірамідальності граней яких не має перевищувати 2". Виготовлення таких дзеркал теж потребує розробки нової технології обробки ОП.

Складнощі при розробці нових оптичних технологій пов'язані ще й з тим, що до теперішнього часу деякі питання фізики і хімії обробки оптичних матеріалів ще не до кінця з'ясовані. Це відноситься, головним чином, до фінішних операцій обробки і, насамперед, до полірування. Механізм зняття оброблюваного матеріалу при поліруванні може бути остаточно вивчено тільки після вирішення хоча б основних проблем нанотрибології – розділу фізики, який набув у наш час великого значення та інтенсивно розвивається. Без наукових основ, які ще потрібно розробити в галузі нанотрибології, вченим і інженерам-технологам при розробці нових технологічних процесів все ще необхідно користуватись виключно емпіричними результатами і практичним досвідом.

З наведених прикладів видно, що перспективи розвитку оптичних технологій безпосередньо пов'язані з розвитком науки і техніки, потреби яких вони мають задовольняти на всіх рівнях: від появи ідей до їх практичного застосування.

Науковими дослідженнями в галузі оптичної технології та її впровадженням у виробництво займаються всесвітньо відомі наукові і виробничі центри, до яких належать: СОМ (Центр обробки оптики, США), фірми "Kodak" (США) та "Fujimi" (Японія), Державний оптичний інститут (ГОИ) ім. С.І.Вавилова (Росія), ЦКБ "Арсенал" (Україна) і багато інших.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рогов В.В. Финишная алмазно-абразивная обработка неметаллических деталей. – К.: Наук. думка, 1985. – 264 с.
2. Технология обработки оптических деталей / Под ред. М.Н.Семибратова. – М.: Машиностроение, 1975. – 208 с.
3. Ходаков Г.С., Кудрявцева Н.Л. Физико-химические процессы полирования оптического стекла. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
4. Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей. – М.: Машиностроение, 1979. – 264 с.
5. Цеснек Л.С., Сорокин О.В., Золотухин А.А. Металлические зеркала. – М.: Машиностроение, 1983. – 231 с.
6. Ардамацкий А.П. Алмазная обработка оптических деталей. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
7. Филатов Ю.Д., Рогов В.В. Новое в исследовании процесса полирования стекла инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия. – К. – 1993 – 32 с. – (Препр. / АН Украины. ИСМ им. В.Н.Бакуля).
8. Современные пути развития технологий обработки деталей оптики и электроники / Сборник статей и докладов под ред. В.В.Рогова, Ю.Д.Филатова. – НАН Украины. ИСМ им. В.Н.Бакуля. – К., 1998. – 71 с.

9. Формообразование оптических поверхностей / Под ред. К.Г.Куманина. – Гос. научн.-техн. изд-во. Оборонгиз, 1962. – 432 с.
10. Законников В.П., Быков Б.З., Штандель С.К. Основы автоматизации производства оптических деталей. – М.: Машиностроение, 1982. – 168 с.
11. Перерозин М.А. Справочник по алмазной обработке стекла. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
12. Справочник по производству стекла. Т.1 // Под ред. И.И.Китайгородского, С.И.Сильвестровича. – М.: Гос. изд-во литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. – 1026 с.
13. Винокуров В.М. Исследование процессов полирования стекла. – М.: Машиностроение, 1967. – 196 с.
14. Казаков Н.П., Горелик В.В. Изготовление асферической оптики. – М.: Машиностроение. 1978. – 248 с.
15. Свечников Г.С. Интегральная оптика. – К.: Наук. думка, 1988. – 166 с.
16. Методичні вказівки до спецкурсу "Технологія оптичного приладобудування" для студентів фізичного факультету / Упоряд. Л.В.Поперенко, В.С.Стащук. – К.: ВПЦ "Київський університет", 2002. – 47 с.
17. Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions. – Edited by K.J. Stout. – University of Huddersfield: Penton Press, 2000. – 358 p.

