



Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»



С. А. Клименко, В. С. Антонюк,  
О. Ф. Саленко

**Надтверді матеріали  
інструментального призначення  
для автоматизованого  
виробництва**

Навчальний посібник



Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**С. А. Клименко, В. С. Антонюк, О. Ф. Саленко**

# **Надтверді матеріали інструментального призначення для автоматизованого виробництва**

**Навчальний посібник**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня доктора філософії  
за освітньою програмою «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології»  
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології  
та робототехніка»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2025

УДК 621.921.3-492.2:621.9.02](075.8)

К49

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
(протокол № 3 від 09.01.2025 р.)*

**Рецензенти:**

*В. Д. Ковальов*, д-р техн. наук, проф.,  
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, лауреат премії Кабінету  
Міністрів України за розроблення і впровадження інноваційних технологій,  
Донбаська державна машинобудівна академія

*В. М. Волокогон*, д-р техн. наук, проф., заслуж. діяч науки і техніки України,  
лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки,  
Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України

**Відповідальний редактор**

*Г. С. Тимчик*, д-р техн. наук, проф., лауреат премії Кабінету Міністрів України  
за розроблення і впровадження інноваційних технологій,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Клименко С. А.**

К49 Надтверді матеріали інструментального призначення для автоматизованого виробництва : навч. посіб. для здобувачів ступеня д-ра філософії за освітньою програмою «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології» спец. 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / С. А. Клименко, В. С. Антонюк, О. Ф. Саленко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2025. – 236 с.

Висвітлено найбільш поширені надтверді матеріали інструментального призначення, які використовуються в різних галузях народного господарства. Наведено загальні уявлення та класифікацію основних порошкових і полікристалічних надтвердих матеріалів, а також алмазо- та сBN-абразивних інструментів. Значну увагу приділено конструктивному виконанню алмазо- та сBN-вмісних інструментів та їх використанню для оброблення полімерних і композиційних матеріалів. Розглянуто процеси лезвійного та алмазно-абразивного оброблення деталей із швидкорізальних сталей та важкооброблюваних сплавів. Для кожного розділу надано контрольні запитання, що допоможе кращому сприйняттю та засвоєнню матеріалу посібника.

Для студентів і аспірантів за науковим напрямом «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Може бути корисним здобувачам освіти за спеціальностями «Прикладна механіка», «Матеріалознавство», «Галузеве машинобудування», а також для наукової роботи фахівцями із споріднених спеціальностей.

**УДК 621.921.3-492.2:621.9.02](075.8)**

© С. А. Клименко, В. С. Антонюк, О. Ф. Саленко, 2025

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	7
<b>РОЗДІЛ 1</b>	
<b>НАДТВЕРДІ МАТЕРІАЛИ.</b>	
<b>ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ</b> .....	9
Контрольні запитання .....	15
<b>РОЗДІЛ 2</b>	
<b>ПОРОШКИ З НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ</b> .....	18
<b>2.1. Порошки синтетичного алмазу</b> .....	18
2.1.1. Загальні відомості .....	18
2.1.2. Шліфпорошки синтетичного алмазу .....	20
2.1.3. Мікро- та субмікропорошки синтетичного алмазу .....	25
2.1.4. Нанопорошки синтетичного алмазу .....	26
<b>2.2. Порошки кубічного нітриду бору</b> .....	29
2.2.1. Загальні уявлення .....	29
2.2.2. Шліфпорошки кубічного нітриду бору .....	29
2.2.3. Мікро-, субмікро- та нанопорошки кубічного нітриду бору .....	32
Контрольні запитання .....	33
<b>РОЗДІЛ 3</b>	
<b>ПОЛІКРИСТАЛІЧНІ НАДТВЕРДІ МАТЕРІАЛИ</b> .....	34
<b>3.1. Загальні уявлення</b> .....	34
<b>3.2. Полікристалічні матеріали на основі синтетичного алмазу</b> .....	35
<b>3.3. Полікристалічні матеріали на основі кубічного нітриду бору</b> .....	38
<b>3.4. Алмазні матеріали, отримані CVD-методом, та гібридні композити на основі алмазу</b> .....	44
Контрольні запитання .....	49
<b>РОЗДІЛ 4</b>	
<b>АЛМАЗНО- та cBN-АБРАЗИВНІ ІНСТРУМЕНТИ</b> .....	50
<b>4.1 Інструменти із порошками НТМ</b> .....	50
<b>4.2. Типи зв'язок алмазовмісного шару та методи викладання алмазних зерен</b> .....	52
4.2.1. НТМ-композити на металевій зв'язці .....	52
4.2.2. Гальванічна зв'язка .....	53
4.2.3. НТМ-композити на органічній зв'язці .....	53
4.2.4. НТМ-композити на керамічній зв'язці .....	55
4.2.5. Композити, що адаптуються до умов навантаження .....	59
4.2.6. Викладання алмазовмісного шару .....	60
4.2.6.1. Інструменти з упорядкованим розташуванням зерен НТМ .....	60
4.2.6.2. Дозоване та кероване викладання зерен алмазу .....	63
<b>4.3. Конструктивні виконання алмазо- та cBN-вмісних інструментів</b> .....	65
4.3.1. Шліфувально-полірувальні та відрізні круги на різних зв'язках ..	65
4.3.2. Алмазні інструменти для правки .....	67
4.3.3. Інструменти для суперфінішування .....	74

4.3.4. Інструменти для хонінгування .....	75
4.3.5. Доводочні пасти і суспензії .....	79
4.3.6. Трубочасті свердла та коронки .....	83
4.3.7. Стрічки з НТМ та інструменти на їх основі .....	84
4.3.8. Інструмент із обмеженою жорсткістю. Пелюсткові круги із НТМ, алмазовмісні шнури та пилки .....	87
4.3.8.1. Пелюсткові круги із НТМ .....	87
4.3.8.2. Еластичні інструменти з полімерно-абразивною різальною частиною .....	91
4.3.8.3. Алмазовмісні пилки реноватора та шрури .....	94
4.3.9. Інструменти для комбінованих методів оброблення .....	96
4.3.10. Інструменти із НТМ для оброблення холодним поверхневим пластичним деформуванням .....	101
4.3.11. Інструменти для фінішного оброблення зубчастих коліс .....	103
<b>4.4. Інструменти для оброблення гуми, полімерних та деревинних композиційних матеріалів, скла та каменю .....</b>	<b>106</b>
4.4.1. Інструменти для оброблення полімерних та композиційних матеріалів .....	106
4.4.2. Інструменти для фінішного оброблення виробів зі скла .....	112
4.4.3. Інструменти для оброблення природного та штучного каменю ..	114
Контрольні запитання .....	115
<b>РОЗДІЛ 5</b>	
<b>ІНСТРУМЕНТИ З ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ НТМ .....</b>	<b>116</b>
<b>5.1. Загальні уявлення .....</b>	<b>116</b>
<b>5.2. Лезові інструменти із НТМ .....</b>	<b>119</b>
5.2.1. Різці з монокристалів алмазу .....	119
5.2.2. Різальні пластини та вставки з ПНТМ .....	120
5.2.3. Різці з різальними елементами із ПНТМ .....	121
5.2.4. Фрези з різальними елементами із ПНТМ .....	125
5.2.5. Інструменти для оброблення отворів .....	127
<b>5.3. Особливості інструментів з різальними елементами із НТМ .....</b>	<b>128</b>
5.3.1. Інструменти з різальними елементами із монокристалів природного алмазу .....	129
5.3.2. Інструменти з різальними елементами із ПНТМ на основі синтетичного алмазу .....	131
5.3.3. Інструменти з різальними елементами із ПНТМ на основі щільних модифікацій нітриду бору .....	132
<b>5.4. Інструменти для зварювання (наплавлення) тертям з перемішуванням .....</b>	<b>133</b>
<b>5.5. Інструменти для вигладжування та накатування .....</b>	<b>134</b>
<b>5.6. Інструменти для алмазно-електрохімічного оброблення .....</b>	<b>136</b>
Контрольні запитання .....	142

<b>РОЗДІЛ 6</b>	
<b>АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ</b> .....	143
<b>6.1. Фізичні основи процесу</b> .....	143
<b>6.2. Шліфування</b> .....	144
6.2.1. Оброблення деталей з інструментальних та швидкорізальних сталей .....	144
6.2.2. Оброблення інструментів з вольфрамівмісних та безвольфрамових твердих сплавів .....	145
6.2.3. Оброблення інструментальної кераміки .....	150
6.2.4. Оброблення магнітотвердих сплавів .....	154
<b>6.3. Прецизійне правлення абразивних інструментів</b> .....	156
<b>6.4. Комбінована оброблення</b> .....	161
<b>6.5. Фінішні методи оброблення</b> .....	163
6.5.1. Суперфінішування .....	163
6.5.2. Хонінгування .....	165
6.5.3. Оброблення стрічками із НТМ та інструментами на їх основі ....	168
6.5.4. Оброблення пелюстковими кругами .....	170
6.5.5. Фінішне оброблення зубчастих коліс кругами із НТМ .....	170
<b>6.6. Доведення та полірування</b> .....	172
6.6.1. Устаткування для доведення плоских поверхонь .....	172
6.6.2. Оброблення пастами та суспензіями .....	173
<b>6.7. Оброблення скла</b> .....	177
<b>6.8. Оброблення гуми, полімерних композиційних та деревних матеріалів</b> .....	181
Контрольні запитання .....	184
<b>РОЗДІЛ 7</b>	
<b>ОБРОБЛЕННЯ ЛЕЗОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ ТА ІНСТРУМЕНТОМ ДЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ</b> .....	185
<b>7.1. Оброблення інструментами з монокристалами природного алмазу</b> .....	185
<b>7.2. Оброблення інструментами, оснащеними ПНТМ на основі алмазу</b> .....	190
<b>7.3. Оброблення інструментами, оснащеними ПНТМ на основі щільних модифікацій нітриду бору</b> .....	197
7.3.1. Загальні відомості .....	197
7.3.2. Оброблення інструментами, оснащеними композитами групи ВН .....	199
7.3.3. Оброблення інструментами, оснащеними композитами групи ВЛ .....	203
<b>7.4. Оброблення волокнистих композиційних матеріалів лезовим інструментом</b> .....	209
<b>7.5. Виглажування і накатування інструментами з композитами на основі алмазу</b> .....	211

<b>7.6. Алмазно-електрохімічне оброблення полікристалічними</b>	
<b>катодами .....</b>	<b>212</b>
Контрольні запитання .....	217
<b>РОЗДІЛ 8</b>	
<b>ПОКРИТТЯ В ІНСТРУМЕНТАХ З НТМ .....</b>	<b>218</b>
<b>8.1. Покрыття для порошків НТМ .....</b>	<b>218</b>
<b>8.2. Покрыття на композитах на основі НТМ .....</b>	<b>222</b>
8.2.1 Покрыття на композитах на основі алмазу .....	222
8.2.2. Покрыття на композитах на основі кубічного нітриду бору .....	223
Контрольні запитання .....	233
<b>ЗАКЛЮЧЕННЯ .....</b>	<b>234</b>
<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....</b>	<b>235</b>

## ВСТУП

Кілька століть видатні вчені світу А. Лавуазьє, К. Деві, В. Каразін, Г. Муассан, П. Бріджмен працювали над проблемою керованої реалізації фазового перетворення вуглецю з графіту в алмаз. Теоретичне передбачення фізико-хімічних основ фазового перетворення вуглецю виконано харківським вченим О.І. Лейпунським та опубліковано в академічному журналі «Успіхи хімії» у 1939 р.

Вперше лабораторний синтез алмазу виконано в лютому 1953 р. у Швеції в лабораторії фірми «АСЕА», а потім незалежно повторено у США в грудні 1954 р. в лабораторії фірми «Дженерал Електрик».

Промислове виробництво синтетичних алмазів у США розпочато в 1957 р.

У 1961 р. в Києві створено Інститут надтвердих матеріалів Держплану України, завданням якого було створення промислової технології синтезу алмазу та організація його масового виробництва.

У 1972 р. О.І. Лейпунському було вручено диплом на відкриття, що визначило успіх експериментальних робіт із синтезу алмазу в світі.

Сьогодні наявність виробництва та рівень застосування надтвердих матеріалів є одним з найважливіших показників стану промисловості технічно розвинених країн.

Широке застосування надтвердих матеріалів у сучасному промисловому виробництві обумовлює можливість високоефективного механічного оброблення виробів з найбільш високоміцних і важкообробних конструкційних і функціональних матеріалів, питома використання яких у новій техніці безперервно зростає.

Це, перш за все, відноситься до автомобіле- та верстатобудування, виробництва авіатехніки, створення ракетно-космічних конструкцій, виготовлення елементів оптики, електроніки та електротехніки, виготовлення ювелірних прикрас, виробів з високоміцних абразивних будівельних матеріалів – каменю, композиційних матеріалів тощо.

Надзвичайної актуальності набуває використання надтвердих матеріалів в умовах Світової Глобалізації та Індустрії 4.0, оскільки при цьому передбачається створення умов високонадійного та стабільного машинного виробництва, що максимально підвищує надійність автоматизованих технологічних систем.

Інструменти з надтвердих матеріалів визначають ефективність буріння нафтових та газових свердловин, виконання будівельних та ремонтних робіт із залізобетонними конструкціями. До особливостей інструментів із синтетичного алмазу та кубічного нітриду бору відносяться найвища твердість, високі зносостійкість, теплопровідність, корозійна стійкість, низький коефіцієнт тертя, а отже, малий знос, надійність, довговічність, великий робочий ресурс, стійкість у різальних інструментах, можливість виготовлення гострих лезових, абразивних інструментів, що самозаточуються.

Застосування алмазних інструментів незамінне при виробництві виробів зі скла, напівпровідникових, полімерних композиційних матеріалів, деревно-стружкових композитів, технічної кераміки з високою чистотою поверхні, а також при отриманні прецизійних за розмірами та геометричними параметрами виробів.

Використання інструментів із надтвердих матеріалів значно підвищило продуктивність праці в механічному обробленні, забезпечило отримання обробленої поверхні виробів високої якості та ефективного виготовлення унікальних складнопрофільних виробів.

Слід зазначити ефективність різальних інструментів на основі надтвердих матеріалів для ремонтного виробництва: у процесі оброблення наплавлених і напилених покриттів при ремонті деталей автомобілів, сільгосптехніки, металургійних машин.

Для розвитку сучасного автоматизованого виробництва особливе значення має подальше вдосконалення технологій механічного оброблення, оскільки на цей процес припадає до 40% загальної трудомісткості виготовлення машин. Із вдосконаленням машин обсяг механічного оброблення буде збільшуватися, основна увага приділятиметься фінішним технологіям, де застосування інструментів із надтвердих матеріалів є найбільш ефективним.

Удосконалення технологій отримання надтвердих матеріалів із заданим комплексом властивостей, створення нових продуктів на базі надтвердих матеріалів для інструментального застосування є найважливішим елементом наукомісткої основи забезпечення ефективності сучасного комп'ютерно-керованого виробництва, що відповідає концепції «Індустрія 4.0» та напрямкам ефективного розвитку вітчизняного машино та приладобудівного комплексу в цілому.

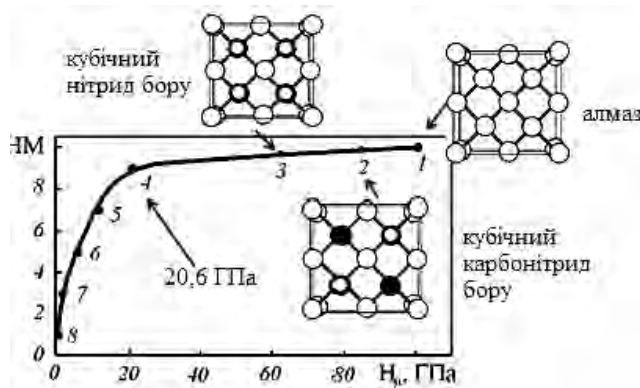
Навчальний посібник призначений для аспірантів що навчаються за напрямом підготовки доктора філософії за науковим напрямом спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», при вивченні дисциплін «Прикладна механіка», «Матеріалознавство», «Галузеве машинобудування».

## РОЗДІЛ 1

## НАДТВЕРДІ МАТЕРІАЛИ. ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ І КЛАСИФІКАЦІЯ

До цього часу немає фізичних підстав виділення надтвердих матеріалів в окремий клас. Академік НАН України П.С. Кислий зазначає, що таке виділення може бути засноване лише на якості самої властивості – величині твердості. Обмеження твердості для надтвердих речовин можливе при спільному аналізі співвідношення їх твердості за шкалою Моосу і мікротвердості (рис. 1.1). Дев'ять одиниць твердості за шкалою Моосу включають усі природні речовини і вони мають твердість нижче твердості корунду – 20600 МПа. Десята одиниця твердості відповідає алмазу. Це дає підстави запропонувати таке визначення поняття «надтверді речовини»: – природні та синтетичні ковалентні речовини, що мають твердість, вищу за корунд.

Другим за твердістю матеріалом є кубічний карбонітрид бору  $cBC_2N$ , а третім – кубічний нітрид бору  $cBN$  (табл. 1.1). Слід зазначити, що кубічний карбонітрид бору  $cBC_2N$  отримано у вигляді відносно малих частинок, що не дозволяє використовувати його в абразивних та лезових інструментах.



**Рис. 1.1.** Співвідношення твердості за шкалою Моосу (НМ) і мікротвердістю різних матеріалів: 1 – алмаз; 2 – кубічний карбонітрид бору; 3 – кубічний нітрид бору; 4 – корунд; 5 – кварц; 6 – апатит; 7 – кальцит; 8 – тальк

Мікротвердість багатьох керамічних (наприклад,  $B_4Si$ ,  $SiC$ ,  $AlB_{12}$ ,  $Si_3N_4$ ) та металоподібних тугоплавких сполук (наприклад,  $WB$ ,  $TiC$ ,  $TiN$ ,  $VC$ ,  $HfB_2$ ) перевищує вказану величину, однак, за своїми фізико-механічними властивостями вони значно поступаються алмазу і кубічному нітриду бору і можуть використовуватися в інструментах для механічного оброблення лише в окремих випадках.

Унікальний комплекс фізико-механічних властивостей алмазу та інших надтвердих матеріалів (НТМ) визначається малою відстанню між атомами, спрямованою ковалентним зв'язком атомів у кристалічній решітці, великою локалізацією валентних електронів та утворенням найбільш енергетично стійких електронних конфігурацій на субатомному рівні.

Виняткову твердість трьох основних надтвердих матеріалів – алмазу, кубічного карбонітриду бору та кубічного нітриду бору пов'язують із симетричним напрямом атомних зв'язків у кристалі (рис. 1.1).

**Табл. 1.1. Механічні властивості надтвердих матеріалів при кімнатній температурі**

НТМ	Мікротвердість, ГПа	Твердість по Кнупу, ГПа	Модуль Юнга, ГПа	Коефіцієнт тріщиностійкості $K_{Ic}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>
cBN	62	44	909**	3
cBC <sub>2</sub> N	76	55	980	4,5
Алмаз*	115	63	1141	5

\* Монокристал; \*\* Розраховано за пружним постійним монокристалічного cBN

За основний класифікаційний критерій надтвердих матеріалів приймають характеристику структурної будови, виходячи зі ступеня кристалічності, числа фазових складових і однорідності структури. У цьому можна назвати три основні групи НТМ [1, 2]. До першої групи віднесемо монокристали НТМ, до другої – однорідні полікристалічні НТМ (ПНТМ), до третьої – однорідні та неоднорідні композити.

Іншою класифікаційною характеристикою, що розділяє групи НТМ, вважають технологію отримання. Технологією визначаються багато особливостей структурного стану НТМ, внутрішня та поверхнева дефектність, характер входження до структури домішок, а отже, і основні фізико-хімічні властивості. Для кожної із зазначених груп можна виділити три підгрупи, що розрізняються за способами одержання НТМ.

До першої з них відносяться способи отримання НТМ при екстремально високих статичних та динамічних тисках та високій температурі. До другої – гаряче ізостатичне пресування при високому тиску в газостатах, електророзрядне спікання під високим тиском. У цих способах досягається робочий тиск 10...20 МПа, але при цьому реалізується найбільш повною мірою всебічне стиснення в ізотермічних умовах. До третьої підгрупи відносяться лазерний синтез, плазмове осадження, детонаційне наплення, тобто способи, де високий тиск досягається у твердому тілі внаслідок перехідних термодинамічних процесів.

Класифікація НТМ ґрунтується на відмінностях у структурному стані та обліку особливостей технології отримання НТМ (табл. 1.2).

Надтверді матеріали ділять на дві великі групи – на основі алмазу та на основі кубічного нітриду бору.

НТМ випускають у вигляді порошків або полікристалів (ПНТМ), а також використовують у складі інструментальних композиційних матеріалів як наповнювачі.

Деякі фізико-механічні характеристики основних класів інструментальних матеріалів наведено у табл. 1.3.

На рис. 1.2 наведено дані про твердість і тріщиностійкість НТМ та кераміки. Існує закономірна кореляція – зростання тріщиностійкості при зниженні твердості. Комплекс властивостей – твердість та тріщиностійкість, визначають зносостійкість різця, а разом із міцністю – ймовірність його руйнування. Таким чином, вибір матеріалу для різального інструменту – це завжди компроміс між його механічними властивостями. При цьому також необхідно враховувати умови роботи інструменту, вид оброблення, характер хімічної взаємодії інструментального та оброблюваного матеріалу.

Велике значення для інструмента має співвідношення коефіцієнтів тертя інструментального та оброблюваного матеріалів (табл. 1.4). Це співвідношення визначає величину сили тертя у контактній зоні, а отже, надійність і стійкість різця. Як правило, НТМ (особливо на основі алмазу) мають нижчий коефіцієнт тертя, ніж традиційні

інструментальні матеріали. Це робить їхнє застосування особливо вигідним для чистових операцій оброблення.

**Табл. 1.2. Класифікація надтвердих матеріалів**

Структура	Основа матеріалу	Спосіб отримання
Монокристали	Вуглець	Кристалізація з розплаву за високого динамічного тиску, пряма перебудова решітки. Кристалізація з розплаву при високому статичному тиску. Кристалізація при низькому тиску з розплавів та розчинів, епітаксійне осадження. Лазерне та радіаційне опромінення, плазмове осадження, детонаційне напилення
	cBN	Фазове перетворення або кристалізація з розплаву за високого динамічного тиску, пряма перебудова решітки. Кристалізація з розплаву при високому статичному тиску. Кристалізація при низькому тиску з розчинів та розплавів, епітаксійне осадження. Лазерне та радіаційне опромінення, плазмове осадження
Полікристали	Вуглець	Високотемпературне спікання за високого динамічного тиску. Високотемпературне спікання при високому статичному тиску. Гаряче ізостатичне пресування та спікання в газостатах. Епітаксіальне осадження
	cBN	Високотемпературне спікання за високого динамічного тиску. Високотемпературне спікання при високому статичному тиску. Гаряче ізостатичне пресування та спікання в газостатах. Епітаксіальне осадження
Композити (однородні і неоднородні)	Вуглець	Високотемпературне спікання за високого динамічного тиску. Високотемпературне спікання при високому статичному тиску. Гаряче ізостатичне пресування та спікання в газостатах. Лазерне опромінення, плазмове осадження, детонаційне напилення
	cBN	Високотемпературне спікання за високого динамічного тиску. Високотемпературне спікання при високому статичному тиску. Гаряче ізостатичне пресування та спікання в газостатах. Лазерне опромінення, плазмове осадження, детонаційне напилення

До найважливіших фізичних властивостей інструментального матеріалу відноситься теплопровідність. Це зв'язано з тим, що у процесі оброблення в зоні різання миттєві значення контактної температури сягають 1000...2000 К. Відведення тепла сприяє зниженню температури різання, досягненню необхідних параметрів стану поверхневого шару виробів, довговічності різців, алмазних кругів. Висока температура в зоні оброблення не тільки погіршує якість оброблення, а й призводить до зростання залишкових напружень у поверхневому шарі деталі.

На рис. 1.3 наведено дані про теплопровідність різних НТМ у порівнянні з міддю – одним з найбільш теплопровідних матеріалів. Видно, що НТМ на основі алмазу мають більш високу теплопровідність.

Табл. 1.3. Фізико-механічні характеристики інструментальних матеріалів

Матеріал	Твердість HRC, HRA*	Мікро- твердість, ГПа	Границя міцності (ГПа) під час		Теплостій- кість, К	Температурний коефіцієнт лінійного розширення, $\times 10^{-6}, K^{-1}$
			згинання	стискання		
Швидко- різальна сталь	62...67	–	2,00...6,00	2,5...4,0	900...1000	9,0...12,0
Твердий сплав	88...89*	13...14	0,75...2,60	3,5...5,9	1100...1300	3,0...7,5
Мінерало- кераміка	91...94*	20...23	0,25...0,60	1,3...3,0	1500	6,3...9,0
ПНТМ на основі алмазу	–	60...100	0,90...1,00	0,4...5,0	800	–
ПНТМ на основі cBN	–	30...40	0,40...1,50	2,0...6,5	1200	4,9...7,9

Табл. 1.4. Коефіцієнти тертя надтвердих матеріалів на основі алмазу

Матеріал	Алмаз		
	природний	синтетичний	полікристалічний
Мідь М1	0,05...0,07	0,10...0,14	0,16...0,22
Латунь Л62	0,05...0,07	0,10...0,13	0,16...0,24
Алюмінієвий сплав Ал25	0,09...0,11	0,18...0,19	0,30...0,32
Алюмінієвий сплав Ал26	0,10...0,12	0,20...0,22	0,32...0,35
Магнієвий сплав МА-8	0,07...0,08	0,14...0,16	0,18...0,21
Бронза Бр.АЖ9-4	0,09...0,10	0,17...0,19	0,25...0,28
Сталь 20	0,05...0,10	0,14...0,17	0,20...0,25

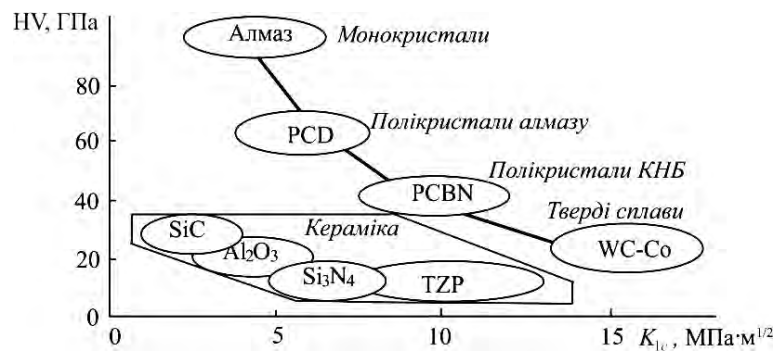


Рис. 1.2. Механічні властивості найбільш твердих матеріалів

Орієнтовні області використання інструментальних НТМ у варіантах порошків та ПНТМ представлені у табл. 1.5. Практичний досвід показує, що різні види НТМ мають сфери кращого використання.

Так, порошки з НТМ застосовують в основному для абразивних, правлячих, каменеобробних інструментів в технологіях оброблення неметалічних матеріалів, що особливо важко обробляються, а також використовуються як сировина для виготовлення полікристалів і композиційних матеріалів.

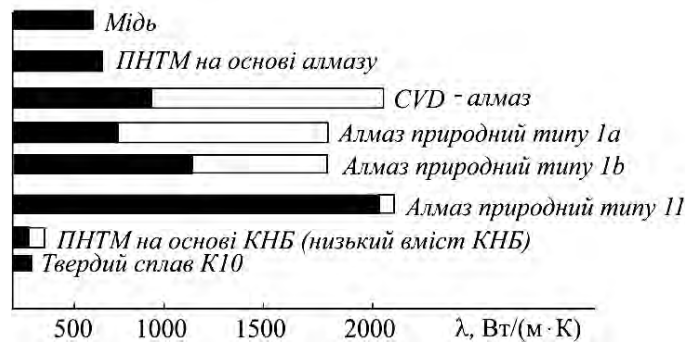


Рис. 1.3. Теплопровідність алмазу й інших матеріалів

ПНТМ використовуються як лезові інструменти при точінні й фрезеруванні високоміцних високоабразивних як металевих, так і неметалевих матеріалів: алюмінієвих сплавів зі значним вмістом кремнію, вугле- та склопластиків, високоміцних сталей і жароміцних сплавів, термооброблених (насамперед загартованих) сталей, армованих та ламінованих матеріалів. При цьому найбільш суттєво розрізняються інструменти на основі алмазу та cBN. Причина – хімічна нестабільність алмазу за високих температур у присутності матеріалів на основі заліза.

Незважаючи на те, що твердість cBN дещо нижча за твердість алмазу, його хімічна інертність і температурна стабільність до 1300...1500 К робить інструменти, оснащені cBN, незамінними при обробленні загартованих сталей, жароміцних сплавів і наплавлених покриттів на основі металів групи заліза (Fe).

В алмазно- і cBN-абразивному інструменті робоча частина включає зерна порошку НТМ, які розподілені і міцно закріплені в суцільній або порожнинній матриці (зв'язці). Для виготовлення такого інструменту використовують переважно шліф-, мікропорошки синтетичного алмазу та cBN. Алмазо- і cBN-вмісні шари матеріалу міцно з'єднані з корпусом інструменту методами склеювання, паяння, зварювання. На відміну від інструменту зі звичайних абразивів (SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), наявність корпусу дозволяє використовувати алмазовмісний та cBN-шар до повного зносу.

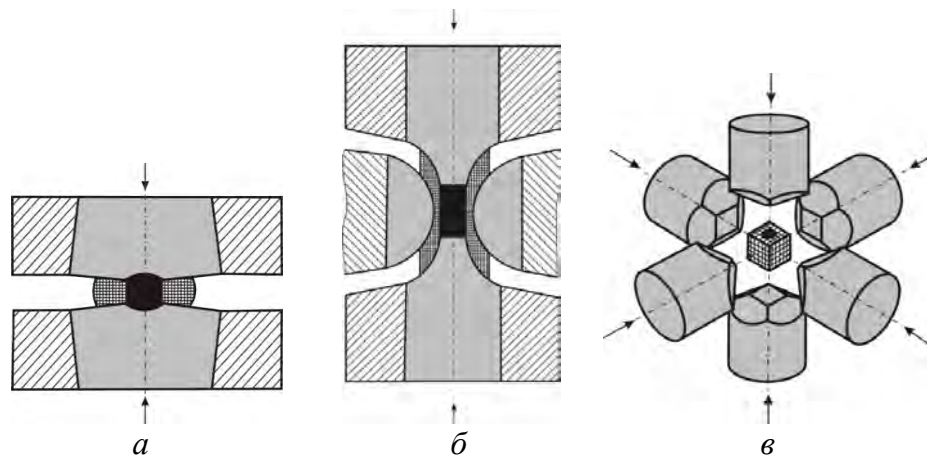
Алмазо- і cBN-вмісний шар інструменту являє собою композиційний матеріал з матричною структурою, в якій один з компонентів є безперервною фазою (зв'язування), а інший (зерна алмазу або cBN) – рівномірно розподілений у ній у вигляді включень. Основною проблемою розробки таких матеріалів є забезпечення міцного закріплення частинок твердої фази в матриці з одночасним максимальним збереженням її хімічної індивідуальності за умов експлуатаційного навантаження.

При розробці абразивних композицій із НТМ прагнуть того, щоб інструмент, виготовлений на їх основі, працював у режимі самозаточування. При цьому в міру зносу та притуплення зерен алмазу зношується зв'язка та оголюються нові зерна. Якщо зв'язка зношується повільніше абразивних зерен – інструмент втрачає різальні властивості, якщо швидше – відбувається інтенсивне зношування алмазовмісного шару.

Різальні елементи з полікристалічних НТМ випускають у двох виконаннях: цілісні (без підкладки) та двошарові (з підкладкою, як правило, твердосплавною). З них виготовляють багатогранні різальні пластини. Якщо конструкція інструменту з механічним кріпленням пластин технічно неможлива, то застосовують паяний інструмент з полікристалічних НТМ, оснащений змінними вставками, або цільний. Наявність підкладки дозволяє підвищити міцність різальних елементів, зменшити товщину полікристалічних шарів НТМ, здійснювати паяння пластини безпосередньо до корпусу різального інструменту.

Двошарові пластинки зазвичай мають стандартну циліндричну або призматичну форму. У випадку необхідності отримання профільної пластинки її розрізають лазерно-струминним методом (Water Jet Guided Laser). Перевага цього способу полягає у тому, що завдяки одночасній дії імпульсного лазерного випромінювання та компактного водяного струменя високого тиску зона руйнування залишається локалізованою в мікрообсягах, і пошкодження поверхневих шарів пластинки не відбувається.

На рис. 1.4 схематично наведені основні типи апаратів високого тиску, якими оснащуються преса для синтезу та спікання надтвердих матеріалів.



**Рис. 1.4. Схеми апаратів високого тиску:** *а* – ковадло з поглибленням (АВТ типу «тороїд»); *б* – АВТ циліндричного типу («belt»); *в* – шестіпуансонний АВТ (● – реакційна зона; ● – матриці та пуанسونи з твердого сплаву)

Кристалізація і спікання надтвердих матеріалів здійснюються головним чином у АВТ за тисків 4...12 ГПа та температур 1200...2000 °С. Ці апарати розміщуються в робочому просторі потужних гідравлічних пресів із зусиллям 5...100 МН, а в низці випадків – 140 і 500 МН. Подібна техніка знайшла також застосування в дослідженнях у галузі хімічних технологій, геофізики тощо. Витрати на виготовлення та експлуатацію АВТ є найвагомішою складовою собівартості виробництва НТМ – до 62% усіх прямих витрат.

До основних елементів АВД належать: – деформований контейнер із вихідним порошковим матеріалом, нагрівачами, теплозахисними екранами; – основна робоча вставка апарату; – елементи силової підтримки (блок сталевих кілець); – опорні плити; – прокладочні легкодеформовані неметалеві матеріали для ущільнення робочої зони.

Величина досягнутого тиску, його розподіл у реакційному об'ємі, ефективність і термін служби ковадла багато в чому визначаються вибором середовища, що передає тиск. До такого середовища висувають низку вимог: – воно повинно створювати, передавати в реакційний об'єм і утримувати високий тиск; – в умовах високих тисків

воно повинно пластично деформуватися, мати досить низький опір зсуву і високе внутрішнє тертя на контакті з поверхнею матриць. Ця властивість необхідна для обмеження витікання матеріалу і герметизації камери. Крім того, матеріали контейнерів мають бути термостійкими, хімічно інертними до середовища кристалізації НТМ, мати низьку тепло- і електропровідність, гарну здатність до пресування, низьку вартість, містити нетоксичні вихідні компоненти.

Традиційно найбільш застосовними матеріалами деформівних ущільнень є літографський камінь (основний компонент –  $\text{CaCO}_3$ ) і його різновиди: пірофіліт (алюмосилікат), а також компоненти на їхній основі.

Одним із критеріїв ефективності використовуваних матеріалів контейнерів АД є оцінка розподілу в реакційному об'ємі тиску і температури. Їхнє вимірювання і контроль становлять досить складне завдання, і водночас забезпечення такого контролю – один із головних напрямів у вдосконаленні апаратури для синтезу НТМ.

Для оцінки тиску в камері синтезу використовують метод калібрування за кімнатної температури, заснований на зіставленні зусилля преса і тиску поліморфного перетворення в реперній речовині.

Найбільш відповідальним елементом АД є матриця. Тиски, необхідні для синтезу надтвердих матеріалів, перевищують міцність матеріалів на одновісне стиснення. Тому до матеріалів матриць висуваються особливі вимоги: високий опір стисненню і вигину за підвищених температур у поєднанні з достатньою в'язкістю за середніх температур, стійкість до теплових ударів, висока малоциклова втома.

Більшість конструкцій АД, що працюють при тисках вище 4,5 ГПа, розрахована на використання матриць виключно з вольфрамівмісного твердого сплаву.

Поряд з традиційними твердосплавними матеріалами для синтезу ВТМ успішно використовуються інструментальні сталі, наприклад Р6М5. Найефективніше використання АД зі сталевими матрицями для синтезу порошку алмазу марок АС15-АС160, а також сBN. Для синтезу порошку алмазу з розвиненою питомою поверхнею марок АС2-АС6, що синтезуються за більш високих значень тиску і температури, більш ефективно застосування твердосплавної апаратури.

### Контрольні запитання

1. Які матеріали відносяться до групи надтвердих?
2. Якими властивостями характеризуються надтверді матеріали?
3. Надтверді моно- і полікристали, надтверді коспозити.
4. Основні типи апаратів високого тиску.
5. Області використання надтвердих матеріалів.

Табл. 1.5. Області використання інструментальних НТМ

Вид НТМ 1	Стан абразиву 2	Вид інструменту 3	Орієнтовна область використання 4
Синтетичний hr-ht моно- або полікристалічний алмаз	Порошок, зв'язаний абразив	Абразивний на металевій зв'язці	Для попередньої операції, що потребують з'єму порівняно великих припусків, для заточки інструментів з твердого сплаву, профільного шліфування, розрізання і шліфування виробів зі спеціальної кераміки, важкооброблюваних матеріалів
		Абразивний на гальванічній зв'язці	Для розрізання і шліфування виробів з кераміки, напівпровідників, скла, технічного скла, фактурної обробки каменю; ручної обробки штампів з твердих сплавів, штампів і легованих сталей; виготовлення правлячого інструменту
		Абразивний на керамічній зв'язці	Для шліфування деталей з твердих сплавів, різальних пластин з композитів, комбінованих виробів «сталь-твердий сплав»
		Абразивний на органічній зв'язці	Для заточки різального інструменту з твердих сплавів, обробки деталей з композитів і кераміки; для високоточного розрізання виробів з твердого сплаву, кераміки, кольорових металів, кварцового скла, феритів, кварцю
		Абразивний на паперовій або тканинній основі	Для фінішних операцій, притириці та полірування з метою отримання поверхонь з шорсткістю $Ra$ 0,03–0,08
	Порошок, вільний абразив	Абразивний у вигляді пасти або суспензії	Для обробки особливо точних металевих і неметалевих деталей з високими вимогами до шорсткості поверхні
		Абразивний у вигляді порошку синтетичного алмазу	

Закінчення табл. 1.5

1	2	3	4
Моно- або полікристалічний кубічний нітрид бору	Порошок, зв'язаний абразив	Абразивний на керамічній зв'язці	Для обробки високоточних деталей зі сталей та сплавів з матеріалів твердістю $HRC > 50$ , зносостійких покриттів
		Абразивний на органічній зв'язці	Для операції заточки інструментів з швидкорізальних сталей, шліфування стружкових канавок, відрізання і прорізання пазів як з використанням так і без MOC
		Абразивний на паперовій або тканинній основі	Для фінішних операцій, притирці та полірування з метою отримання поверхонь з шорсткістю $Ra$ 0,03–0,08
		Абразивний у вигляді пасти або суспензії	Для обробки особливо точних металевих і неметалевих деталей з високими вимогами до шорсткості поверхні
Монокристали синтетичного hr-ht алмазу	Порошок, вільний абразив	Абразивний у вигляді порошку кубічного нітриду бору	Для обробки високоточних виробів з кольорових сплавів, для обробки холодним пластичним деформуванням (накачуванням, обкатуванням та ін.), правлення шліфувальних кругів одно- і багатокристалічними інструментами
		Лезовий, деформуючий, абразивний	Для правлення шліфувальних кругів, обробки високоточних виробів з кольорових сплавів
		Абразивний, лезовий	Для обробки виробів з кольорових металів і сплавів, Ti-сплавів, твердих сплавів, ПКМ, армованих зміцнюючими і абразивними складовими, ДСК, каменю (мармур, граніт)
Моно- або полікристалічний CVD алмаз	Лезовий із ПСА зі зв'язкою на основі Со	Лезовий із ПСА зі зв'язкою на основі SiC	Для правлення шліфувальних кругів, обробки високоточних виробів з кольорових сплавів
		Лезовий із ПСА зі зв'язкою на інших основі	Для обробки виробів зі сплавів на основі Fe, Ni, Со у загартованому стані на попередньому та фінішному переходах
		Лезовий із ПКНБ групи ВН	
Полікристалічні НТМ на основі кубічного нітриду бору (ПКНБ)	Порошок, зв'язаний абразив	Лезовий із ПКНБ групи ВЛ	
		Лезовий із ПКНБ групи ВС	
		Лезовий із ПКНБ групи ВС	

## РОЗДІЛ 2

## ПОРОШКИ З НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

## 2.1. Порошки синтетичного алмазу

## 2.1.1. Загальні відомості

Алмазний порошок – це сукупність кристалів та полікристалів розміром не більше 3000 мкм [1–3]. Вони поділяються на чотири основні групи: шліфпорошки (з розміром зерен від 40 до 2500 мкм), мікропорошки (розмір зерен від 1 до 60 мкм), субмікропорошки (від 0,1 до 1 мкм) та нанопорошки ( $10^{-3} \dots 10^{-4}$ ) мкм) (рис. 2.1). У свою чергу, кожна група поділяється на декілька видів, що відрізняються фізико-механічними та фізико-хімічними характеристиками, що залежать від способів виготовлення порошків.

Залежно від призначення кожного виду алмазно-абразивного інструменту необхідно вибирати порошки з певними характеристиками.

Проблема отримання алмазних порошків із заданими характеристиками вирішується за двома основними напрямками.

*Перший напрямок* полягає у розробці методів спрямованого синтезу. Однак як би не вдосконалювалися апарати високого тиску та технологія синтезу, неможливо отримати в одному технологічному процесі всі алмази однакового розміру та якості.

На рис. 2.2 представлені фрагменти продукту синтезу алмазу, отриманого при гомогенному та пошаровому розташуванні металу-розчинника та графіту у вихідній шихті. Алмазні зерна, що кристалізувалися в різних зонах реакційного осередку, являють собою набір частинок різного розміру та форми. Значна кількість зерен ослаблена поверхневими дефектами у вигляді раковин та тріщин, включеннями металу. Неоднорідність продукту синтезу характеризується гранулометричним складом і розкидом показника міцності (рис. 2.3).