Додаткова література

1. Филатов Ю.Д., Рогов В.В. Особенности процесса полирования стекла инструментом со связанным полировальным порошком // Оптика и спектроскопия. – 1993. – Т. 74. – Вып. 6. – С. 1229–1235.
2. Филатов Ю.Д. Полирование алюмосиликатных материалов инструментом со связанным полировальным порошком // Сверхтвердые материалы. – 2001. – № 3. – С. 36–49.
3. Филатов Ю.Д. Определение оптимальной формы инструмента при полировании плоских оптических поверхностей // Трение и износ. – 1991. – Т. 12. – № 3. – С. 452–458.
4. Филатов Ю.Д. Механизм образования микрорельефа поверхности при обработке стекла // Сверхтвердые материалы. – 1991. – №5. – С. 61–65.
5. Филатов Ю.Д., Рогов В.В. Кластерная модель механизма усталостного износа SiO₂-содержащих материалов при их полировании инструментом со связанным полировальным порошком на основе диоксида церия // Сверхтвердые материалы. – Ч. 1. – 1994. – № 3. – С. 40–43; Ч. 2. – 1994. – № 4. – С. 48–52.
6. Филатов Ю.Д. Исследование точности формообразования плоских поверхностей оптических деталей при финишной алмазной обработке // Сверхтвердые материалы. – 1985. – № 2. – С. 61–66.
7. Рогов В.В., Филатов Ю.Д., Бурман Л.Л. Исследование процесса формообразования поверхностей оптических деталей из стекла при тонком алмазном шлифовании // Оптико-механическая промышленность. – 1985. – № 2. – С. 37–40.
8. Рогов В.В., Филатов Ю.Д., Чередник В.С., Друченко Л.М. Пути повышения точности формообразования оптических поверхностей // Сверхтвердые материалы. – 1985. – N 3. – С. 64–66.
9. Рогов В.В., Филатов Ю.Д., Бурман Л.Л. Износ алмазного инструмента при финишной обработке оптических деталей из стекла // Трение и износ. – 1985. – Т. 6, N 1. – С. 48–54.

10. Рогов В.В., Филатов Ю.Д., Денисенко А.П. и др. Работоспособность инструментов со связанным абразивом при полировании стекла // Оптико-механическая промышленность. – 1989. – № 1. – С. 35–37.

11. Филатов Ю.Д., Бурман Л.Л., Рогов В.В. Закономерности распределения диспергируемых частиц стекла по размерам // Сверхтвердые материалы. – 1989. – № 2. – С. 53–55.

12. Ю.Д.Филатов, В.В.Рогов, Н.Д.Рублев и др.Точность формообразования сферических поверхностей линз при полировании инструментом со связанным абразивом // Оптико-механическая промышленность. – 1990. – № 1. – С. 54–56.

13 Тауснев С.Д., Сахно В.Д., Рогов В.В., Филатов Ю.Д. и др. Полирование линз серийного производства инструментом со связанным абразивом // Оптико-механическая промышленность. – 1990. – № 3. – С. 68–69.

14. Рогов В.В., Бурман Л.Л., Филатов Ю.Д., Сидорко В.И. Прецизионное формообразование поверхностей деталей ИК техники и точной оптики из неметаллических материалов с использованием алмазного микроточения и полирования инструментом "Аквапол" // Вопросы оборонной техники. – Сер. 17: Наука – производству. – 1990. – Вып. 1(29). – С. 20–22.

15. Филатов Ю.Д., Рогов В.В., Рублев Н.Д. и др. Выбор компонентов связки инструмента для обработки оптического стекла // Оптико-механическая промышленность. – 1991. – № 1. – С. 66–67.

16. Филатов Ю.Д., Рогов В.В., Рублев Н.Д. и др. Точность формообразования поверхностей плоских оптических деталей инструментом "Аквапол" // Сверхтвердые материалы. – 1991. – № 3. – С. 54–58.

17. Филатов Ю.Д. Обеспечение точности формообразования плоских поверхностей оптических деталей при обработке методом притира // Там же. – 1991. – № 4. – С. 62–66.

18. Филатов Ю.Д., Рогов В.В., Громов К.С. Шероховатость поверхности при обработке стекла // Сверхтвердые материалы. – 1993. – № 4. – С. 42–46.

19. Филатов Ю.Д., Рогов В.В., Цегельнюк В.В. Характер износа полировального инструмента при формообразовании плоских и сферических поверхностей оптических деталей // Там же. – 1993. – № 5. – С. 40–45.

20. Филатов Ю.Д., Рогов В.В. Определение оптимальной формы инструмента для полирования цилиндрических поверхностей // Там же. – 1994. – № 2. – С. 47–51.

21. Дедков Г.В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170. – № 6. – С. 585–618.

22. Поперенко Л.В., Винніченко М.В. Вплив іонного бомбардування на оптичні властивості та мікрорельєф поверхонь нікелевих та мідних дзеркал // Вісн. Київ. ун-ту, Серія: фіз.-мат. науки. – 1997. – № 4. – С. 388–395.