Показник міцності  $P$  визначається за залежністю:

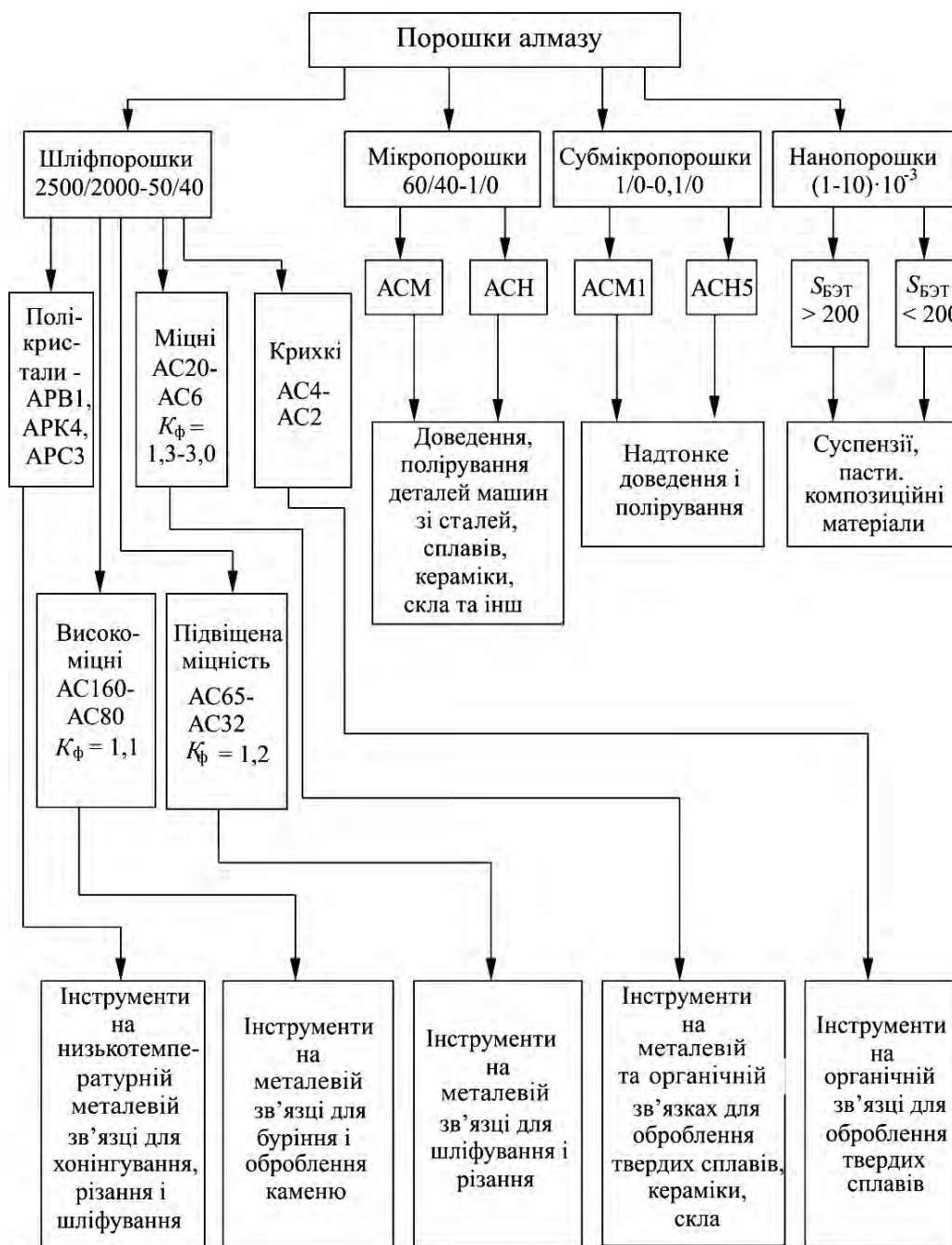
$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{j=1}^k P_j}{n - k},$$

де  $P_i$  – значення руйнівного навантаження окремого зерна, Н;  $P_j$  – значення руйнівного навантаження, окремого зерна, що вдвічі або більше перевищує  $P_{cp}$ , Н;  $P_{cp}$  – середній показник міцності порошку за наслідками послідовного руйнування 50 зерен, Н;  $n$  – кількість зруйнованих зерен;  $k$  – число зерен, зруйнованих за  $P_j \geq P_{cp}$ .

*Другим важливим напрямком* у розвитку технології отримання алмазних порошків є проведення операцій вилучення, класифікації алмазних частинок за розмірами та сортування за формою та фізико-хімічними властивостями.

Алмазні зерна після вилучення їх з продукту синтезу являють собою окремі кристали та їх зростки, уламки кристалів у вигляді незграбних, голчастих і пластинчастих частинок, значна кількість друз і зерен, ослаблених дефектами, часто у вигляді великих тріщин.

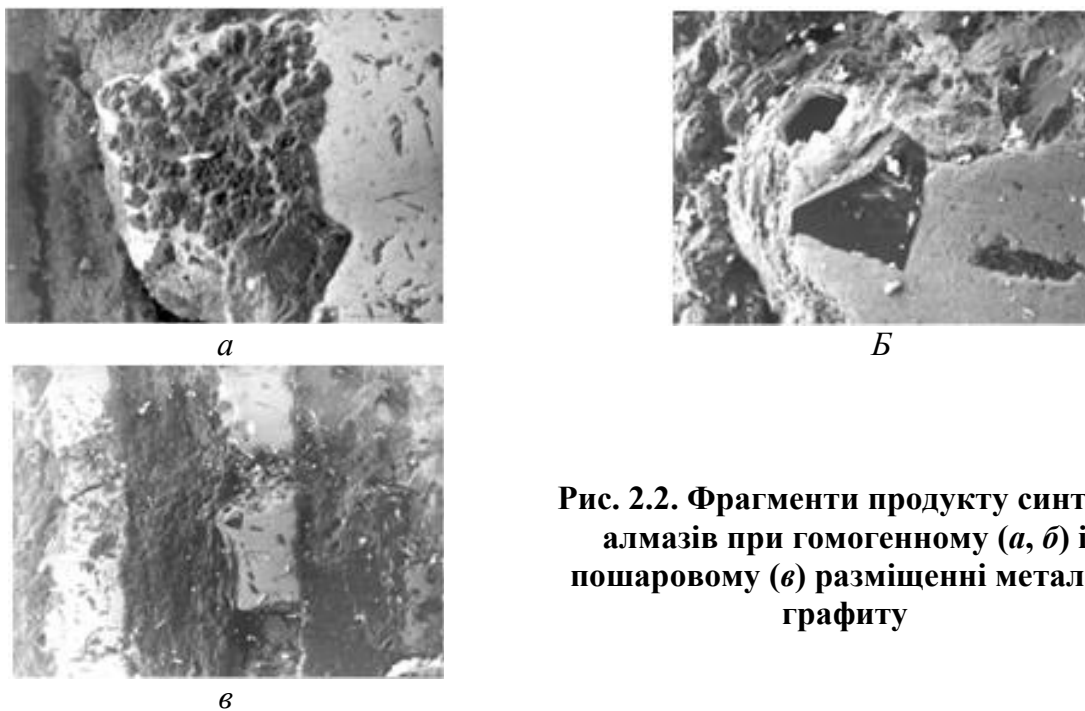
Для виготовлення однорідних за складом алмазних порошків сировина додатково піддається вибіркового механічному, ультразвуковому або вибуховому дробленню з наступною класифікацією зерен за розмірами.



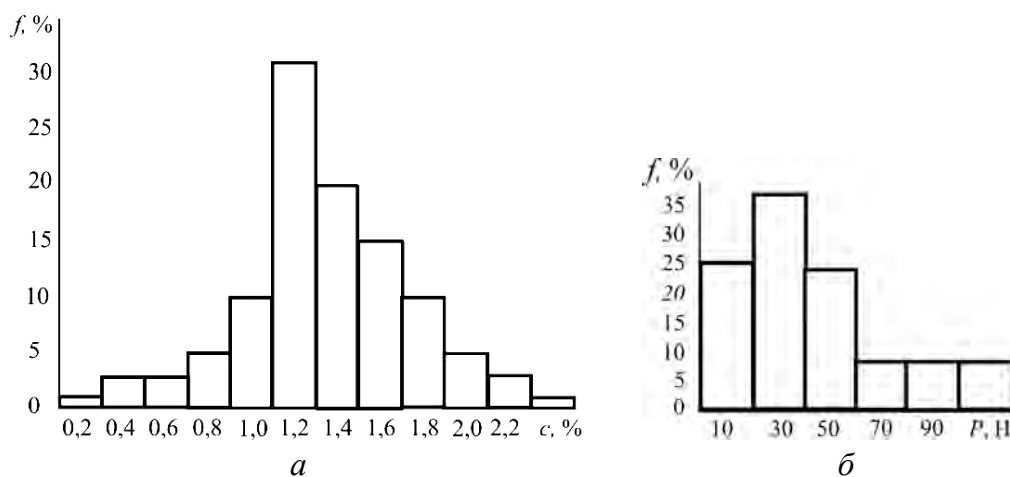
**Рис. 2.1. Основні групи алмазних порошків і їх використання**

При визначенні якості порошків синтетичних алмазів використовують розмірні та геометричні характеристики зерен, показники статистичного розподілу окремих зернистостей у загальній масі порошку. Ці параметри визначають абразивну ефективність порошків, а, отже, шорсткість та інші показники якості поверхні металів і неметалів, що обробляються алмазними інструментами.

При дробленні та тонкому подрібненні в першу руйнуються чергу зростки та дефектні алмазні зерна, утворюється значна кількість осколків із гострими гранями, порошок гомогенізується за міцністю зерен. Корикування форми зерен здійснюється шляхом механічної чи хімічної овалізації, тобто штучного затуплення гострих граней, дроблення виступів, руйнування дефектних ділянок зерен.



**Рис. 2.2. Фрагменти продукту синтезу алмазів при гомогенному (а, б) і пошаровому (в) розміщенні металу і графіту**



**Рис. 2.3. Гістограма розподілу алмазів AC15 в залежності від масової долі домішок (а) і показників міцності (б):  $f$  – частість зустрічі алмазів з визначеною відповідно масовою часткою домішок і величиною показника міцності, %**

Поділ порошків за розмірами зерен займає важливе місце у технології виготовлення порошків. До основних, широко застосовуваних методів класифікації порошків алмазів відносяться вібраційно-ситові, повітряно-ситові, гідравлічні із застосуванням статичної і відцентрової седиментації.

### 2.1.2. Шліфпорошки синтетичного алмазу

Вібраційно-ситова класифікація застосовується найбільш широко для поділу шліфувальних порошків. При цьому розміри зернистостей відповідають номерам сит, на яких вони отримані. В Україні використовуються дротяні сита з модулем 1,26.

Шліфпорошки випускають зернистістю від 2500/2000 до 50/40 мкм, їх марки та характеристики представлені в табл. 2.1.

Позначення марок алмазних шліфпорошків складається з літерних та цифрових індексів. Літерами АС позначають порошки із синтетичних монокристалічних алмазів, АР – із синтетичних алмазних полікристалів. При цьому до індексу АР додається буква, що позначає тип вихідного полікристалічного алмазу: В – балас, К – карбонадо, С – спіки. До буквених позначень додається цифровий індекс, що виражає для порошків АС середнє арифметичне значення показників міцності на стиснення всіх зернистостей даної марки в ньютонах, а в шліфпорошках АР – сотих частках ньютона.

**Табл. 2.1. Марки, зернистість, характеристики і рекомендовані області використання алмазних синтетичних шліфпорошків (ДСТУ 3292-95)**

Марка порошку алмазу	Діапазон зернистості	Зернистість	Характеристика	Рекомендована область використання
1	2	3	4	5
АС2	Широкий	63/40... 160/100	Із зерен синтетичного алмазу підвищеної крухкості, зерен, які представлені агрегатами з розвинутою поверхнею	Інструменти на органічних зв'язках, чистові та довідкові операції при обробленні твердого сплаву
	Вузкий	50/40... 16 0/125		
АС4	Широкий	63/40... 200/125	Те ж саме та із зерен, які представлені зростками	
	Вузкий	50/40... 200/160		
АС6	Широкий	63/40... 250/160	Із зерен синтетичних алмазів, які представлені окремими кристалами з розвинутою поверхнею, агрегатами та зростками	Інструменти на органічних, металевих, керамічних зв'язках, оброблення твердого сплаву, кераміки, скла та інших крихких матеріалів
АС15, АС 20	Широкий	63/40... 630/400	Те ж саме та із зерен, які представлені подовженими кристалами, з коефіцієнтом форми зерен 1,3–3,0	
АС15, АС 20	Вузкий	50/40... 630/500		
АС32	Широкий	80/50... 630/400	Те ж саме та із зерен, які представлені кристалами, зростками і агрегатами, з коефіцієнтом форми зерен < 1,2	Інструменти на металевих зв'язках, шліфування каменю, оброблення скла, рубіна, лейкосапфіра, ситала, корунда; чорнове хонінгування
	Вузкий	50/40... 630/500		
АС50	Широкий	100/63... 630/400		
	Вузкий	50/40... 630/500		

Закінчення табл. 2.1

1	2	3	4	5
6AC65	Широкий	125/80... 630/400	Із зерен синтетичного алмазу, які представлені кристалами, зростками та агрегатами, з коефіцієнтом форми зерен < 1,2	Інструменти на металевих зв'язках, оброблення природного каменю, будівельних матеріалів, гірських порід середньої твердості, кераміки, скла, бетону; буровий інструмент
	Вузький	63/50... 630/500		
AC80	Широкий	125/80... 630/400	Те ж саме та із зерен які представлені кристалами, зростками, з коефіцієнтом форми зерен < 1,1	
	Вузький	100/80... 630/500		
AC100	Широкий	125/80... 630/400	Те ж саме та із зерен, які представлені кристалами, зростками, з коефіцієнтом форми зерен < 1,1	Інструменти на металевих зв'язках, свердління природного каменю бетону, скла, кераміки, правка шліфувальних кругів, оброблення вогнетривів; буровий інструмент
	Вузький	100/80... 630/500		
AC125	Широкий	160/100... 630/400		
	Вузький	125/100... 630/500		
AC160	Широкий	160/100... 630/400		
	Вузький	125/100... 630/500		
APB1	Вузький	50/40... 2500/2000	Із зерен синтетичного полікристалічного алмазу типу «баллас»	Інструменти на металевих зв'язках, для чорнового хонінгування чавунів, різання та шліфування склопластиків та інших неметалічних матеріалів
APK4	Вузький	50/40... 2500/2000	Те ж типу «карбонадо»	Інструменти на низькотемпературних металевих зв'язках, оброблення каменю низької та середньої твердості, вогнетривів
APC3	Вузький	50/40... 2500/2000	Те ж типу «спеки»	Інструменти на металевих зв'язках, чорнове хонінгування чавунів, оброблення будівельних матеріалів, правка абразивних кругів

Шліфпорошки синтетичних монокристалічних алмазів у країнах СНД випускаються за 12 марками міцності починаючи з марки АС2 та закінчуючи маркою АС160.

Порошки марок АС2, АС4, АС6 одержують без додаткових сортувань.

Введення додаткової операції – сортування формою на вібростолі – дозволяє отримувати порошки, що різняться за міцністю в кілька разів. При цьому зерна різної форми рухаються по похилій деці, що вібрує, по різних траєкторіях в залежності від коефіцієнта тертя зерен по поверхні деки. В першу комірку потрапляють найбільш округлі і, відповідно, міцні зерна, а більш віддалені осередки – зерна незграбної, плоскої і голчастої форм. З використанням цього методу сортування одержують порошки марок АС15 і вище.

Значний вплив на підвищення якості порошоків робить застосування для їх сортування методів магнітної, електричної та аеродинамічної сепарації, флотації або їх комбінацій. Якщо порошок додатково розсортований за якоюсь відмінністю після цифрового індексу додається відповідний індекс: Т – термоміцні (термостійкі); Н – немагнітні, неелектропровідні; А – підвищеної адсорбційної активності тощо.

Наприклад, АС125Т 400/315 – шліфпорошок синтетичного алмазу марки 125, термостійкий, зернистістю 400/315 мкм.

Термостійкі алмазні шліфпорошки виготовляють із серійних порошоків зернистістю 630/500...100/80 марок АС50...АС160 шляхом видалення з них методом магнітної сепарації алмазних зерен з високим вмістом металевих включень. Термостійкість синтетичних алмазів безпосередньо залежить від вмісту в них металевих включень та від складу сплаву-розчинника, що використовується при синтезі алмазу. Як правило, алмази, синтезовані на нікель-марганцевому сплаві, мають нижчу термостійкість, ніж алмази, отримані на феромагнітних сплавах. Зміст металевих домішок в порошках при сортуванні контролюється величиною питомої магнітної сприйнятливості. Міцні властивості готового порошку визначається коефіцієнтом термостійкості  $K_T$  ( $K_T$  змінюється не більше від 1,1 до 3,7) за формулою:

$$K_T = \frac{P_{исх}}{P_{т.о}}, \quad (2.1)$$

де  $P_{исх}$  – вихідне руйнівне навантаження при статичному стисканні, Н;  $P_{т.о.}$  – руйнівне навантаження при статичному стисканні після термооброблення у середовищі аргону при 1000 °С, Н.

Застосування термостійких алмазів в інструменті на металевій зв'язці забезпечує зміну властивостей міцності у зазначених вище межах у процесі виготовлення інструменту і при його експлуатації у високотемпературних умовах. Алмазні порошки з індексом «Н» виготовляють із серійних порошоків зернистістю 500/400...50/40 марок АС6...АС65 шляхом додаткового сортування електричних та магнітних полів з метою отримання порошоків з високим питомим електроопіром  $\rho$ . Порошки контролюють за величиною питомої магнітної сприйнятливості ( $\rho \geq (6,6...3,4) \cdot 10^{-8}$ , м<sup>3</sup>/кг) та питомого електроопору ( $\rho \geq 108$  Ом·м для зернистостей 500/400...315/250 всіх марок  $\rho \geq 109$  Ом·м для зернистостей 250/200...50/40).

Застосування спеціальних порошоків з індексом «Н» для електрохімічного виробництва інструменту виключає дендритоутворення, забезпечує підвищення міцності закріплення алмазів у зв'язці та покращення експлуатаційних властивостей інструменту.

Алмазні порошки з підвищеною адсорбційною активністю з індексом «А» виготовляють із серійних алмазних порошоків марок АС6...АС160 шляхом сортування методами флотації або адгезійно-магнітної сепарації на основі відмінностей у ступені

шорсткості їхньої поверхні, що оцінюється коефіцієнтом поверхневої активності –  $K_a \geq 0,3 \dots 0,5$ .

Алмазні порошки з підвищеною поверхневою активністю застосовуються в алмазному інструменті на органічних та металевих зв'язках. Використання таких алмазів забезпечує підвищення міцності їх утримання у зв'язці, що дозволяє зменшити глибину зарощування зерен, збільшити ресурс роботи інструменту та знизити питому витрату алмазів.

Розвиток технології синтезу алмазу та одночасне вдосконалення процесів сортування створили можливість виготовлення особливо міцних алмазних порошків (які не увійшли до переліку марок стандарту ДСТУ 3292-95), таких як АС200...АС400. Розроблені технічні умови поширюються на шліфувальні порошки із синтетичних алмазів, показники міцності при статичному стисканні яких наведені в табл. 2.2.

Дані порошки застосовуються:

- в алмазно-абразивному інструменті на металевих зв'язках;
- управлячих інструментах;
- в інструментах для різання, свердління природного каменю, кераміки, бетону; бурових робіт (шліфпорошки марок АС200...АС300);
- в інструментах для оброблення природного каменю, будматеріалів, гірських порід підвищеної твердості (шліфпорошки марок АС350, АС400).

Серійні алмазні порошки є сукупністю зерен певної зернистості, які значною мірою розрізняються за основними характеристиками якості. Як правило, порошок характеризується показником якості, що є величиною, усередненою по всьому об'єму порошку.

**Табл. 2.2. Показники міцності при статичному стиску шліфпорошків з синтетичних алмазів**

Зернистість	Показники міцності при статичному стиску, Н, не менш – для марок:				
	АС200	АС250	АС300	АС350	АС400
800/630	525	656	820	1025	1280
630/500	450	560	700	880	1100
500/400	355	444	555	690	867
400/315	311	390	486	607	760
315/250	256	320	400	500	625
250/200	225	280	350	440	550
200/160	200	250	310	386	482
160/125	165	206	258	322	403
125/100	141	177	220	275	345

У серійному порошку вміст основної фракції з характеристикою якості, що відповідає її номінальному усередненому значенню, зазвичай знаходиться в межах 20...40%. Таким чином, в алмазному інструменті, відповідно до середнього значення характеристики якості, ефективно працюватимуть менше половини зерен.

В Україні найменування марок алмазних порошків відрізняються від маркування у країнах далекого зарубіжжя – в українському стандарті зернистість відповідає ситовому розміру зерен у мкм, а зарубіжних – в меш. Відповідні розмірні дані наведено у табл. 2.3.

**Табл. 2.3. Позначення розмірів зерен алмазних шліфпорошків за стандартом України і за стандартом ISO 565**

Стандарт України		Стандарт ISO 565	
зернистість	розмір зерен, мкм	зернистість, меш	розмір зерен, мкм
630/500	630/500	30/35	600/500
500/400	500/400	35/40	500/425
400/315	400/315	40/45	425/355
315/250	315/250	50/60	300/250
250/200	250/200	60/70	250/212
200/160	200/160	70/80	212/180
160/125	160/125	100/120	150/125
125/100	125/100	120/140	125/106
100/80	100/80	140/170	100/80
80/63	80/63	200/230	75/63
63/50	63/50	270/325	63/53
50/40	50/40	325/400	45/38

### 2.1.3. Мікро- та субмікропорошки синтетичного алмазу

Мікро- та субмікропорошки отримують з фракцій зернистістю не більше 60 мкм, виділеної з вихідної алмазної сировини та утвореної в результаті виготовлення шліфпорошків.

За ДСТУ 3292-95 алмазний мікропорошок – це порошок, у якому розміри зерен основної фракції від 1 до 60 мкм, а алмазний субмікропорошок – від 0,1 до 1 мкм.

Відмітною ознакою мікропорошків, що відображає їх якість – є абразивна здатність, що характеризується відношенням маси матеріалу, зішліфованого з зразка, що обробляється, до маси витраченого при цьому алмазного порошку при строго встановленому режимі випробування.

Основну частку обсягу випуску мікропорошків становлять алмазні синтетичні мікропорошки нормальної абразивної здатності, що позначаються індексом АСМ та порошки підвищеної абразивної здатності – індексом АСН. Мікропорошки марок АСМ та АСН випускаються зернистістю від 1/0 до 60/40 мкм (табл. 2.4).

Для позначення субмікропорошків до буквених індексів додається цифра 5 або 1, що позначає вміст порошку зерен великої фракції (відповідно не більше 5 або 1%). Субмікропорошки випускають шести зернистостей.

Для отримання мікро- та субмікропорошків спеціального призначення застосовують різні методи модифікування їхньої поверхні.

У цьому випадку до основних індексів додають нові: О – овалізовані, Д – діамагнітні, Ф100 – гідрофобізовані, Ф700 – гідрофілізовані тощо. (табл. 2.5).

Наприклад, особливістю овалізованих мікропорошків (АСМ-О) є підвищена ізометричність зерен та покращений зерновий склад. За рахунок цього їхня абразивна здатність на 20...30% вище, ніж у порошків АСН.

Діамагнітні порошки (АСМ-Д) характеризуються зниженим вмістом металевих включень і у зв'язку з цим мають нижчі значення питомої магнітної сприйнятливості та

електропровідності, табл. 2.5. Такі порошки алмазу використовуються для виготовлення інструменту на гальванічній зв'язці.

**Табл. 2.4. Марки, зернистості і рекомендовані області використання алмазних синтетичних мікро- і субмікропорошків за ДСТУ 3292-95**

Марка порошку	Зернистість		Область використання	
	Широкий діапазон	Вузький діапазон	АСМ	АСН
<b>Мікропорошки</b>				
АСМ, АСН	60/28	60/40	Доведення та полірування деталей із загартованих сталей, сплавів, кераміки, напівпровідникових та інших матеріалів	Доведення та полірування твердих і надтвердих важко-оброблюваних матеріалів, корунду, кераміки, алмазів, дорогоцінного каміння
	40/20	40/28		
	28/14	28/20		
	20/10	20/14		
	14/7	14/10		
	10/5	10/7		
	7/3	7/5		
	5/2	5/3		
	3/1	3/2		
	3/0	2/1		
2/0	1/0			
<b>Субмікропорошки</b>				
АСМ5	–	1/0,5 0,7/0,3 0,5/0,1	Надтонке доведення та полірування поверхонь виробів при обробленні напівпровідникових матеріалів та прецизійних деталей з інших важко-оброблюваних матеріалів	

Порошки серії Ф100 та Ф700 характеризуються різним ступенем гідрофільності. Більш гідрофільні (Ф700) використовують для виготовлення суспензій та паст на водорозчинній основі, а менш гідрофільні (серія Ф100) – для паст та суспензій на основі аполярних рідин.

#### 2.1.4. Нанопорошки синтетичного алмазу

Промисловості часто потрібні дрібнозерні, міцні, зносостійкі матеріали, що різко відрізняються характеристиками великозернового матеріалу. Такими характеристиками мають ультрадисперсні (нанометричні) матеріали.

Нанометричні алмази (ультрадисперсні – УДА) з розміром частинок 1...100 нм синтезуються шляхом детонації заряду вибухової речовини у спеціальних камерах серед негативного кисневого балансу. Такі алмази, зберігаючи структурні характеристики, і навіть фізико-хімічні властивості алмазів статичного синтезу, істотно відрізняються поверхневими властивостями.

Ці відмінності обумовлені значною кількістю некомпенсованих зв'язків, внаслідок чого УДА мають сильні адсорбційні властивості. Саме ця якісна характеристика нового виду алмазного порошку заслуговує на найбільш пильну увагу. Відомо, що добавки УДА у різні матеріали сприяють формуванню дрібнозернистих структур з принципово новими властивостями.

Табл.2.5. Властивості модифікованих порошків

Марка	Найменування порошків	Діапазон зернистостей	Основні характеристики						Область використання
			$\alpha, \%$	$\chi, \text{ м}^3/\text{кг}$	$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\Delta C_{ss}, \text{ мДж/моль}\cdot\text{м}^2$	$K_{\phi}$		
АСМ Серія 100	Гідрофобізовані	40/28...2/1	0,5	$0,3 \cdot 10^{-8}$	$6,6 \cdot 10^{11}$	-30	1,3...1,4	Шліфування оптичних деталей. Пасти на основі неполярних розчинників	
АСМ Серія 700	Гідрофлізовані	40/28...2/1	0,1-0,2	$0,3 \cdot 10^{-8}$	$10^{11}$	-65	1,3...1,4	Пасти для отримання товстих плівок для мікроелектроніки. Корозійно- та ерозійностійкі полікристали та композити	
АСМ Серія ET	Зі спеціальними електротехнічними характеристиками	14/10...1/0	0,5	-	$10^4 \dots 10^{13}$	-	-	Пасти, товсти плівки, полікристали та композити, що використовуються у мікроелектроніці	
АСМ Серія Д	Діамагнітні	60/40...1/0	< 1,0	$-0,05 \cdot 10^{-8}$	-	-	1,25	Інструменти та гальванічної зв'язі, полікристали	

Примітка:  $\alpha$  – масова частка розчинної домішки;  $\chi$  – питома магнітна сприйнятливість;  $\rho$  – опір;  $\Delta C_{ss}$  – вільна енергія насичення водою;  $K_{\phi}$  – коефіцієнт форми

Табл.2.6. Марки, основні характеристики і області використання нанопорошків синтетичних алмазів  
(ТУ У 26.8 – 05417377-177:2007)

Марка нанопорошку	Характеристики										Призначення (область використання)
	Мас. частка - алмаз, %	Мас. частка - незгор. залишок, %	Мас. частка - розчин. домішки, %	Мас. частка - волога, %	рН	Щільність, г/см <sup>3</sup> , не менше	питома поверхня, м <sup>2</sup> /см <sup>3</sup>	питома магнітна сприйнятлив., м <sup>3</sup> /кг			
АСУД 50	50	1,8	0,8	3,0	3.5-6,0	2.7	200-300	-			Композити, покриття, наповнювачі, полірувальні пасти
АСУД 75	75	1.0	0,5	2,0	3.5-6,0	3,0	299-300	-			Полікристали, композити, суспензії, пасти
АСУД 95	95	1,8	0,8	3,0	3.5-6,0	3,3	120-250	20,0·10 <sup>-8</sup>			Термостійкі полікристали, матеріали для мікроелектроніки, біомедичини
АСУД 99	99	0,5	0.3	1.0	3.5-6,0	3,4	140-300	1,0·10 <sup>-8</sup>			Термостійкі полікристали, матеріали для мікроелектроніки, біомедичини

Перспективне застосування ультрадисперсних алмазів та виробів на їх основі як добавки в електрохімічні та хімічні покриття; у присадки до технічних мастил; полімерні керамічні та гумотехнічні матеріали, клеї; виготовлення полікристалів та різних дрібнокристалічних композитів; фільтрів та мембран, суспензій та паст для тонкого шліфування та доведення; алмазні адсорбенти.

У табл. 2.6 наведено характеристики 4-х марок алмазних нанопорошків та вказано рекомендовані області застосування.

## 2.2. Порошки кубічного нітриду бору

### 2.2.1. Загальні уявлення

За своїми властивостями та експлуатаційними характеристиками *cBN* суттєво відрізняється від синтетичного алмазу. Цей матеріал є більш крихким, має меншу, порівняно із синтетичним алмазом, міцність. Кубічний нітрид бору є термостійкішим матеріалом, ніж алмаз і, як правило, застосовується там, де не може використовуватися алмаз, тобто при великих навантаженнях і високій температурі. Відсутність вуглецю у складі *cBN* дозволяє використовувати *cBN* при обробленні сталей та сплавів на основі групи заліза. Отримання нових марок *cBN* та використання їх при виготовленні шліфувальних кіл дозволяють ефективно обробляти поверхні матеріалів різної твердості. Однак для кожної області застосування необхідні порошки *cBN* з відповідними властивостями, оскільки не існує універсальних порошків, які відповідають усім вимогам до інструменту.

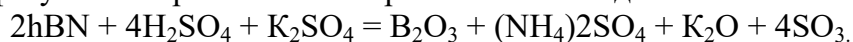
*cBN* отримують шляхом синтезу гексагональної модифікації нітриду бору (*hBN*) при високих тисках і температурі в області термостабільності *cBN*. Як стимулятори процесу додають Mg, Li або їх сполуки. Продукт синтезу кубоніту являє собою спік з *cBN*, металу і *hBN*, що не перекристалізувався.

Процес вилучення складається з двох етапів: розчинення металевої складової розведеними мінеральними кислотами та видалення залишкового *hBN*.

Видалення залишкового *hBN* здійснюється, як правило, сплавленням гідроксидами лужних металів або їх сумішами:



Можливе також розчинення залишкового *hBN* у концентрованій сірчаній кислоті з додаванням сульфату калію при кип'ятінні протягом 5...6 год.



Для видалення залишкового *hBN* використовують також флотаційні методи у поєднанні з вибіркоким механічним або ультразвуковим дробленням. Флотаційний процес заснований на відмінності поверхневих властивостей проводиться за бажанням замовника при виготовленні спеціальних марок порошків.

### 2.2.2. Шліфпорошки кубічного нітриду бору

Основною характеристикою, що розмежовує марки шліфувальних порошків *cBN*, як і алмазів, є міцність зерен при статичному стисканні.

Шліфпорошки різних *cBN* мають зернистість від 50/40 до 400/315.

Шліфпорошки кубоніту з розмірами зерен 40...250 мкм виробляють чотирьох марок: звичайної (КО), підвищеної (КР), високої (КВ) міцності та кібор (КТ) (табл. 2.7). Зовнішній вигляд порошку нітриду кубічного бору представлений на рис. 2.5.

Діапазон зернистостей такий самий, як і алмазів – від 1/0 до 60/40.

Основною характеристикою механічних властивостей шліфпорошків є параметри міцності, що визначаються величиною руйнівного навантаження при статичному стиску при кімнатній температурі ( $P$ , Н) і після високотемпературного впливу ( $P_{т.о.}$ ).

Зерна cBN, як і зерна алмазу, піддають дробленню та класифікації за розмірами, та формою.

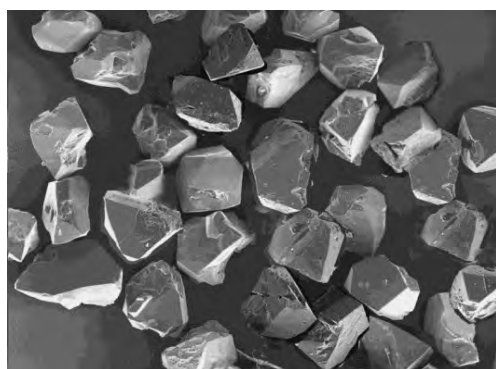
Міцність зерен cBN визначається за методикою, викладеною у технічних умовах ТУ У 88.090.018-98.

Результати визначення міцності лежать в основі розподілу шліфпорошків кубоніту за марками. cBN кубоніт виготовляється різних марок: КО – шліфпорошки cBN звичайної міцності, КР – шліфпорошки cBN підвищеної міцності та КТ (кібор) шліфпорошки cBN з підвищеною термостабільністю.

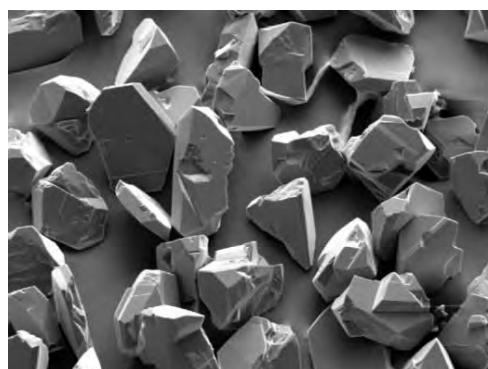
З рис. 2.6 слідує, що зі збільшенням розмірів зерен шліфпорошків кубоніту різних марок їхня міцність зростає.

**Табл. 2.7. Показник міцності шліфпорошків кубоніту різних марок**

Зернистість	Показник міцності при статичному стаску, Н, не менш – для марок:			
	КО	КР	КВ	КТ
250/200	3,2	7,5	10,5	17,7
200/160	3,0	6,2	8,7	15,9
160/125	2,8	5,2	7,3	14,5
125/100	2,6	4,4	6,2	11,0
100/80	2,3	3,8	5,3	6,9
80/63	2,0	3,3	4,6	–
63/50	2,0	2,9	4,1	–
50/40	2,0	2,6	3,6	–



*a*



*б*

**Рис. 2.5. Зображення у вторинних електронах високоміцного та термостабільного шліфпорошку cBN зернистістю 315/250 (*a*) та шліфпорошку Borazon 400 виробництва GE Superabrasives (*б*); x100**

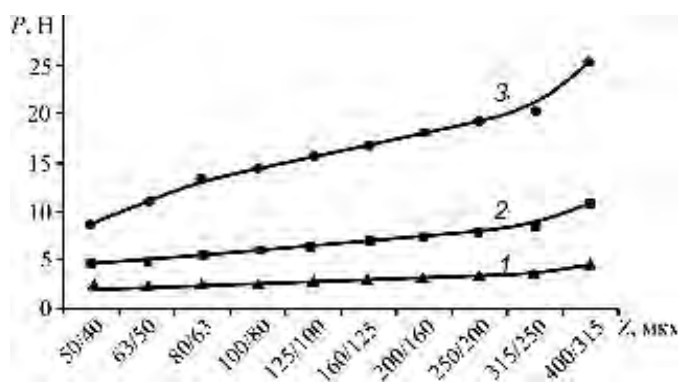


Рис. 2.6. Показник міцності зерен шліфпорошків кубоніту різних марок:  
1 – КО; 2 – КР; 3 – КТ

Однією з найважливіших характеристик крихкого матеріалу є його здатність зберігати свої фізико-механічні властивості та структуру після одно- та/або багаторазових термічних впливів. Ця характеристика матеріалу називається термостабільністю.

Коефіцієнт термостабільності визначають по відношенню до міцності матеріалу після термічної оброблення до його міцності у вихідному стані. Як правило, цей коефіцієнт менше одиниці, однак, як випливає з рис. 2.7 міцність шліфпорошків кубоніту марки КР знижується після високотемпературного оброблення, а шліфпорошків кібору марки КТ збільшується. Міцність кристалів кубоніту марки КТ після термооброблення збільшується на 10...15%. Приклад наведений для випадку оброблення в інертному середовищі в струмі аргону при температурі 1100 °С.

Це обумовлено умовами синтезу, що забезпечує отримання шліфпорошків з досконалою кристалічною решіткою та мінімальним рівнем домішок та включень.

Окрім характеристик міцності порошоків, важливою експлуатаційною характеристикою порошоків *cBN* є їх абразивна здатність. Абразивна здатність порошоків кубоніту марки КТ на 30...35% вище, ніж аналогічний показник порошоків кубоніту марки КР.

Досконалість кристалічних ґрат синтезованих кристалів обумовлює їх високу теплопровідність (табл. 2.8).

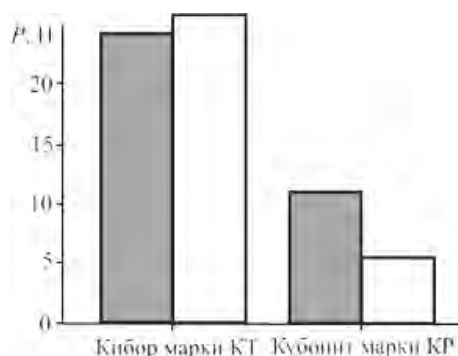


Рис. 2.7. Міцність зерен шліфпорошків кубоніту марок КТ та КР у вихідному стані (■) та після термооброблення (□)

У табл. 2.9 наведено елементний склад мікронних та субмікронних порошоків. Видно, що вміст домішок, крім кремнію, знижується із зменшенням зернистості.

**Табл. 2.8. Теплопровідність монокристалів кубоніта марки КТ**

Колір кристалу	Макс. розмір, мкм	Температура, К	$\lambda$ , Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>
Світло-жовтий	250	298,0	572
	450	317,0	511
Золотистий	350	318,0	750
	400	316,0	690
Помаранчевий	400	312,5	542

### 2.2.3. Мікро-, субмікро- та нанопорошки кубічного нітриду бору

Вміст кремнію, навпаки, збільшується з зменшенням зернистості і досягає максимального значення зернистості 0,25/0.

На поверхні мікронних та субмікронних порошків cBN присутні пари води, молекулярний та атомарний кисень, молекулярний азот, аміак, двооксиди та оксиди азоту та бору, оксид магнію та боргідрат B<sub>6</sub>H<sub>10</sub>.

Залежно від типу зв'язку сполук та функціональних груп, які десорбуються з поверхні порошків cBN, вони умовно поділяються на дві групи: фізично або хімічно адсорбовані. Визначальним чинником поділу сполук цих груп є температура десорбції.

**Табл. 2.9. Елементний склад домішок мікро- і субмікронних порошків cBN**

Зернистість порошків	Елементний склад домішок, %					
	Fe	Ti	P	Si	Ca	Σ
3/2	0,109	0,005	0,0	0,024	0,0	0,182
2/1	0,140	0,010		0,020	0,040	0,190
1/0,5	0,064	0,0		0,026	0,025	0,255
0,5/0,25	0,0			0,087	0,014	0,184
0,25/0				0,175	0,028	0,383

Так, сполуки, що десорбуються з поверхні при температурі від 25 до 150 °С, відносяться до фізично адсорбованих, а десорбовані з поверхні при температурі вище 150 °С – до хімічно пов'язаних.

Основна увага приділялася кисневмісним сполукам та функціональним групам, які мають найбільший вплив на спікання полікристалічних композитів з порошків cBN.

Необхідно відзначити, що для мікро-, та субмікропорошків cBN характерна наявність функціональних груп, фізично та хімічно пов'язаних з поверхнею. Обробка порошків cBN за температури не менше 500 °С дозволяє отримати практично чисту від домішкових сполук поверхню порошків. Основними домішками в порошках cBN є залізо та кальцій. Проведення як хімічних, і електрохімічних обробок дозволяє значно знизити кількість домішок в порошках cBN.

Експлуатаційні властивості інструменту з порошками cBN багато в чому лімітуються взаємодією з киснем та азотом. Специфіка цієї взаємодії визначається двома факторами: термодинамічною стійкістю та особливостями дефектності структури. Температура початку окислення порошків cBN становить від 970 до 2070 К. Така відмінність величин початку окислення порошків cBN пов'язана з природою матеріалу, домішковим складом, дисперсністю та низкою інших факторів.

Розроблено технічні умови ТУ У 28.5-05417377-141, які поширюються на порошки субмікронні кубічного нітриду бору марки КСМ діапазону зернистостей від 1/0,5 до 0,25/0,1 та нанопорошки марки КН зернистістю 0,1/0. Область їх застосування – отримання композиційних матеріалів та покриттів, суспензій та паст, полікристалічних матеріалів. У табл. 2.10 наведено основні фізико-хімічні характеристики виготовлених та регламентованих субмікро- та нанопорошків cBN.

**Табл. 2.10. Основні фізико-хімічні характеристики виготовлених і регламентованих порошків cBN**

Показники	КСМ 1/0,5	КСМ 0,5/0,25	КН 0,1/0
Масова доля розчинних домішок, %, менше	0,40	0,45	0,9
Вміст гексагонального нітриду бору, %	1,0	1,0	1,5
Питома магнітна сприйнятливість, м <sup>3</sup> /кг	$0,1 \cdot 10^{-8}$	$0,5 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$
Масова доля вологи (рН 6,5), %, не більше	0,5	1,0	1,5
Питома поверхня, м <sup>2</sup> /г, не менше	7,57	12,77	35,94

#### Контрольні запитання

1. Основні групи порошків алмазу.
2. Зернистість порошків алмазу.
3. Області використання порошків алмазу
4. Маркі шлфіпорошків алмазу
5. Порошки кубічного натриду бору.
6. Міцність порошків надтвердих матеріалів.
7. Маркі мікро- і субмікропорошків надтвердих матеріалів
8. Нанопорошки алмазу і кубічного нітриду бору.

## РОЗДІЛ 3 ПОЛІКРИСТАЛІЧНІ НАДТВЕРДІ МАТЕРІАЛИ

### 3.1. Загальні уявлення

Полікристалічні матеріали на основі алмазу та *c*BN [2, 4] характеризуються наявністю жорсткого каркасу із зерен алмазу або *c*BN, що зрослися.

Спінання порошків алмазу та *c*BN, як правило, здійснюють в області термодинамічної стабільності алмазу та *c*BN (згідно з фазовими діаграмами) при тиску 5...9 ГПа та температурах 1500...2000 К.

Складові каркас зерна – це, по суті, монокристали алмазу або *c*BN, що мають низку унікальних фізико-механічних та теплофізичних властивостей. Наскільки ці властивості реалізуються в полікристалі, залежить від ступеня їхнього взаємозв'язку. Управління процесом формування структури полікристалу відкриває можливості створювати в залежності від сфери застосування матеріали з необхідним поєднанням твердості, теплопровідності, міцності, електроопору.

Полікристалічні НТМ поділяються на чотири групи:

I – полікристалічні НТМ, одержувані при високих тисках та температурах шляхом перетворення графіту на алмаз у присутності спеціальних сплавів – розчинників вуглецю. До цієї групи належать, наприклад, полікристали типу баллас (АСБ) та карбонадо (АСПК).

II – полікристалічні НТМ, одержувані шляхом спікання алмазних порошків в умовах високих статичних тисків та температур.

III – полікристалічні НТМ, одержувані при високих статичних тисках і температурах на підкладці з твердого сплаву або сталі, а також полікристалічні НТМ у твердосплавній або металевій обоймі.

IV – полікристалічні НТМ, одержувані методом спікання алмазних порошків при нижчому тиску (до 1,9 ГПа) у присутності сполучного матеріалу.

Зазвичай спікання полікристалічних композиційних матеріалів здійснюють у присутності добавок, що активують процес спікання (кобальт або кремній для алмазних порошків, алюміній для порошків *c*BN).

ПНТМ за своїми фізико-механічними властивостями можуть бути близькими до монокристалів, а за деякими і перевершують їх. Так, більшість алмазних полікристалів володіє ізотропією властивостей, відрізняються високою зносостійкістю і перевершують монокристали по тріщиностійкості.

Класифікація полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) заснована на способі їх отримання та особливостях структури (табл. 3.1).

Відомо, що високий рівень фізико-механічних властивостей матеріалу визначається високодисперсною структурою зерен полікристалу, що безпосередньо впливає з експериментально встановленої залежності Холла-Петча твердості і межі плинності від розміру зерна:

$$H_V[\sigma_T] = H_0[\sigma_0] + k_y L^{1/2}, \quad (3.1)$$

де  $H_V$  – твердість,  $\sigma_T$  – ганиця плинності,  $H_0$  – твердість тіла зерна,  $\sigma_0$  – внутрішнє напруження, що перешкоджає поширенню пластичного зсуву в тілі зерна,  $k_y$  – коефіцієнт пропорційності,  $L$  – середній розмір зерна.

Таким чином, для отримання якісного полікристалічного матеріалу із щільною, однорідною, дрібнозернистою структурою перспективне використання алмазних порошків нанометричного діапазону. За відповідних умов у нанодисперсному

полікристали можлива реалізація унікального комплексу механічних властивостей, наприклад поєднання дуже високих твердості та стійкості до розтріскування.