23. Филатов Ю.Д., Сидорко В.И., Горбачев Г.Ф., Ящук В.П., Крамар В.Г., Скрябин В.В. Финишная обработка и контроль поверхности деталей из алюмосиликатных материалов // Сверхтвердые материалы. – К. – 2001. – № 5. – С. 70–75.

24. Новиков Н.В., Филатов Ю.Д., Сидорко В.И., Скрябин В.В., Крамар В.Г., Ящук В.П., Ляхов В.Н. Инструменты для финишной обработки деталей из неметаллических материалов // Инструментальный світ. – 2002. – № 2. – С. 4–6.

25. Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А. Устройство для бесконтактного контроля качества обработки поверхности оптических деталей и устройство для его осуществления: А.с. 1352201 А1 СССР, МКИ G 01 B 11/30. – № 3587598/24-28; Заявлено 26.04.83; Опубл. 15.11.87, Бюл. № 42. – 3 с.

26. Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А.. Устройство для бесконтактного контроля качества обработки поверхности деталей: А.с. 1499114 А1 СССР, МКИ G 01 В 11/30. – № 4285487/25-28; Заявлено 17.07.87; Опубл. 07.08.89, Бюл. № 29. – 3 с.

27. Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А.. Устройство для бесконтактного контроля качества обработки поверхности плоских деталей: А.с. 1649263 А1 СССР, МКИ G 01 В 11/30. – № 4371391/28; Заявлено 02.12.87; Опубл. 15.05.91, Бюл. № 18. – 3 с.

28. Дрозд П.И., Поперенко Л.В., Шайкевич И.А.. Устройство для бесконтактного контроля качества обработки поверхности деталей: А.с. 1712781 А1 СССР, МКИ G 01 В 11/30. – № 4815647/28; Заявлено 17.04.90; Опубл. 15.02.92, Бюл. № 6. – 3 с.

29. Филатов Ю.Д., Рогов В.В., Шарапа А.И. Способ контроля оптических деталей: А.с. 1013754 СССР, МКИ G 01 В 11/26. – № 3351377/25-28; Заявлено 04.11.81; Опубл. 23.04.83, Бюл. № 15. – 2 с.

30. Бурман Л.Л., Кизиков Э.Д., Рогов В.В., Ветров А.Г., Верник Е.Б., Горелик В.В., Маренков А.Н., Филатов Ю.Д.. Способ обработки оптических деталей: А.с. 1039697 СССР, МКИ В 24 В 13/00. – № 3401334/25-08; Заявлено 22.02.82; Опубл. 07.09.83, Бюл. № 33. – 5 с.

31. Филатов Ю.Д., Рогов В.В., Бурман Л.Л., Денисенко А.П., Чередник В.С., Калининко В.С. Способ обработки оптических деталей: А.с. 1077764 СССР, МКИ В 24 В 13/00. – № 3424902/25-08; Заявлено 22.04.82; Опубл. 07.03.84, Бюл. № 9. – 3 с.

32. Филатов Ю.Д., Рогов В.В., Бурман Л.Л., Иванов А.И., Пятак Е.Ф. Способ обработки плоских поверхностей оптических деталей: А.с. 1237387 СССР, МКИ В 24 В 7/00 // В 24 В 13/00. – № 3861471/25-08; Заявлено 04.03.85; Опубл. 15.06.86, Бюл. № 22. – 3 с.

33. Филатов Ю.Д., Рогов В.В., Рублев Н.Д., Дракин И.В., Г.Ф.Горбачев, В.С.Сперкач, М.Н.Прихно. Способ контроля полирующей способности полировального инструмента: А.с. 1764954 А1 СССР, МКИ В 24 В 1/00 // G 01 N 3/58. – № 4869269/08; Заявлено 06.08.90; Опубл. 30.09.92, Бюл. № 36. – 3 с.

34. Филатов Ю.Д., Рогов В.В., Рублев Н.Д., Дракин И.В.. Полировальный инструмент для обработки сферических поверхностей: А.с. 1657360 А1 СССР, МКИ В 24 D 17/00. – № 4467972/08; Заявлено 29.07.88; Опубл. 23.06.91, Бюл. № 23. – 3 с.