**Табл. 3.1. Класифікація ПНТМ в залежності від способу їх отримання**

Група	Спосіб отримання	Приклад
1	Перехід графіту в алмаз в присутності розчинника Перехід графітоподібного нітриду бору в кубічний (сBN) у присутності розчинника. Перехід вюртцитного нітриду бору в кубічний.	Композит 10 (ІПМ, Україна), WBN-T4, T5, T8 (Nippon Oi & Fats Co, Японія)
2	Спікання порошків алмазу без активуючих добавок	Megadiamond (Megadiamond Ind., США)
3	Спікання порошків алмазу і сBN з активуючих добавками	Sindax-3 (Element Six, ЮАР) АКТМ (ІСМ, Україна) Amborite (Element Six, ЮАР), Кіборит (ІСМ, Україна)
4	Спікання двошарових пластин на твердосплавній підкладці з алмазним робочим шаром. Спікання двошарових пластин на твердосплавній підкладці з робочим шаром із сBN	Sindite (Element Six, ЮАР), Megarax (Megadiamond Ind., США), Comrax (General Electric, США) АТП (ІСМ, Україна) BZN Comrax (General Electric, США), КТП (ІСМ, Україна), BN100 (Sumitomo Electric Ind., Японія), DBC50, DBC80, (Element Six, ЮАР), Q-bonite BX 230 (Tochiba Tungaloy, Японія), Q-bonite BX 241 (Toshiba Tungaloy, Японія)

### 3.2. Полікристалічні матеріали на основі синтетичного алмазу

На відміну від монокристалів природного алмазу, які при додатку навантаження руйнуються в основному в напрямку докладання сили по площинах спайності, зразки з полікристалічних матеріалів на основі синтетичного алмазу (ПКА) руйнуються зазвичай на кілька частин шляхом утворення радіальних тріщин у напрямку перпендикулярному напрямку дії сили.

Монокристали природного алмазу при досягненні критичних навантажень руйнуються на дрібні фрагменти. ПКА із-за своєї полікристалічної структури значно краще опираються ударним навантаженням і, незважаючи на меншу твердість у порівнянні з природним алмазом, мають більш високі значення границь міцності на розтяг і поперечний зсув. Ударна міцність полікристалів алмазу залежить від розміру алмазних зерен і зі збільшенням їх знижується.

Переваги інструментальних ПКА в порівнянні з монокристалічними алмазами пов'язані з довільною орієнтацією кристалів у робочому шарі різальних пластин, що забезпечує високу однорідність за твердістю та стійкістю до стирання у всіх напрямках. Теплопровідність алмазоносного шару ПКА зі збільшенням температури зростає та

досягає значень 500...700 Вт/(м К). Так, у діапазоні температур 320...480 К теплопровідність матеріалу Syndite 010 становить 420...480 Вт/(м К), а Syndite марок 050, 075, 100 – 550...640 Вт/(м К).

Полікристали алмазу відрізняються від монокристалів вищою термостійкістю. Такі матеріали, як Sindax-3, СВ, АКТМ не втрачають своїх різальних і властивостей міцності при нагріванні до 1473 К. Syndite також має високу термічну стійкість.

Це дозволяє проводити паяння пластин шляхом короткочасного (індукційного або газополум'яного) нагрівання без захисної атмосфери. При цьому залежно від часу витримки максимально допустима температура становить 993 К (не більше 1,5 хв), 973 К – не більше 3,5 хв та 953 К – 6 хв.

*Алмазно-твердосплавні пластини (АТП).* В даний час широке промислове застосування мають АТП, які отримують спіканням при тиску 8...9 ГПа алмазного порошку з підкладкою з твердими сплавами WC-Co.

У структурі полікристалічного шару АТП (рис.3.1) переважають великі зерна алмазу розміром 20...60 мкм, між якими розташовані дрібні зерна та кобальт із розчиненим у ньому карбідом вольфраму. Вміст кобальту в алмазозносному шарі становить близько 8,5 мас. %.

Крім безпосереднього контакту великих зерен алмазу, зв'язок між ними здійснюється також за рахунок дрібнозернистого алмазного каркасу. Ця обставина значною мірою визначає фізико-механічні властивості пластин.

Така структура формується в результаті ковзання алмазних частинок відносно одна одної при створенні тиску і в початковий період спікання за рахунок дроблення менш міцних частинок, сколювання виступів більш міцних частинок, а також перекристалізації в алмаз через рідку фазу графіту, що утворився на позаконтактних поверхнях алмазних частинок. Безпосередній зв'язок між великими алмазними частинками здійснюється шляхом утворення невеликих перешийків за рахунок їхньої пластичної деформації в місцях контакту.

Важливою властивістю пластин є їхня здатність зберігати вихідну якість після нагрівання – АТП практично не змінюють свою зносостійкість після нагрівання до температури 630...680 °С. Підвищення температури нагрівання призводить до розвитку тріщин і збільшення їхньої довжини.

Зниження міцності полікристалічного шару під час нагрівання може бути спричинене взаємодією між алмазними зернами і кобальтом, що знаходиться в міжзеренних проміжках – у твердій фазі відбувається перероблення алмазного каркаса, що полягає в дифузії вуглецю в карбідну фазу або твердий розчин, що призводить до перевищення стехіометрії її складу з подальшим виділенням графіту.

Термостійкість АТП підвищується, якщо замість кобальту, що заповнює міжалмазні проміжки під час звичайного спікання, помістити елемент, наприклад кремній, який під час взаємодії з алмазом утворює термостійку речовину. Для підвищення термостійкості алмазного шару необхідно провести просочення алмазного порошку кремнієм по всьому об'єму і не допустити появи кобальту.

На рис. 3.1, а наведений приклад АТП для випадку, коли вміст кремнію в алмазному шарі близько 11 % (за масою), а взаємодія кремнію з алмазом призвела до утворення карбіду кремнію SiC.

Водночас для утворення міцного зв'язку підкладка-алмазний шар необхідно забезпечити активну взаємодію WC-Co-алмаз у перехідній зоні, яка перебуває між підкладкою й алмазним шаром.

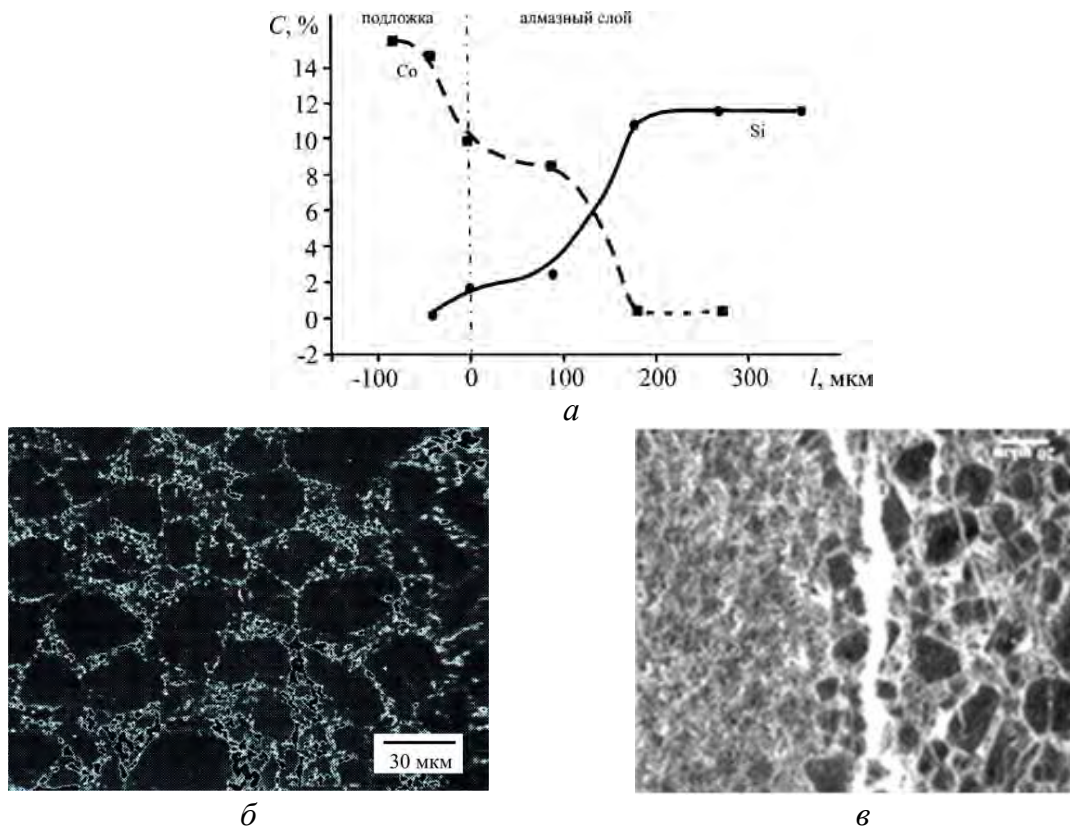


Рис. 3.1. Розподіл елементів Co, Si (а) [263] та структура інтерфейсу (б) та в перетині (в) алмазно-твердосплавної пластини

Розроблені АТП: термостабільні до температури 950..1000 °С; твердість алмазного полікристалічного шару за Кнупом – 50 ГПа; міцність при розтягуванні – 03...04 ГПа; тріщиностійкість – 10...13 МПа·м<sup>1/2</sup>; границя міцності при круговому вигині – 800...850 МПа; щільність алмазного шару – (3,74...3,77)·10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>.

Для застосування в лезовому інструменті при необхідності одержання шорсткості обробленої поверхні  $Ra < 1$  мкм розроблені АТП з більш дрібним зерном алмазу (наприклад, АСМ 20/14).

Алмазно-керамічні пластини (АКП) є тришаровою композицією, що включає алмазно-кремнієвий шар, бар'єрний проміжний шар, наприклад, на основі TiN, і керамічну підкладку, наприклад, на основі кубічного нітриду бору.

Проміжний шар сприяє більш плавній зміні пружних модулів між шаром композиції алмаз – SiC та керамічною підкладкою, що знижує рівень напружень через значну різномодульність матеріалів і, відповідно, ймовірність розшарування АКП.

Наноккомпозит алмаз – WC. Один із способів підвищення ефективності спікання порошків алмазу – введення добавок, які під час спікання утворюють хімічні сполуки з вуглецем і таким чином зв'язують частинки алмазу. Роль добавок насамперед належить хімічним елементам, які входять до складу стабільних карбідів. Активація спікання, тобто збільшення щільності спечених композитів при зростанні температури спікання у високотемпературній зоні, спостерігається у разі спікання нанопорошку УДА з добавкою вольфраму або його оксиду.

Також зі збільшенням температури спікання змінюється щільність зразків композиту, спеченого із суміші порошку алмазу марки АСМ 1/0 і порошку вольфраму. Введення нанопорошку вольфраму в суміш з порошком алмазу марки АСМ 1/0 зумовлює

підвищення значень фізико-механічних характеристик спеченого композиту порівняно із зразками, отриманими з використанням механічного змішування. При цьому композитам з максимальною твердістю властива максимальна тріщиностійкість. Значення цих величин для композитів і з урахуванням нанорозмірних порошків алмазу – УДА, і основи порошку алмазу статичного синтезу практично збігаються і становлять  $HV_5 = 25$  ГПа,  $K_{1c} = 6,6$  МПа·м<sup>1/2</sup> відповідно.

Така сукупність найважливіших механічних характеристик досягається за рахунок формування структури композиту з однорідними за розміром та регулярно розташованими зернами карбіду вольфраму та алмазу.

### 3.3. Полікристалічні матеріали на основі кубічного нітриду бору

Характерні особливості структурного стану деяких варіантів ПКНБ дозволяють віднести їх до розряду нових матеріалів – надтвердих структурованих композитів (НСК).

Принцип структурованості пов'язується з можливістю формування при спіканні в композитах певного гетерогенного структурного стану, що дозволяє цілеспрямовано змінювати їх фізико-механічні властивості, що перевищують монофазні властивості гомогенних матеріалів. Зміст фази *c*BN НСК, як правило, більше 95 об. %, тобто композит є суттєво монофазним, але гетерогенним за своєю структурою.

Основні підходи до формування структурного стану НСК на основі *c*BN, що забезпечує необхідну міцність композиту, видаються такими: НСК з комбінованою гетероструктурою.

Керамічна матриця на основі *c*BN зміцнюється (армується) шляхом введення ізометричних високоміцних частинок полікристалічного *c*BN. Для структурного стану армуючого компонента характерні досконалість внутрішніх кордонів та високий рівень міжзеренної когезії.

Межі обсягом матриці формуються з урахуванням міжчасткових контактів при спіканні з участю добавок активаторів, введених у кількості 3...5 об. %.

Структура матриці здатна гальмувати поширення тріщин, розгалужуючи їх обсягом композиційного матеріалу і, як наслідок, поглинати енергію; гетеромодульний НСК. Підвищення міцності та термостійкості інструментальної кераміки досягається шляхом введення в шихту для спікання матриці *c*BN низькомодульних включень у кількості 3...5 об. %.

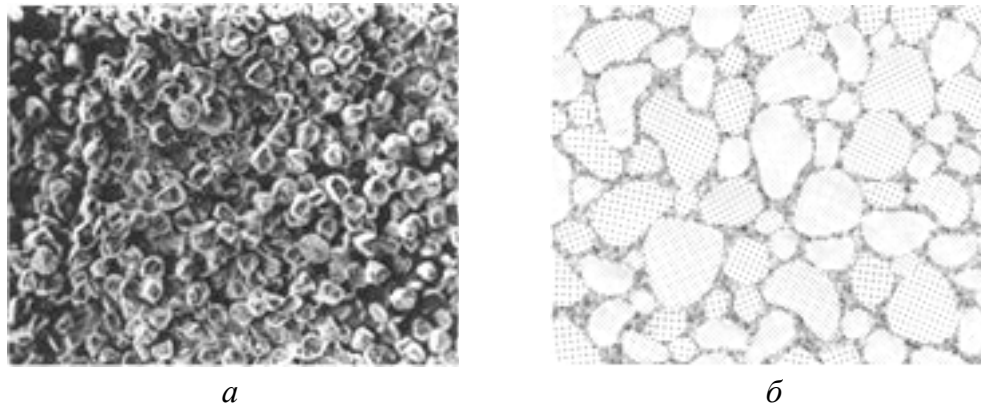
Розміри включень повинні бути істотно менше деякого критичного значення, при якому залишкові при зниженні тиску залишкові розтягувальні напруження поблизу включень в матриці недостатні для спонтанного мікророзтріскування композиту.

Головними механізмами підвищення міцності є відхилення траєкторій магістральних тріщин, їхнє розгалуження в неоднорідному полі пружних напружень поблизу частинок іншої фази і, як наслідок, дисипація енергії. Гетерогенність структурного стану в цьому типі НСК обумовлена локальними мікроспотвореннями кристалічної решітки *c*BN у безпосередній близькості до дисперсних включень низькомодульної добавки.

Приклад НСК з комбінованою гетероструктурою на основі *c*BN є композит марки «гетероніт» (рис. 3.2). Об'ємний вміст наповнювача, оптимізований за критерієм зносостійкості одержуваного гетероструктурного матеріалу, становить 55...65 об. %.

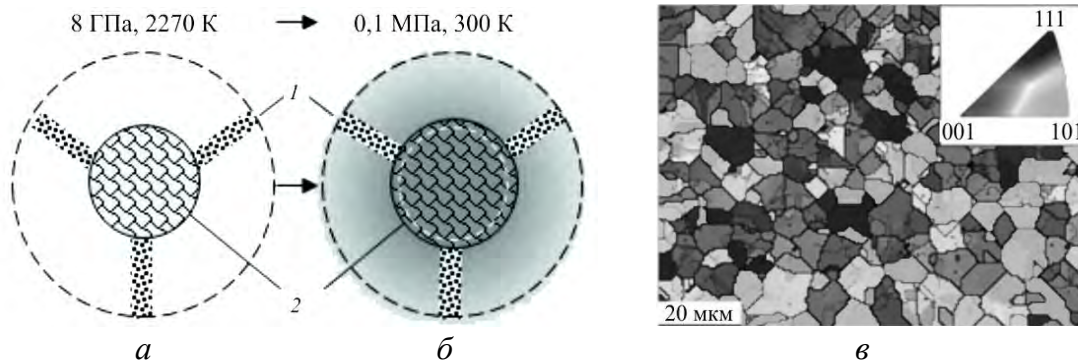
Складові НСК марки «гетероніт» характеризуються такими показниками: щільність матриці (3,46±0,012) г/ВУЛсм<sup>3</sup>, наповнювача (3,47±0,012) г/см<sup>3</sup>; теплопровідність матриці 100...180 Вт/(м·К), наповнювача 250...500 Вт/(м·К); твердість (навантаження 4,91 Н) матриці 28-35 ГПа, наповнювача 41...51 гПа; коефіцієнт тріщиностійкості

матриці  $11...13 \text{ МН}\cdot\text{м}^{-3/2}$ , наповнювача  $6,4...10,5 \text{ МН}\cdot\text{м}^{-3/2}$ ; модуль Юнга матриці  $(833\pm 12) \text{ ГПа}$ , наповнювача  $(836\pm 36) \text{ ГПа}$ .



**Рис. 3.2. НСК з комбінованою гетероструктурою на основі cBN: високоміцний наповнювач із полікристалічного cBN (а); модель структури (високотриві частки cBN армують керамічну матрицю на основі cBN) (б)**

Прикладом гетеромодульного НСК на основі cBN є композит марки «борсиніт» (рис. 3.3), де підвищення міцності та термостійкості інструментальної кераміки досягається шляхом введення в шихту для спікання матриці cBN включень  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .



**Рис. 3.3. Модель структури НСК марки «борсиніт» в умовах термобаричного впливу (а) і після нього (б) (пружнодеформований стан навколо включення ілюструється градієнтним забарвленням), орієнтація зерен у структурі композиту (в): 1 – межзеренні межі в матриці cBN; 2 – включення  $\text{Si}_3\text{N}_4$**

Передбачається, що залишкові напруження в композиті визначаються головним чином термо-, а бароупругістю внаслідок близькості коефіцієнтів термічного розширення компонентів.

Після охолодження зразка при зменшенні величини зовнішнього тиску невідповідність коефіцієнтів стисливості cBN і  $\text{Si}_3\text{N}_4$  призводить до появи залишкових напружень, локалізованих навколо низькомодульних включень  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Структура спеченого композиту марки «борсиніт» ізотропна, зерна переважно орієнтовані хаотично з великими кутами розорієнтації. Спостерігаються і малокутові межі, які, очевидно, формуються в результаті фрагментації окремих зерен при деформації в умовах термобаричного впливу. Метод аналізу картин дифракції зворотнорозсіяних електронів

дозволив виявити у композиті та характер розподілу залишкових напружень, наявність яких, безумовно, пов'язана з присутністю в матриці  $cBN$  стислих включень низькомодульного  $\beta-Si_3N_4$ .

Значні просторові області структури композиту, частково перекриваючись між собою, знаходяться у пружному формованому стані. Области напружень в обсязі композиту здатні чинити сильний вплив на зародження, характер розмноження та поширення та відхилення тріщин, що призводить до розсіювання енергії при руйнуванні матеріалу. Композит  $cBN-Si_3N_4$  (3 мас. %), отриманий за оптимальних параметрів  $p$ ,  $T$ -дії, має щільність  $(3,465 \pm 0,005)$  г/см<sup>3</sup>. Вимірні значення пружних модулів становлять  $E = 860$  ГПа,  $G = 366$  ГПа;  $B = 440$  ГПа,  $\eta = 0,175$ . Твердість за Віккерсом та тріщиностійкість визначені при навантаженні 98 Н.

Середні значення  $HV = (36,2 \pm 2,6)$  ГПа та  $K_{1c} = (11,7 \pm 1,5)$  МПа·м<sup>1/2</sup>.

При створенні гетеромодульних НСК на основі  $cBN$  для оснащення різальних інструментів, крім механічних характеристик, слід приділити увагу забезпеченню хімічної стійкості композиту, необхідної для реалізації процесу оброблення.

Останнє особливо важливо при обробленні з високою швидкістю різання, коли на контактних поверхнях інструменту має місце середня температура приблизно 1200 °С. На інтенсивність зношування інструменту, оснащеного ПНТМ на основі  $cBN$ , впливає хімічна взаємодія матеріалу інструменту з оброблюваним матеріалом, а також елементами навколишнього середовища, ефективно керувати якими можна за рахунок введення до складу композиту відповідного інгібітора, що зрушує перебіг реакцій високотемпературну область. Для підвищення працездатності різального інструменту, оснащеного НСК на основі  $cBN$ , до складу композиту повинні входити складові, які під дією термобаричних умов процесу оброблення забезпечують формування в зоні різання середовища з підвищеним тиском парціальним азоту. Взаємодія цих складових з елементами оброблюваного матеріалу з виділенням азоту має відбуватися при температурах, нижчих за температури, характерні для взаємодії з елементами оброблюваного матеріалу основи інструментального композиту –  $cBN$ .

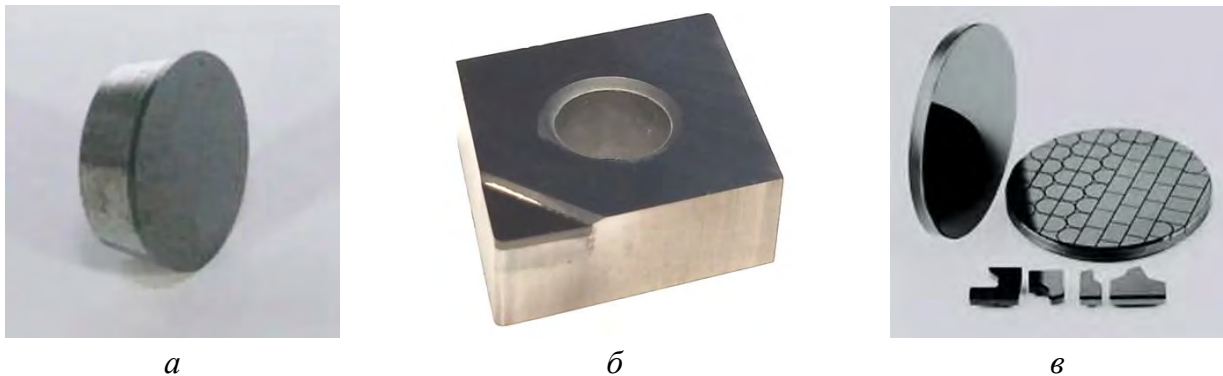
Ефективним інгібітором хімічної взаємодії в зоні різання інструментом, оснащеним НСК на основі  $cBN$ , є нітрид  $Si_3N_4$ , який міститься в гетеромодульних НСК марки «борсиніт».

Як і композити на основі алмазу, композити на основі кубічного нітриду бору можуть виготовлятися двошаровими – верхній робочий шар з кубічного нітриду бору, нижній шар – з твердого сплаву групи WC-Co (найчастіше – ВК6), рис. 3.4, а. Робочі елементи інструментів з такими композитами можуть бути у вигляді змінних багатогранних або круглих різальних пластини, що непереточуються. Такі пластини можуть мати надтвердий шар на усій поверхні або корпус пластини може бути виготовленим із сталі/твердого сплаву, рис. 3.4, б, а фрагменти з надтвердого матеріалу, переважно з двошарового композиту, можуть розташовуватися на верхівках пластини й кріпитися методами зварювання/склеювання. Окрім цього двошарові робочі елементи можуть закріплюватися методами зварювання/склеювання безпосередньо на корпусі інструменту. Зварювання/склеювання здійснюється за твердосплавну частину композиту спеціальними припоями. Існують також двошарові пластини під лазерний або лазерно-струминний розкрій, рис. 3.4, в.

Границя міцності на стискання таких матеріалів вище ніж границя міцності під час розтягування і згинання в 4,5...30 та 1,5...2 рази відповідно.

Відповідно до стандарту ISO 513-2014 полікристалічні матеріали на основі кубічного нітриду бору поділяються на три групи: ВН – із вмістом  $cBN$  75...90 % переважно у металевій матриці на основі Co та Ni; ВL – із вмістом  $cBN$  45...65% у

матриці на основі керамічних сполук TiN, TiC, Ti (C, N), (Al, Co)-з'єднань, TiN із сполуками Al та ін. (керамо-матричні композити КМК); НД – з покриттям.



**Рис. 3.4. Двошарові пластини: цільна конічна (а), ромбічна пластина з напаяною двошаровою частиною (б), двошарова пластина під лазерний розкрий (в)**

#### **Композити групи ВН.**

Висока теплопровідність полікристалів (від 50 до 200 Вт/(м·К)) пов'язана з утворенням безперервного каркасу  $cBN$  та удосконаленням контактів  $cBN-cBN$ , тобто зниженням в зонах контактів щільності дефектів кристалічної структури, на яких відбувається розсіювання теплового потоку. На протизагу теплопровідності, яка зростає при зменшенні щільності дефектів на межах зерен  $cBN$ , тріщиностійкість у такому разі знижується. Дефекти на межі зерен є стопорами поширення тріщин. Дві інші характеристики – відносна щільність та твердість полікристалів – меншою мірою залежать від дефектності меж зерен  $cBN$ .

Прикладами композитів групи ВН, які частково є НСК-композитами, є сімейство матеріалів системи  $cBN-Al$  марки «киборит» (табл. 3.2), отриманих з використанням різних технологій спікання та складів зв'язок.

Композити «киборит-1, 2» неелектропровідні, що використовувати для розрізання лазерну техніку, «киборит-3, 6» проводять електричний струм і при виготовленні різних виробів з них може використовуватися розрізка.

#### **Композити групи ВЛ.**

Створення різальних керамо-матричних композитів (КМК) ВЛ групи, насамперед, є проблемою ретельного підбору хімічних сполук, які в умовах термобаричного впливу формують матричну компоненту структурованого матеріалу. Матриця повинна відповідати певним вимогам, як по відношенню до армуючого компонента ( $cBN$ ), так і до матеріалу, що обробляється інструментом з КМК. Новим кроком у технології отримання КМК є застосування істотно вищих тисків (8...10 ГПа) порівняно зі звичайною практикою (4,5...5,5 ГПа), що дає змогу проводити процес за значно більших температур і водночас залишатися в царині термодинамічної стабільності  $cBN$ .

Використання підвищених температур спікання сприятливе з погляду необхідності формування на внутрішніх поверхнях КМК міцного когезійного зв'язку  $cBN-cBN$  і міцних міжфазних меж  $cBN$ -матриця, тим паче, коли матричний матеріал складається зі сполук на основі елементів Ti, Si, N, C або Ta, Si, N, C, тобто високотемпературних нітридів і карбідів.

Важливою особливістю організації структури КМК групи ВЛ є просторове відокремлення частинок  $cBN$  одна від одної прошарками матричного матеріалу, що призводить до необхідності ретельної гомогенізації сумішей з приблизно рівними об'ємними частками основних складових композиту перед спіканням.

Початкова дисперсність матричної складової може наблизитися, але не перевищувати, дисперсність армувального компонента, з огляду на принцип пакування частинок  $cBN$  і матриці за типом структури зі щільним пакуванням куль з першою координаційною сферою тетраедричного типу.

**Табл. 3.2. Характеристики ПКНБ марки «киборит»**

Характеристика	Киборит-1	Киборит-2	Киборит-3	Киборит-4	Киборит-5	Киборит-6
Кількість $cBN$ , %	96–97	84	65–70	70–75	70–75	65–70
Температура спікання, К	2100... 2300	1600...1750				
Тиск спікання, ГПа	7,0...8,0	4,0...4,5				
Розмір зерен $cBN$	3...14	30	3...7			
Склад зв'язуючого	$AlN, AlB_{12}$	$AlN, AlB_2$	$TiC, AlN, AlB_2$	$TiB_2, AlN$	$TiN, AlN, TiB_2$	$ZrN, AlN, ZrB_2$
Густина, $г/см^3$	3,42...3,45	3,36...3,38	3,64...3,66	3,45...3,47	3,63...3,65	3,75...3,77
Твердість, ГПа	32...36	28...30	26...28	31...33	27...29	25...27
Тріщиностійкість, $МПа \cdot м^{1/2}$	9...12	10...13	7...9	6...8	8...10	
Теплопровідність, $Вт/(м \cdot К)$	150	90	70	–	–	–

\* Для виготовлення елементів конструкцій висота – до 25 мм.

Одним из главных факторов у виборі матеріалів для використання в якості матриці в КМК, є висока стійкість їхньої специфічної структури до оксидування, обумовлена як фізико-хімічною природою сполук, так і структурними особливостями фаз.

Механізм стримування дифузійного проникнення кисню в об'єм матеріалу пов'язують з аморфністю (скловидності) структур, у яких відсутні шляхи легкого транспортування  $O_2$  (міжзеренні межі), а також з утворенням суцільних захисних поверхневих оксидних шарів ( $SiO_2, Ta_2O_5$ ).

Підвищення температури спікання КМК з метою інтенсифікації процесу консолідації в матричному компоненті без ризику вийти із зони термодинамічної стабільності  $cBN$ , вочевидь, можливе завдяки використанню підвищених тисків (7...10 ГПа) в АВТ.

При отриманні структурованих КМК групи ВЛ, доцільно використовувати  $cBN$  не в нанодисперсному, а тільки в мікро- і субмікродисперсному стані (порошки фракцій 3/2; 2/1 і 1/0,5) в кількості 45...65 об.%(до 75 об.%) від загального об'єму матеріалу.

Порошок сполук для матричної структури має бути більш дисперсним, ніж порошок  $cBN$  для забезпечення ефекту «обвалакування». При істотному перевищенні об'ємної частки частинок  $cBN$  або алмазу щодо обсягу частинок сполук, які формують структуру матриці, це набуває особливого значення.

Механічні характеристики деяких композитів групи ВЛ представлені табл. 3.3.

**Композити групи ВС.**

Покриття на різальних інструментах з ПКНБ підвищують їхню зносостійкість, забезпечуючи стійкість до кратерного зносу, захищають інструмент від впливу високих температур, а також відіграють інформаційну роль, сприяючи більш точному визначенню величини зносу різального інструменту.

**Табл. 3.3. Фізико-механічні характеристики композитів групи ВЛ**

Склад*, об.%	Густина КМК, г/см <sup>3</sup>	Твердість HV <sub>0,5</sub> , ГПа	Коефіцієнт тріщиностійкості K <sub>1c</sub> , МПа·м <sup>1/2</sup>	Модуль Юнга, ГПа
cBN <sup>1</sup> -TaN	8,01	31,9±1,7	–	515
cBN <sup>1</sup> -TiN	4,34	32,8±2,4	–	520
cBN <sup>1</sup> -TiN	4,29	35,4±1,8	–	–
wBN <sup>1</sup> -TiN	4,30	36,8±2,1	–	–
cBN <sup>2</sup> -wBN <sup>3</sup> -TiN	3,90	36,4±1,9	–	–
cBN <sup>1</sup> -TiC	4,13	37,1±4,2	–	530
wBN <sup>1</sup> -TiC	4,05	39,1±3,3	–	–
cBN <sup>4</sup> -TiC	3,76	40,2±2,3	–	620
cBN <sup>2</sup> -Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -Al	4,70	32,0...34,0	5,20...5,90	545
cBN <sup>2</sup> -Cr <sub>2</sub> N-Al	4,45	34,0...32,0	4,50...5,20	575
cBN <sup>2</sup> -CrB <sub>2</sub> -Al	4,22	37,0	2,20...2,90	580...625
cBN <sup>2</sup> -TaN-Al-SiC <sub>w</sub> <sup>5</sup>	4,30	29,0	3,98	274
cBN <sup>2</sup> -TaN-Al-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> w <sup>5</sup>	7,80	30,5	6,33	331
cBN <sup>2</sup> -TaN-Al-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> w <sup>5</sup>	4,60	24,0...28,0	5,60...7,70	630
cBN <sup>2</sup> -TaN-Al- Mg <sub>2</sub> B <sub>2</sub> O <sub>5</sub> w <sup>5</sup>	7,26	29,3	2,49	325

\* Концентрація компонента, %: 1. 45...55; 2. 60; 3. 15; 4. 75; 5. 10. Індекс «w» вказує на компоненту у вигляді волокон.

Нині розроблено широку гаму покриттів для інструментів з ПКНБ, наприклад nAlCo(AlTiN-TiAlN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), n-TiAlN, TiAlN, TiN, TiSiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NbN, α-BN, AlCrN. Використовуються як покриття з відносно простим складом, так і, одношарові та багатошарові наноструктурні покриття.

Вибір покриття для кожного випадку механічного оброблення пов'язаний з умовами термобаричного навантаження інструменту в зоні різання, та залежить від механічних, теплофізичних та хімічних властивостей матеріалу, що обробляється, температури і рівня контактного навантаження на робочих ділянках інструменту.

На основі великої кількості досліджень механізму впливу різних покриттів на закономірності зношування інструментів з ПКНБ, можна зробити висновок, що перспективи створення покриттів пов'язані з вибором їх структурних складових, які забезпечують утворення на робочих поверхнях інструменту високотемпературних поліоксидних трибоплівків, що відіграють роль твердого мастила, введенням до складу покриття з'єднань, що є інгібіторами реакцій хімічної взаємодії в зоні оброблення, можливістю зниження температури в зоні різання за рахунок менших коефіцієнтів тертя та контактних навантажень на майданчиках контакту інструменту.

### 3.4. Алмазні матеріали, отримані CVD-методом, та гібридні композити на основі алмазу

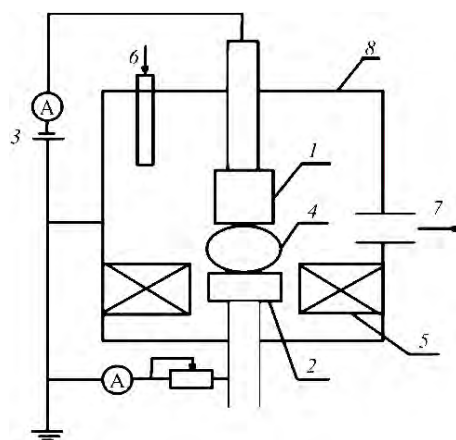
Поряд з  $hp-hT$  способами одержання алмазу в області його термодинамічної стабільності розроблено технології хімічного синтезу з різних вуглецевмісних речовин у нерівноважних умовах (без визначальної ролі високого тиску).

Розроблено газофазний метод хімічного епітаксійного синтезу алмазу, що ґрунтується на «високотемпературній високоградієнтній хімічній транспортній реакції з селективною кристалізацією алмазних плівок». Пізніше цей метод набув популярності як CVD-метод (chemical vapor deposition). Схема установки для синтезу алмазу CVD-методом наведена на рис. 3.5.

Принципова відмінність хімічного синтезу з малих вуглецевмісних молекул від отримання алмазу синтезом з графіту при високих тисках полягає не в тому, що перший спосіб може реалізуватися без високих тисків (і навіть у вакуумі), а другий – тільки при жорстких  $p$ ,  $T$ -параметрах, а у відмінності їх макрокінетичних умов. Утворення алмазних кристалів за першим способом відбувається тільки в нерівноважних умовах у відкритих каталітичних системах, а за другим способом воно відбувається в рівноважних умовах, у закритих системах.

Процес хімічного газофазного осадження включає хімічну реакцію у газовій фазі, що відбувається над поверхнею твердої підкладки, і в результаті якої відбувається осадження кінцевого продукту реакції на поверхню підкладки.

Всі CVD методи для створення алмазних плівок вимагають способу активації вуглецевмісних молекул вихідного продукту реакції.



**Рис. 3.5.** Схема установки для CVD синтезу алмазу: 1 – циліндричний катод, що охолоджується водою; 2 – тримач пластин; 3 – джерело живлення; 4 – зона розряду; 5 – кільцевий постійний магніт; 6 – напуск газу; 7 – відкачування газу; 8 – вакуумна камера

Відомі способи активації гарячою ниткою, хімічним полум'ям, плазмою дугового розряду постійного струму, плазмовим струменем, що ежектуються з дугового розряду, мікрохвильовими (НВЧ) розрядами, плазмою потужних безперервних  $\text{CO}_2$ -лазерів. Всі ці методи розрізняються в деталях, але при цьому вони повинні відповідати загальним вимогам, наприклад, зростання алмазної плівки (а не осадження інших, не таких чітко визначених форм вуглецю) зазвичай вимагає, щоб підкладка підтримувалася при температурі в діапазоні до  $\sim 1000$  °C і що вихідний газ повинен бути розведений при надлишку водню.

Типові умови росту алмазних плівок при тисках нижче атмосферного:  $10^3 < p < 10^4$  Па, швидкість росту без слідів графіту  $\sim 1$  мкм/год на підкладках з температурою до  $\sim 1000$  °С, кристалізаційне газове середовище, нагріте до температури  $2500 \dots 3000$  °С, як правило, складається з водню та малої домішки вуглецевмісних газів (метан, ацетилен), що залишають вуглець для «будівництва» алмазної решітки.

Морфологія CVD-алмазу, що вирощується, чутлива до умов зростання (хімічний склад середовища і підкладки, спосіб і швидкість осадження на підкладку тощо

) і в залежності від ступеня досконалості вирощений матеріал може бути як монокристалічним CVD-алмазом з високим ступенем досконалості кристалічної структури, так і полікристалічним CVD-алмазом з високим вмістом структурних дефектів, що викликають у ньому сильне оптичне поглинання (так званий «чорний алмаз» – black diamond) або з досконалою структурою складових кристалітів (світлий CVD-алмаз), який застосовується в оптиці, пристроях для відведення тепла, і мікроелектронних пристроях.

Вирішальне значення в процесі плазмохімічного осадження алмазних плівок належить атомам водню, які є причиною реакцій розщеплення стійких молекул вуглеводню в газовій фазі, в результаті яких утворюються високо реактивні вуглецевмісні радикальні фракції. Крім того, атоми водню завершують «обірвані» зв'язки вуглецю на поверхні алмазної плівки, що росте, і запобігають їх від утворення поперечних зв'язків, які призводять до створення графітоподібної поверхні.

Наступний важливий процес, що проходить при CVD-синтезі, в якому беруть участь атоми водню – це травлення. Атоми водню травлять як алмаз, і графіт але, за типових умов зростання плівок в плазмохімічному реакторі, швидкість зростання алмазної плівки перевищує швидкість травлення, тоді як інших форм вуглецю (графіту, наприклад) все відбувається з точністю до навпаки. Це є основою для кращого осадження не графіту, а алмазу.

В даний час доступні полі- та монокристалічні плівки та пластини з CVD-алмазу діаметром більше 100 мм і товщиною від одиниць мікрометрів до  $1 \dots 3$  мм, які отримуються з використанням CVD-процесу при температурах  $700 \dots 1000$  °С та робочому тиску  $30 \dots 100$  Тор.

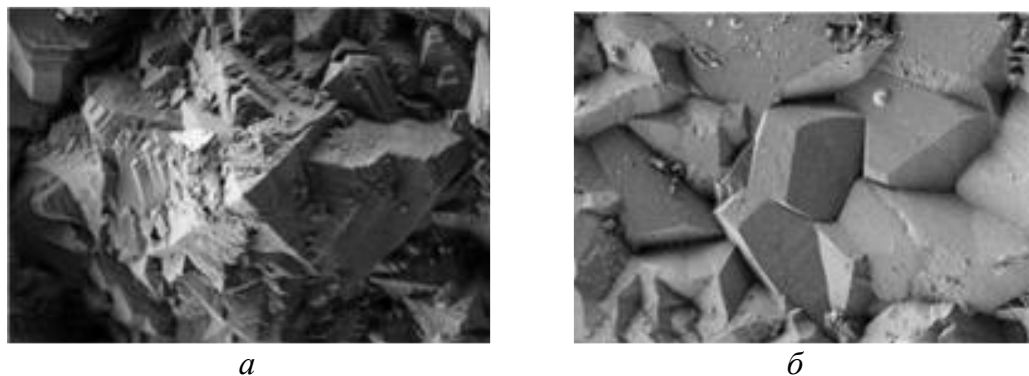
На відміну від алмазної кераміки, одержуваної шляхом спікання алмазного порошку, синтезований із газової фази CVD-алмаз не містить сполучного. За своїми характеристиками він ближчий до монокристалів алмазу. При високій чистоті реакційних газів вміст азоту в алмазі може бути доведена до 1 ppm.

Матеріал, виготовлений в результаті CVD-процесу, характеризується морфологією, чутливою до точних умов зростання. Швидкості зростання для різних процесів осадження значно варіюються і зазвичай відбувається, що більш високі швидкості росту можуть бути досягнуті за рахунок відповідної втрати якості CVD-алмазу.

В даний час єдиним методом отримання штучних монокристалічних алмазних шарів з високою якістю, що повторюється від кристала до кристала, є осадження алмазу з газової фази в плазмохімічних реакторах з активацією вуглецевмісного газу плазмою надвисокочастотного (НВЧ) розряду.

Мікроелектронні зображення фрагментів ростової поверхні CVD алмазів, вирощених із різними швидкостями зростання, показано на рис. 3.6.

На рис. 3.6, *а* помітна вершина чотиригранної піраміди з утвореними на її гранях новоутвореннями, з неупорядкованим фронтом зростання кристалітів з вершинами у вигляді квадратних та прямокутних площин, на рис. 3.6, *б* показаний фрагмент найбільш досконалої ростової поверхні CVD алмазу з ограненою формою кристалітів, отриманої зі швидкістю зростання 1 мкм/год.



**Рис. 3.6.** Зображення фрагментів ростової поверхні CVD алмазів, вирощених з різною швидкістю: *a* – 5 мкм/год; *б* – 1 мкм/год

У табл. 3.4 наведено основні фізичні властивості CVD-алмазів згідно з даними фірми «Diamond Materials GmbH».

**Табл. 3.4.** Фізичні властивості CVD-алмазів

Властивості	Величина
Твердість за Кнупом, ГПа	до 110
Модуль Юнга, ГПа	900...1100
Коефіцієнт Пуассона	0,1
Міцність на стиск, МПа	до 1200
Густина, г/см <sup>3</sup>	3,515
Коефіцієнт термічного розширення, К <sup>-1</sup>	$1,0 \times 10^{-6}$
Теплопровідність при комнатній температурі, Вт×м <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>	> 1800

За даними компанії "Element Six", термостабільність CVD-алмазу становить 870...920 К.

CVD-алмаз знаходить все більше застосування як інструментальний матеріал і випускається у вигляді двох різновидів: тонкошаровий (покриття на різальних інструментах товщиною від декількох до десятків мікрметрів) та товстошаровий (моно- та полікристалічні диски діаметром до 150 мм товщиною 6 мм).

Тонкошарові CVD-алмази мають застосування в різальних інструментах, що стало можливим завдяки їх високій гнучкості, тому що вони можуть бути нанесені на підкладку з практично будь-якою геометрією.

Нанесення CVD-покриттів товщиною 15...25 мкм на інструменти для точіння, свердління, фрезерування підвищують ефективність при обробленні титану, алюмінієвих сплавів, композитів.

Температура короточасного нагрівання при виготовленні та експлуатації інструменту з CVD-алмазом не повинна перевищувати 870...920 К, що пов'язано з його низьким коефіцієнтом теплового розширення та анізотропією властивостей.

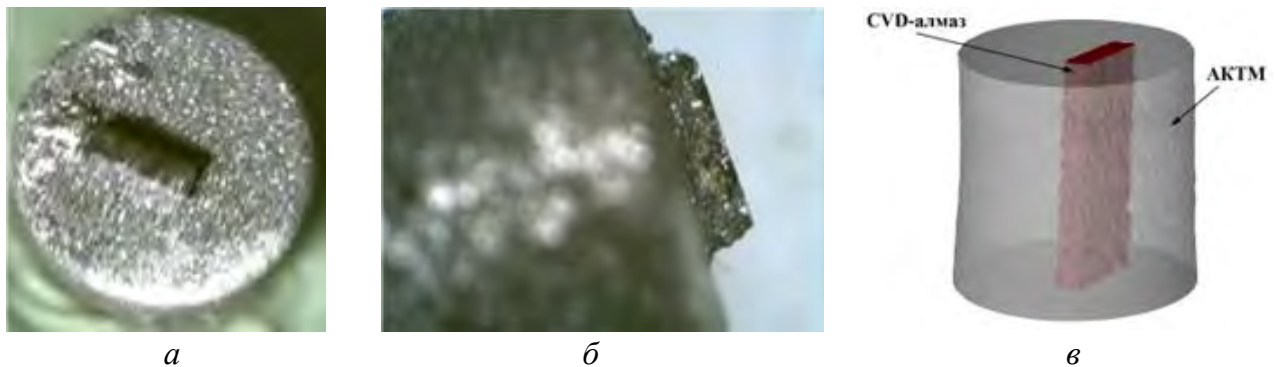
Розроблено спосіб спікання полікристалічного композиційного матеріалу, армованого CVD-алмазом, периметр якого частково або повністю в умовах високого тиску і температури покритий оболонкою з алмазного композиційного термостійкого

матеріалу (АКТМ), зі зв'язками типу алмаз-алмаз між зернами алмазу в композиті та елементом армування, диспергуванням у просторі між ними активуючої добавки.