35. Филатов Ю.Д., Рогов В.В., Рублев Н.Д., Дракин И.В., Прихно М.Н., Тауснев С.Д., Сахно В.Д.. Полировальный инструмент: А.с. 1717326 А1 СССР, МКИ В 24 D 7/00. – № 4866386/08; Заявлено 25.06.90; Опубл. 07.03.92, Бюл. № 9. – 3 с.

36. Филатов Ю.Д., Рогов В.В., Рублев Н.Д., Дракин И.В., Прихно М.Н., Каряки В.Г., Остапчук В.П., Сергеев Л.С. Способ полирования сферических поверхностей: А.с. 1796416 А1 СССР, МКИ В 24 В 11/10. – № 4900637/08; Заявлено 10.12.90; Опубл. 23.02.93, Бюл. № 7. – 3 с.

37. Новіков М.В., Філатов Ю.Д., Сидорко В.І., Крамар В.Г., Скрябін В.В., Ляхов В.Н. Інструмент для фінішної обробки: Патент 51091 А. Україна, МПК 7 B24D7/00. – № 2001129157; Заявлено 28.12.2001; Опубл. 15.11.2002, Бюл. № 11. – 4 с.

38. Новіков М.В., Філатов Ю.Д., Сидорко В.І., Скрябін В.В., Крамар В.Г. Ма-са для виготовлення робочого шару абразивного інструменту: Патент 55047 А. Україна, МПК 7 B24D3/28. – № 2002065043; Заявлено 18.06.2002; Опубл. 17.03.2003, Бюл. № 3. – 4 с.

39. Новіков М.В., Філатов Ю.Д., Сидорко В.І., Скрябін В.В., Крамар В.Г. Ма-са для виготовлення робочого шару полірувального інструменту: Патент 55048 А. Україна, МПК В24D3/28, В24D3/34. – № 2002065044; Заявлено 18.06.2002; Опубл. 17.03.2003, Бюл. № 3. – 4 с.
40. Brown N.J. Some speculations on the mechanisms of abrasive grinding and polishing // *Precis. Eng.* – 1987. – Vol. 9. – P. 129–138.
41. Rogov V.V., Filatov Y.D., Kottler W., Sobol V.P. New technology of precision polishing of glass optics // *Optical Engineering*. – 2001. – Vol. 40, N 8, august– P. 1641–1645.
42. Drozd P.I., Poperenko L.V., Prorok V.V., Shaikovich I.A. The polarizational reflectometers of the metod of combined ellipsometric parameters // *Optical Engineering*. – 1995. – Vol. 34, N 4. – P. 1013–1015.
43. Townsend P.D., Chandler P.J., Zhang L. Optical effects of ion implantation // *Cambridge Univ. Press*, 1994. – 280 p.
44. Poperenko L.V., Vinnichenko M.V., Meleshchuk O.I. Modification of optical properties of metallic mirrors irradiated by different ions // *Proc. SPIE.*, 1997. Vol. 3237. – P. 94–98.
45. Stout J., Sullivan P.S. et al. The development of Methods for the Characterization of Roughness in Three Dimensions. – FUR 15178 EN of commission of the European Communities. – Birmingham: Univ. of Birmingham, 1993. – 358 p.
46. Hunderi O. Optics of rough surfaces, discontinuous films and heterogeneous materials // *Surf. Sci.*, 1980. – Vol. 96. – P. 1–31.
47. Kowalski Z.W. Ion-beam modification of surface geometrical properties of materials // *Electron technology*, 1998. – Vol. 31. – N 3 /4. – P. 477–486.

Навчальне видання

ПОПЕРЕНКО Леонід Володимирович
ФІЛАТОВ Юрій Данилович

Технологія обробки оптичних поверхонь

Навчальний посібник
для студентів фізичного факультету

Редактор *Л.П.Львова*
Технічний редактор *К.Г.Степаненко*

Оригінал-макет виготовлено Видавничо-поліграфічним центром "Київський університет"



Підписано до друку 31.12.04. Формат 60x84^{1/16}. Вид. № 497. Гарнітура Arial. Папір офсетний.
Друк офсетний. Наклад 100. Ум. друк. арк. 9,6. Обл.-вид. арк. 11,2. Зам. № 24-2312.

Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет"
01030, Київ, б-р Т.Шевченка, 14, кімн. 43,
☎ (38044) 239 3222; (38044) 239 3172; тел./факс (38044) 234 0105.
E-mail: vydav_polygraph@univ.kiev.ua
WWW: <http://vpc.univ.kiev.ua>

Свідоцтво внесено до державного реєстру ДК № 1103 від 31.10.02.