Гібридний ультратвердий полікристалічний композит поєднує фізико-механічні та теплофізичні властивості CVD-алмазу з високими твердістю, міцністю та термостійкістю полікристалічної оболонки з алмазів статичного синтезу, що забезпечить ефективну роботу інструменту в складних умовах, зокрема при бурінні твердих порід, різанні та шліфування каменю, бетону.

Зовнішній вигляд зразків гібридного алмазного полікристалічного композиту (марка «гібридайт») з армуючою вставкою з CVD-алмазу показано на рис. 3.7, *а*, *б*. Уявлення про внутрішню будову композиту дає тривимірна модель, яка побудована за результатами томографічних досліджень на мікротомографі (рис. 3.6, *в*).

Зерна, що становлять каркас композиту – монокристали алмазу з високими фізико-механічними та теплофізичними властивостями. Наскільки ці властивості реалізуються в полікристалі, залежить від ступеня зв'язку алмаз-алмаз.



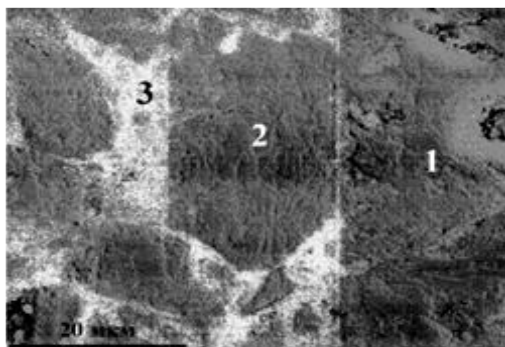
**Рис. 3.7. Зовнішній вигляд зразків гібридного алмазного полікристалічного композиту з армуючою вставкою CVD-алмазу: вид зверху (*а*), вид збоку (*б*); тривимірне зображення композиту (*в*), отримане методом рентгенівської мікротомографії**

Основна роль цьому процесі належить пластичній деформації частинок матеріалу, формуючого оболонку. У разі матеріалів з ковалентними зв'язками (представником яких є алмаз) для їх ефективної консолідації шляхом пластичної деформації, необхідна наявність високих тисків та температур, які відповідають термодинамічній стабільності цих матеріалів.

При виготовленні гібридного алмазного полікристалічного композиту слід враховувати такий факт. Температура початку пластичної деформації, зокрема, для мікропорошків алмазів становить 1220 К при тиску 6 ГПа. Розрахунками показано, що при спіканні тиск в точках контакту алмазних зерен може досягати 130 ГПа.

У той же час в порах між частинками алмазу тиск при спіканні значно нижчий, що є причиною утворення в них графіту або аморфного вуглецю. Для подолання цього небажаного ефекту необхідно використовувати процес спікання з активуючими добавками.

Використовуваний при спіканні гібридного композиту як активуючу добавку кремній, взаємодіючи з графітом або аморфним вуглецем, у порах утворює карбід кремнію. Створення додаткового зв'язку алмаз - карбід веде до зростання загальної міцності полікристалічної оболонки. Таким чином утворюється безперервний жорсткий каркас (рис. 3.8). Формована в умовах термодинамічної стабільності алмазу полікристалічна оболонка і CVD-алмаз є єдиним цілим.



**Рис. 3.8.** Зображення у вторинних електронах структури гібридного алмазного полікристалічного композиту: 1 – CVD-алмаз; 2 – алмазне зерно матриці; 3 – дрібні зерна алмазу та карбїду кремнію

Оскільки за фізичними властивостями складові матеріалу близькі, при виготовленні та експлуатації інструменту вплив термонапружень значно слабший, ніж при використанні традиційних матеріалів з CVD-алмазом, що підвищує ефективність його використання завдяки більшій міцності, термостабільності та зносостійкості.

Після спікання композиту в оболонці з алмазного композиційного термостійкого матеріалу (АКТМ) ( $p = 8$  ГПа,  $T = 1570$  К) твердість по Віккерсу світлого полікристалічного CVD-алмазу досягає 142 ГПа при навантаженні на індентор 4,9 Н, тоді як твердість вихідного CVD-алмазу (до спікання) – 77 ГПа, тобто твердість CVD-алмазу в композиті підвищується в 1,8 рази (табл. 3.5).

**Табл. 3.5.** Твердість CVD-алмазу в залежності від структури і умов баротермічного оброблення

Структура CVD-алмазу	Твердість HV, ГПа	Умови оброблення	
		$p$ , ГПа	$T$ , К
Монокристал	140...180	> 5	> 1800
Полікристал із стовбчатою кристалічною структурою**	130*	7,7	1600
Полікристал со стовбчатою кристалічною структурою**	85	вихідний	
Дрібнозернистий полікристал **	95*	7,7	1600
Дрібнозернистий полікристал **	92	вихідний	

\* CVD-алмаз в оболонці з полікристалічного алмазу (АКТМ); \*\* зразок містить неалмазний вуглець

В результаті баротермічного оброблення полікристалічного CVD-алмазу, його субструктура змінюється від фактично бездефектних складових частинок до появи в них внутрішніх меж розорієнтації, груп дислокацій, пакетів дефектів упаковки тощо.

Ступінь досконалості кристалічної структури CVD-алмазу впливає на формування фізико-механічних властивостей гібридного алмазного полікристалічного композиту, що і підтверджує вимірювання твердості CVD-алмаз різної структурної досконалості, запеченої в полікристалічну алмазну оболонку.

У CVD-полікристалі зі стовпчатою кристалічною структурою, у процесі його баротермічного оброблення при спіканні гібридного алмазного полікристалічного композиту формується складно-напружений стан, що зміцнює CVD-алмаз і призводить до істотного збільшення його твердості.

У той же час, у разі дрібнозернистого CVD-зразка, що містить неалмазну форму вуглецю, ефект підвищення твердості в результаті спікання при високому тиску та температурі не спостерігається.

Це пояснюється тим, що вихідна кристалічна структура вже є напруженою і наступна термобарична обробка істотно не впливає на фізико-механічні властивості CVD-алмазу з дрібнозернистою структурою.

### **Контрольні запитання**

1. Класифікація полікристалів надтвердих матеріалів.
2. Класифікація надтвердих матеріалів за способом отримання.
3. Полікристалічні матеріали на основі алмазу.
4. Полікристалічні матеріали на основі кубічного нітриду бору.
5. Особливості двохшарових надтвердих композитів.
6. Види композитів на основі кубічного нітриду бору за стандартом ISO 513- 2014.
7. Алмази, отримані CVD-методом.
8. Гібридні надтверді композити.

**РОЗДІЛ 4**  
**АЛМАЗНО- та cBN-АБРАЗИВНІ ІНСТРУМЕНТИ**

**4.1. Інструменти із порошками НТМ**

Основні види абразивних інструментів із НТМ представлені в табл. 4.1. Зазвичай такий інструмент використовуються для формоутворюючих та оздоблювальних операцій, які дозволяють отримувати плоскі або профільні поверхні, наскрізні та глухі отвори, уступи; виконувати розділові операції [1, 3, 5].

**Табл. 4.1. Абразивні інструменти із НТМ**

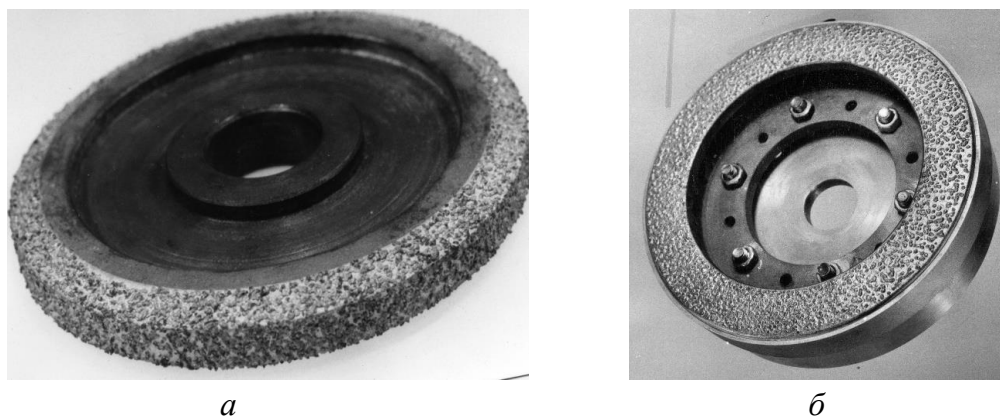
Інструмент	Загальна характеристика
1	2
Шліфувальний круг	інструмент у вигляді тіла обертання із НТМ-містким робочим шаром
Відрізний круг:	інструмент із НТМ-містким шаром у вигляді вузького кільця, призначений для різання матеріалів
із зовнішньою різальною кромкою	інструмент з НТМ-містким шаром у вигляді вузького кругівця, розташованим на зовнішній кругівцевій поверхні корпусу
із внутрішньою різальною кромкою	інструмент з НТМ-містким шаром у вигляді вузького кільця, розташованого на поверхні отвору в корпусі.
Сегментний круг	інструмент із зовнішнім НТМ-містким шаром на корпусі, робоча частина якого включає в себе ряд сегментів.
Смугова пила	інструмент у вигляді вузької металевої смуги, на одній з кромки якої закріплений ряд НТМ-прямокутних сегментів.
Головка	інструмент, що включає корпус із настановним хвостовиком.
Алмазний сегмент	брусок (частина кругівця) з композиту, що містить НТМ
Алмазна гільза	інструмент у вигляді порожнистого циліндра, на внутрішню поверхню якого нанесений НТМ-місткий шар, призначений для оброблення поршневих кругівців по зовнішній поверхні.
Алмазний барабан	інструмент, що складається з циліндричного корпусу, на зовнішню поверхню якого нанесений НТМ-місткий шар.
Алмазне свердло	інструмент у вигляді циліндричного стрижня для свердління отворів у склі, кераміці, будматеріалах; застосовують цілісні свердла і трубчасті коронки, що містять НТМ.
Нескінченна пила	інструмент у вигляді гнучкої металевої стрічки із замкнутим контуром, робоча частина якого оснащена елементами з НТМ.
Канатна пила	інструмент у вигляді сталевих канатів із закріпленими на ньому елементами з НТМ.
Брусок	інструмент, форма якого утворена комбінацією плоских або фасонних поверхонь з прямолінійними утворюючими, що мають НТМ-місткий шар на одній або декругівькох поверхнях.
Хонінгувальний брусок	інструмент у вигляді прямокутних НТМ-містких блок-брусків, що виготовляються на різних зв'язках та поділяються на окремі елементи при оснащенні хонінгувальних головок, суперфінішних брусків, ручних брусків та надфілів.

Закінчення табл. 4.1

1	2
Блок-брусок	інструмент, що включає сукупність брусків, які містять НТМ, конструктивно об'єднаних між собою.
Притир	інструмент, форма та розміри робочої частини якого збігаються із заданими формою та розмірами оброблюваної поверхні.
Зубчастий хон	інструмент, що має форму зубчастого колеса
Проволока	абразивний інструмент у вигляді дроту, на поверхню якого нанесений НТМ-місткий шар.
Шліфувальна шкурка	інструмент, що складається з матерчатої або паперової підкладки з нанесеним робочим шаром з порошків НТМ
Шліфувальна стрічка	інструмент у вигляді шліфувальної шкірки прямокутної форми з нанесеним робочим шаром із порошків НТМ
Нескінченна шліфувальна стрічка	інструмент у вигляді замкнутого контуру шліфувальної стрічки
Еластичний інструмент	інструмент, робоча частина якого під дією навантаження набуває форми оброблюваної поверхні, а після зняття навантаження повертається в початковий стан
Надфіль	інструмент у вигляді металевого стрижня, на робочій поверхні якого закріплений НТМ-місткий шар.
Розширювач	інструмент у вигляді металевого корпусного стрижня, робоча поверхня якого складається з суцільного або переривчастого НТМ-місткого шару.
Алмазний правлячий інструмент:	інструмент фасонної або циліндричної форми, що застосовується для виправлення шліфувальних кругів із звичайних абразивів.
ролик	правлячий інструмент, робоча частина якого має форму тіла обертання.
олівець	правлячий інструмент у вигляді стрижня, на торці якого закріплений алмаз.
гребінка	правлячий інструмент з ріальною частиною прямокутної форми, на якій розташовані один або кілька кристалів або полікристалів алмазу.
Прокат, що містить НТМ	інструмент у вигляді пластин, з яких вирізують необхідні робочі елементи – стрічки та кругівця для шліфувальних кругів, що використовуються для заточування дрібно-розмірного твердосплавного інструменту, для різання заготовок із твердих сплавів та неметалевих матеріалів; з прокату виготовляють сферичні гриби та чашки для зняття фасок на напівпровідникових елементах радіоелектроніки, а також притири для доведення отворів у деталях паливної апаратури та інші інструменти

Абразивні інструменти виготовляються з моно- та полікристалічних НТМ, а також з агрегатів НТМ.

Інструменти з агрегатів НТМ (рис. 4.1) є гібридними, оскільки вони поєднують функції абразивно-лезового інструменту та призначені для високопродуктивної оброблення деталей як торцем, так і периферією робочого шару.



**Рис. 4.1. Інструменти з агрегатів НТМ з периферійною (а) і торцевою (б) робочою частинами**

## 4.2. Типи зв'язок алмазовмісного шару та методи викладання алмазних зерен

### 4.2.1. НТМ-композити на металевій зв'язці

Склади металевих зв'язок для алмазно-і CBN-абразивного інструменту вибирають в основному в системах Cu-Sn; Cu-Al-Zn; Co-Fe-Ni; Co-Fe; Co; Ni-Fe-Cu. Мідно-олов'яністі композиції, наповнені порошками НТМ, широко використовуються для виготовлення інструменту, що застосовується в першу чергу для оброблення неметалевих та металевих матеріалів (шліфувальні та відрізні круги, свердла тощо).

Використовуються алмази марок АС6...АС65 зернистістю 50/40...630/500, і навіть алмазні мікропорошки АСМ 2/1...АСМ 60/40.

Для поліпшення різальної здатності інструментів у зв'язку вводяться наповнювачі різного функціонального призначення. Так сульфід, графіт та фториди виконують роль твердих мастил. Для зниження пластичності в матрицю на основі мідь-олово вводиться кілька крихких і твердих добавок – диборидів, оксидів та інших сполук. Об'ємна частка наповнювача в залежності від матеріалу зв'язуючого становить 3...20%.

Інструменти, виготовлені на основі Cu-Al, використовують для оброблення як твердих сплавів, так і неметалічних матеріалів. В основу зв'язуючих вводять різні наповнювачі, що підвищують антифрикційні властивості, міцність, антикорозійні властивості. Застосовуються алмазні порошки тих самих марок та зернистостей, що і для зв'язок на мідно-олов'яністій основі.

Композиції на основі заліза, нікелю, кобальту, як правило, включають один або два метали тріади заліза. Інструмент використовують для оброблення природних і штучних будівельних матеріалів, що відрізняються високою твердістю і абразивною здатністю. Тому для таких інструментів застосовують високоміцні алмази марок АС65...АС200 зернистістю 250/200...500/400.

Металеві зв'язки позначаються індексом "М" і цифрами: перша характеризує групу зв'язки, друга – порядковий номер складу в цій групі.

До першої групи відносять зв'язки переважно на основі алюмінію, наприклад М1-01; до другої – універсальні зв'язки широкого призначення на основі мідь-олово, наприклад М2-09; до третьої групи – зв'язки, що використовуються для виготовлення інструменту методом прокату і вакуумної технології.

Четверта група включає зв'язки, що виготовляються методом гальваностегії з одношаровим розташуванням алмазів. У п'яту групу включені зв'язки для хонінгування, притирання, доведення, суперфінішування, в шосту – зв'язки для інструменту для оброблення каменю, будівельних матеріалів, гірських порід.

Алмазні і cBN-частинки в металевій зв'язці можна закріплювати різними методами, але промислове значення мають два методи: порошкової металургії та електрохімічного осадження, причому в загальному обсязі випуску переважає інструмент, виготовлений методами порошкової металургії.

#### 4.2.2. Гальванічна зв'язка

Розроблено композиційні електрохімічні покриття, які є гетерофазною системою, що складається з електрохімічно обложеного металу (сплаву) та частинок дисперсної фази.

Композит (алмазо-гальванічне покриття АГП) утворюється в процесі електрохімічного осадження металу з одночасним включенням в осадок, що знаходяться в зіткненні з катодом зерен алмазу. Контакт порошку алмазу з поверхнею катода здійснюють декількома способами.

Наприклад, порошок алмазу знаходиться у ванні у спеціальному пристосуванні, що перешкоджає поширенню його по всьому об'єму електроліту, а деталь, що виготовляється, поміщається в товщу порошку.

При цьому порошок алмаза знаходиться на дні ванни і змучується після занурення деталі в електроліт, при цьому порошок, що осідає, покриває поверхню катода. Існують і інші способи зіткнення порошку алмазу з поверхнею катода. Процес утворення композиту складається з двох основних етапів: прикріплення та остаточне закріплення порошку алмазу.

Метод закріплення зерен алмазу електролітично обложеним металом дозволяє виготовляти алмазні інструменти практично будь-якого профілю та розмірів. У випадках, коли необхідність розробки та застосування нових нестандартизованих видів інструменту, найбільш оперативно і з меншими витратами вони можуть бути виготовлені гальванічним методом.

#### 4.2.3. НТМ-композити на органічній зв'язці

Алмазний інструмент на полімерному зв'язуючому знаходить широке застосування в промисловості (до 70% від загального споживання алмазного інструменту) при обробленні різних матеріалів, в основному металів і сплавів, що використовуються в машинобудуванні.

В якості сполучних полімерних зв'язок застосовують мономери та олігомери, що відрізняються між собою фізико-механічними та фізико-хімічними властивостями, температурами склування та деструкції.

Широке застосування для виготовлення алмазних інструментів знайшли наступні полімери: новолачний фенолформальдегідний олігомер СФ-012, фенольне сполучне СФП-012А (суміш олігомеру СФ-012 із затверджувач-агентом – гексаметилентетрааміноміл), резольна безаміачна анілін-фенолформальдегідна смола СФ-342А. Синтезовані, досліджені та використовуються для виготовлення алмазного інструменту сополімер-1 на основі епоксидіанового олігомеру (мол. м. 1050 75) і смоли СФ-342А і сополімер-2 на основі цього ж епоксидіанового олігомеру і фенольного зв'язуючого СФП-012.

Для виготовлення хонінгувального алмазного інструменту та інструменту для чистового оброблення різних матеріалів в якості зв'язуючого застосовують політетрафторетилен (фторопласт-4) та інші неполярні високомолекулярні фторвмісні карбоцепні полімери. Як правило, наведені олігомери і полімери в промисловості випускають у вигляді порошків з різним розміром зерен.

Для регулювання властивостей алмазозносного шару інструменту в полімерне зв'язуюче вводять наповнювачі різного функціонального призначення.

Для підвищення зносостійкості інструменту в робочий шар вводять високомодульні порошкові наповнювачі – карбіди бору, кремнію, бориди тощо, а для підвищення теплопровідності – порошки металів (мідь, олово, вісмут, залізо тощо). Широко використовують як наповнювачі речовини, що виконують роль твердих мастил – графіт, гексагональний нітрид бору, тальк тощо.

У НТМ-містних композитах на полімерній зв'язці вводять також хімічно активні компоненти (наповнювачі) для створення корозійно-активного технологічного середовища в зоні оброблення. Таке середовище активізує розміщення і зменшує енергію руйнування і роботу диспергування мікроповерхневого шару і, отже, послаблює механічні і термічні навантаження на алмазне зерно і зв'язку інструменту, що полегшує оброблення, наприклад, титанових і залізобуглецевих сплавів.

У зв'язку з появою нових областей застосування інструменту на основі НТМ і підвищенням вимог до його функціональних характеристик значно розширюється коло полімерних сполучних, що використовуються для виготовлення НТМ-містних композиційних матеріалів.

Розроблено алмазно-абразивні композити на основі поліамідних сполучних, що являють собою термореактивні олігомери, здатні при нагріванні отверджатися з утворенням сітчастих полімерів. Полііміди поєднують високу механічну міцність з хорошими антифрикційними властивостями. Істотною перевагою таких зв'язуючих є також підвищена адгезія до поверхні алмазу, кубічного нітриду бору і наповнювачів, перерахованих вище, що застосовуються для виготовлення інструменту.

На поверхню порошків наносять покриття, теплопровідність яких у десятки разів нижче, ніж теплопровідність алмазу і cBN, тому покриття служить тепловим бар'єром, що різко зменшує вплив теплових потоків на полімерне зв'язуюче. Розроблено технологічні процеси нанесення склопокриттів і металопокриттів на порошки НТМ.

Для кожного оброблюваного матеріалу і виду оброблення вибирають інструмент, виготовлений з алмаз- і композиційного СBN на полімерній зв'язці оптимального складу.

Особливі групи композитів на органічній зв'язці складають композити на каучуковмісних і силосанових зв'язках.

Для виготовлення каучуковмісної зв'язки використовують суміші синтетичного бутадієн-нітрильного каучуку, поєданого з полівінілхлоридною смолою, з добавками вулканізуючих агентів (сірки), наповнювачів, прискорювачів вулканізації та пом'якшувачів.

Фізико-механічні властивості та еластичність матеріалів багато в чому залежать від вмісту сірки. Для отримання гнучких інструментів вміст сірки до маси каучуку не повинен перевищувати 10...15 %. У тих випадках, коли кількість сірки становить 30...40%, отримують жорсткі ебонітові або напівебонітові зв'язки.

Основні види алмазного еластичного інструменту широко використовується в промисловості:

- алмазні полірувальні стрічки (АП) – для полірування сталевих, чавунних деталей;
- алмазні еластичні диски (АЕД) – для приготування найрізноманітніших метало-мінералографічних шліфів, полірування каменів - самоцвітів, оздоблювального каменю;

– алмазні хонінгувальні блок-бруски (АББХ) – для хонінгування отворів у сталевих та чавунних деталях;

– алмазні термопластичні полірувальні стрічки (АТПЛ) – для полірування та віброполірування складнопрофільних деталей із залізвуглецевих, титанових, жароміцних сплавів та інших матеріалів;

– алмазні шліфувальні переривчасті блоки (АБШЛ) – для оброблення газотермічних зносостійких покриттів з оксиду алюмінію, твердого сплаву, карбідів вольфраму, хрому, титану та інших матеріалів, а також покриттів, в які легуючими елементами є кобальт, хром, молібден.

За сукупністю робочих характеристик – стійкості, продуктивності оброблення, можливості забезпечення заданих параметрів макро- і мікрогеометрії оброблених поверхонь – найкращим типом шліфувальних композитів, наповнених порошками синтетичного алмазу або кубічного нітриду бору, можна вважати композити, що поєднують властивості матеріалів на керамічних і зв'язках.

У якості зв'язуючих у таких композитах виступають неорганічні полімери силоксанової будови (-Si-O-Si-O-). Такі зв'язуючі дозволяють отримати абразивні композити, структура яких забезпечує їм поєднання переваг, властивих шліфувальним кругам на керамічних і полімерних зв'язках. Висока гнучкість молекул полімеру сприяє формуванню вчиненого адгезійного контакту зв'язуючого з поверхнею наповнювача, як за рахунок сил Ван-дер-Ваальса, так і внаслідок хемосорбції.

При термообробленні лінійний силоксановий полімер переходить у сітчасту склоподібну структуру з високою механічною міцністю та термостійкістю.

Варіюючи тиск і температуру термооброблення в прес-формі, температуру подальшого термооброблення поза прес-формою, отримують композити для шліфувальних кругів з НТМ, що мають широкий діапазон властивостей.

Під ступенем конденсації силоксанового полімеру мається на увазі вихідні органічні функціональні групи, що видаленні в ході термооброблення з утворенням поперечних зв'язок -Si-O-Si-.

Помірна ступінь конденсації, при використанні спеціальних каталізаторів, дозволяє отримувати композити з властивостями, характерними для термостійких органічних полімерів. Шліфувальні круги на їх основі мають високий рівень властивостей, відповідних технологічній ніші абразивних інструментів на полімерних зв'язках. Це – поєднання високої стійкості з відносно низькою температурою в зоні різання, що забезпечує сприятливий структурний стан оброблених поверхонь і різальних кромок виробів з твердих сплавів.

Підвищена температура термооброблення композитів на основі лінійних силоксанових олігомерів, модифікованих іонами  $Li^+$  і  $Zr^+$ , дозволяє шляхом твердофазного спікання-конденсації отримувати кремнекисневі керамічні композити з високим ступенем конденсації силоксанового полімеру, перспективні як керамічні.

Шліфувальні круги на силоксанових зв'язках дозволяють, при роботі з МОТС, поєднувати великі знімання оброблюваних матеріалів з гарною розмірною стійкістю інструменту і високим рівнем експлуатаційних властивостей оброблених поверхонь.

Характеристика фізико-механічних властивостей композитів на основі силоксанових зв'язників представлена в табл. 4.2.

#### 4.2.4. НТМ-композити на керамічній зв'язці

Абразивний інструмент з алмазів і cBN на керамічних зв'язках ефективно використовується в промисловості на різних операціях оброблення металевих і

неметалевих виробів. Цей вид інструменту розглядається як один з перспективних у масовому виробництві різних виробів на операціях внутрішнього, зовнішнього, плоского і врізного шліфування та хонінгування. Темпи застосування інструменту на керамічних зв'язках останніми роками збільшуються.

**Табл. 4.2. Фізико-механичні характеристики композитів на основі силікоксанового зв'язуючого**

Марка і зернистість абразиву	Концентрація абразиву	Границя міцності під час стискування, МПа	Твердість HRB	Питома ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup>	Модуль пружності, МПа 10 <sup>-4</sup>	Микротвердість, МПа
АСМ 40/28	12,5	122,5	89	0,29	3,9	1640
АСМ 40/28	25,0	131,1	96	0,33	4,1	1955
АС4 100/80	12,5	127,2	87	0,25	4,1	1570
АС4 100/80	25,0	143,8	101	0,21	3,8	1910
КМ 40/28	12,5	123,3	84	0,31	4,2	1870
КМ 40/28	25,0	135,0	93	0,35	4,4	2240
КМ 100/80	12,5	129,1	88	0,26	4,1	1770
КМ 100/80	25,0	147,3	98	0,22	4,3	2080

Шліфувальні інструменти на керамічних зв'язках легко правляться, є можливість регулювання їх пористості. Круги мають менші сили різання за рівної продуктивності порівняно з інструментом на інших видах зв'язок. Шліфування кругами на керамічних зв'язках призводить до меншого нагрівання обробленої поверхні, до виникнення у оброблюваної деталі напружень стиснення, тоді як при шліфуванні, наприклад, корундовими кругами виникають розтягуючі напруження.

Завдяки високій зносостійкості, низькому коефіцієнту тертя, високій теплостійкості та ряду інших властивостей керамічні зв'язки є перспективними на ряді операцій чорнового та фінішного оброблення матеріалів. Основою більшості керамічних зв'язок є скло різного хімічного складу. Від їх властивостей значною мірою залежать властивості інструмента. Склооснова зв'язки повинна мати високу змочуючу здатність по відношенню до НТМ і наповнювачів.

Адгезійна активність скла до НТМ повинна забезпечувати високу міцність утримання їх у матриці інструменту. Невисока реакційна здатність основи зв'язки по відношенню до наповнювачів гарантує їх збереження в процесі виготовлення інструменту. Однією з основних умов є мінімальна різниця в температурних коефіцієнтах лінійного розширення матеріалів, що входять в композит зв'язки.

Різальний шар інструменту на керамічних зв'язках є композиційним матеріалом, у склад якого входить НТМ, скло і наповнювачі.

Основне завдання при розробці таких матеріалів – забезпечити міцне закріплення частинок абразиву в матриці, створити умови максимально можливої фізичної та хімічної сумісності компонентів матеріалу і в той же час збереження властивостей склооснови, абразиву та наповнювачів в умовах виготовлення та експлуатації інструменту.

В якості зв'язуючого керамічних зв'язок алмазного інструменту найбільшого поширення набуло скло в системі  $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ , модифіковані різними оксидами.

Так, наприклад, зв'язка марки К1-01 утримує у своєму складі скло, обране в даній системі, шамот, карбід бору та алюміній.

У склад зв'язки марки К2-01 входить скло та силікат цирконію. На основі цього ж скла, силікату цирконію, тальку і цинку розроблена зв'язка марки СК-3. Зв'язка СК-7 містить скло, оксид хрому та полірит. У складі зв'язки К3-01 міститься скло, тонкозернистий  $Al_2O_3$  і гексагональний нітрид бору. Безпористий матеріал композиту утворюється при взаємодії натрійборосилікатного скла з оксидами заліза та алюмінію.

Таким чином, склокомпозити на основі скла системи  $Na_2O-B_2O_3-SiO_2$  включають як інертні, так і хімічно активні добавки.

Для інструменту з  $cBN$  розроблені композиційні матеріали зв'язок на основі боросилікатного скла з літєвмісними наповнювачами. Так, наприклад, зв'язка марки С10 складається з боросилікатного скла, сподумену та кріоліту. У склад зв'язок на основі такого скла можуть входити кріоліт та літій, сурик, бадделіт та піролюзит, а також тальк, бета-сподумен та кріоліт.

Знайшли застосування низькотемпературні зв'язки для інструменту з порошків алмазу і  $cBN$  на основі свинцевмісних стекол у системах  $PbO-ZnO-B_2O_3-SiO_2$ ,  $PbO-ZnO-SiO_2$ ,  $PbO-B_2O_3-SiO_2$ ,  $PbO-B_2O_3$  та  $PbO-SiO_2$ . Залежно від призначення зв'язки у такі скла вводять легкоплавкі метали (олово, свинець, цинк, кадмій) з часткою 5...25 %; тугоплавкий ніхром - від 8 до 50%. Як неметалеві наповнювачі використовують полірит (5...60%); гексагональний нітрид бору (20...35 %) та оксид кадмію (2...20 %); гексагональний нітрид бору (10...30 %) та оксид цинку (1...15 %); графіт (12...30%). Відомо застосування зв'язок на основі суміші свинець-тримаючого композиту (59...82%) і боросилікатного скла (2...11%) з графітом (11...31%).

У таких зв'язках металеві наповнювачі дозволяють збільшити теплопровідність, зносостійкість і стійкість до ударів отриманих на їх основі алмазовмісних композитів. Для зниження коефіцієнта тертя таких зв'язок по оброблюваному матеріалу до їх складу вводять тверді мастила.

Позитивний вплив на фізико-механічні властивості зв'язок на основі свинцевмісного скла надає їх переведення в склокристалічний стан.

Максимальні зусилля міцності утримання зерен НТМ у скла, що містять оксид свинцю, мають скло в системах  $PbO-ZnO-B_2O_3-SiO_2$ ,  $PbO-ZnO-B_2O_3$  та  $PbO-B_2O_3$ .

Розплави скла певною мірою оберігають частинки алмазу від окислення. Втрати маси шліфпорошків знижується у 2...20 разів, а мікропорошків – 2...80 разів. Втрати маси порошків  $cBN$  у розплавах скла не перевищують 1...3 %.

Механічні властивості склаабразивних матеріалів визначаються видом скла, маркою абразиву та його зернистістю. Зносостійкість склокомпозитів підвищується зі збільшенням зернистості алмазу та  $cBN$ .

Міцність під час згинання склаабразивних матеріалів для спекаючихся і гарячепресованих композицій на основі натрійборосилікатного скла підвищується при введенні шліфзерна  $cBN$  замість алмазного, а також мікропорошків алмазу та  $cBN$ . Такий самий вплив в межах регулюють властивості композиційних матеріалів введенням різних наповнювачів.

Залежно від типу наповнювача регулюються міцність, твердість, зносостійкість, фрикційні та інші властивості матеріалу.

Можна істотно змінювати властивості скла за рахунок використання склооснови, як шляхом застосування скла різного хімічного складу, так і модифікацією вихідного скла різними оксидами. Крім цього, як основу зв'язки використовують суміші скла різного складу (табл. 4.3).

Табл. 4.3. Властивості композитів

Марка матеріалу	Основа матеріалу	Границя міцності під час згинання, МПа	Коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha \cdot 10^7, K^{-1}$	Твердість, HRB <sub>100</sub>	Мікротвердість основи, МПа
К1-01 (К1)	Скло системи Na <sub>2</sub> O–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> і інертні наповнювачі	45	37	90...100*	7600
К2-01 (СК)	Скло системи Na <sub>2</sub> O–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> і абразив	75	64	110...115*	7600
СК3	Скло системи Na <sub>2</sub> O–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> , абразив, тверде мастило	49	40	100...105*	7600
СК7	Скло системи Na <sub>2</sub> O–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> і абразиви	35	55	100...110*	7600
К17	Суміш скла систем PbO–ZnO–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> , Na <sub>2</sub> O–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> , тверде мастило	20	11	65...70* (HR15T)	2900
К18	Скло системи PbO–ZnO–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> і сплав металів	32	10	100...105**	2900
К19	Скло системи PbO–ZnO–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> і тверде мастило	27	12	35...40* (HR15T)	2900
К20	Скло системи PbO–ZnO–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> та дрібнодисперсний абразив	29	8	120...125**	3600
К31	Скло системи PbO–ZnO–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> и легкоплавкі метали	31	9	125...130**	2900
К41	Стекло системи Na <sub>2</sub> O–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> і суміш металів	140	59	110...115**	7600
К51	Скло системи PbO–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , абразив і тверде мастило	27	12	45...50* (HR15T)	1880

\* Кулька Ø 5 мм; \*\* Кулька Ø 1,588 мм.

#### 4.2.5. Композити, що адаптуються до умов навантаження

Одним з перспективних напрямів підвищення ефективності абразивного оброблення, є розробка та застосування адаптивних абразивних композитів. Адаптивна поведінка полягає в самопідстроюванні структури, а відповідно і властивостей, композиту, що включає зв'язку і зерна абразиву, в першу чергу – алмазу або CBN, до змінних умов у робочій зоні.

На відміну від традиційних абразивних композитів з позитивним зворотним зв'язком між ступенем деформації їх матеріалу та термомеханічними факторами різання, адаптивні композити демонструють негативний зворотний зв'язок.

Це означає, що в деякому діапазоні температур і сил різання інструментальний матеріал відповідає на їхнє зростання не збільшенням, а зменшенням своєї деформації. При такому типі адаптивної поведінки в поверхневому шарі інструменту певної глибини при інтенсифікації зовнішнього впливу відбувається оборотне збільшення жорсткості зв'язки і міцності адгезійної взаємодії зв'язуючого із зернами абразива. Цей процес супроводжується певною швидкістю і певною амплітудою зміни фізичних параметрів композиту.

Ключовим становищем у синтезі матеріалів, що розглядаються, є можливість формування елементів будови композиту, які мали б властивості «молекулярного реле». Мається на увазі здатність до оборотного переключення двох або декількох структурних станів під дією зовнішніх умов, що змінюються, з відповідною зміною мікро- і макроскопічних механічних властивостей матеріалу.

Такі структурні елементи можуть бути реалізовані в композитах на основі полімерних зв'язок. При цьому вони будуть являти собою або ділянки полімерних сіток в об'ємі затверділих сполучних, або сегменти полімеру, безпосередньо пов'язані з поверхнею наповнювача.

У другому випадку елементи структури композиту з властивостями «молекулярного реле» являють собою ділянки поверхні частинок наповнювача (порошки металу, його карбиду або нітриду з оксидованою поверхнею, або власне оксиду), модифікованої органічним реагентом, наприклад нафтиламином.

Ці ділянки є місцем хімічного щеплення до поверхні наповнювача молекул полімерного зв'язуючого.

Перемикання з одного стану в інший супроводжується встановленням міцних хімічних зв'язків полімерної складової композиту з поверхнею наповнювача за рахунок перенесення електронів від атомів металу на молекулу модифікатора, що викликає значне збільшення жорсткості структури.

Жорсткий матеріал, в якому значна частка поверхні частинок наповнювача пов'язана з полімерним зв'язуючим міцними хімічними зв'язками, формується в поверхневому шарі композиту під дією імпульсів температури та зсувних напружень у зоні різання. При цьому зерна абразива вирівнюються по висоті виступу над поверхнею зв'язки, а навантаження на одиничне зерно різко падає.

Величина зсувного напруження в поверхневому шарі зв'язки знаходиться на рівні, при якому стабільна найбільша структура, що забезпечує максимальну міцність утримання абразивних зерен. При повному розвантаженні системи структура композиту повертається до вихідного стану.

Динамічні та силові аспекти взаємодії зерен, закріплених у зв'язці абразивного композиту, з оброблюваною поверхнею, залежать від жорсткості зв'язки та від міцності утримання зерен зв'язуючою.

Адаптивні композити здатні до самопідналагодження цих параметрів у відповідь на зміни температури, інтенсивності вібрацій і зсувних напружень у зоні різання.

Загальна схема адаптивної поведінки сукупності абразивних зерен виглядає наступним чином. Зерна, що вступають в контакт з оброблюваним матеріалом, заглиблюються в нього і водночас деформують зв'язку.

Розсіювання енергії цієї деформації в речовині адаптивної зв'язки викликає її структурний перехід у більш жорсткий стан. Деформація швидко (в межах циклу контактування для цієї групи зерен) уповільнюється.

При цьому для тих зерен, які виступають з зв'язки сильніше інших, напруження різко збільшується, що ініціює перехід навколишнього зв'язування в стан зі зниженою жорсткістю. Більш виступаючі зерна будуть занурюватися у зв'язку, поки енергія, що розсіюється ними в прилеглому мікрооб'ємі композиту, не стане близькою до цього показника для інших зерен.

Основним наслідком для різального профілю абразивного композиту буде вирівнювання всіх зерен, що беруть участь у даному циклі контактування, по висоті їх виступу над зв'язкою.

При цьому, якщо об'єми зв'язки, на які поширюється процес трансформації навколо окремих зерен, перекриваються, зерна абразиву на робочій поверхні стають «обізнаними» про стан один одного. У результаті вони утворюють саморегульований ансамбль, що працює як одне ціле.

Як для традиційних, так і для адаптивних абразивних композитів кількість енергії, що передається композитом в оброблюваний поверхневий шар, збільшується з підвищенням контактної навантаження.

Для неадаптивних композитів це відбувається головним чином шляхом швидкого збільшення площі контакту, з малим збільшенням швидкості передачі енергії через одиницю площі.

Для адаптивних композитів, навпаки, площа контакту збільшується повільно, але швидкість передачі енергії через одиницю контактної площі висока.

Принципова зміна морфології контакту і швидкості передачі енергії через одиничний контактний переріз створює передумови для якісної зміни структури, властивостей та експлуатаційних показників поверхневого шару виробів, сформованих адаптивними абразивними композитами.

Застосування інструментів з адаптивними композитами дозволяє перейти від традиційного завдання шліфування – досягнення заданої якості обробленої поверхні виробу при максимальній швидкості видалення припуску та максимальному коефіцієнті шліфування, до завдання програмування контактної поведінки оброблених деталей при експлуатації, зі збереженням високих стандартів продуктивності та стійкості інструменту.

#### 4.2.6. Викладання алмазовмісного шару

##### 4.2.6.1. Інструменти з упорядкованим розташуванням зерен НТМ

Одним з напрямків підвищення ефективності процесів абразивного оброблення є створення інструментів з упорядкованим та/або орієнтованим розташуванням різальних зерен.

Широко поширене впорядковане розташування зерен при виготовленні шкурки. Для геометричної орієнтації зерен найчастіше використовують технологію орієнтації зерен у сильних електростатичних полях безпосередньо під час нанесення зерен на підкладку.

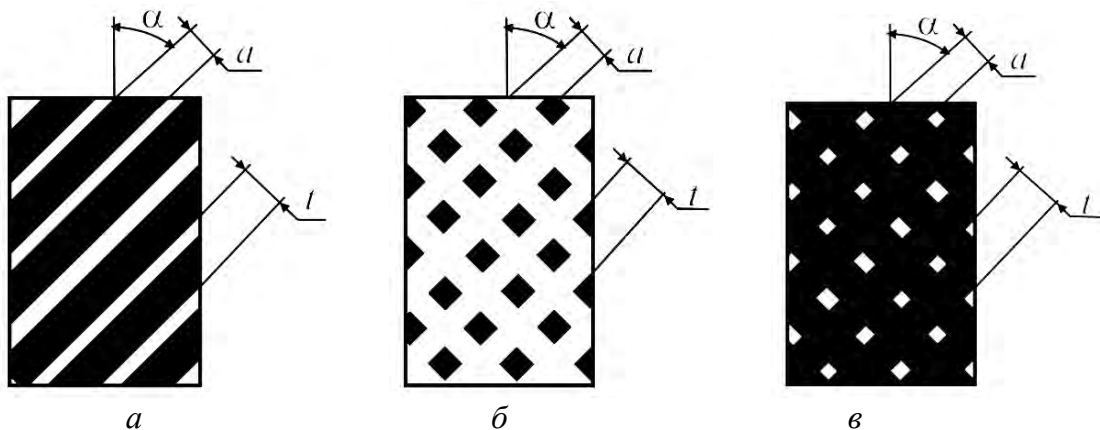
Рідше використовують поля для орієнтування в сильному електромагнітному полі металізованих алмазів. Для виготовлення шкурки з товстим робочим шаром іноді використовують орієнтування зерен алмазу у в'язкому перебігу ще рідкої абразивної маси, у вигляді потоку з великим градієнтом швидкості.

При виготовленні шкурки відкритого типу до 25 % загальної кількості виготовляються з програмним розташуванням робочого шару. При цьому масиви зерен алмазу чергуються певним чином з безабразивними проміжками, призначеними для підведення МОТС, відведення продуктів оброблення та зносу, тепла, а також для підвищення еластичності інструменту.

Найбільшого поширення набуло розташування робочої маси шарами (рис. 4.2, *a*), окремими скупченнями (рис. 4.2, *б*) та у вигляді шару з локальними безабразивними зонами (рис. 4.2, *в*).

Таке розташування дозволяє забезпечити необхідну кількість різальних зерен у межах зони контакту з певною відстанню між ними. Це забезпечує оптимальні умови для кожного зерна, підвищує продуктивність і стійкість інструменту, знижує його засолювання. Найчастіше такі шкурки застосовують при машинному обробленні, тому що в цьому випадку гарантуються певні технологічні режими оброблення в контактній зоні, які є вихідними для вибору конкретного виду робочого малюнка.

Таке розташування дозволяє забезпечити необхідну кількість різальних зерен у межах зони контакту з певною відстанню між ними. Це забезпечує оптимальні умови для кожного зерна, підвищує продуктивність і стійкість інструменту, знижує його засолювання.



**Рис. 4.2.** Шкурки з програмним розташуванням зерен алмазу

Найчастіше такі шкурки застосовують при машинному обробленні, тому що в цьому випадку гарантуються певні технологічні режими оброблення в контактній зоні, які є вихідними для вибору конкретного виду робочого рисунка.

Упорядковане розташування зерен алмазу використовується і при виготовленні окремих видів алмазного інструменту на гальванічній зв'язці. Оскільки для виготовлення гальванічного інструменту найбільш часто використовують порошок з високоміцних зерен алмазу, що мають коефіцієнт форми близький до одиниці, то їх орієнтацію не виконують.

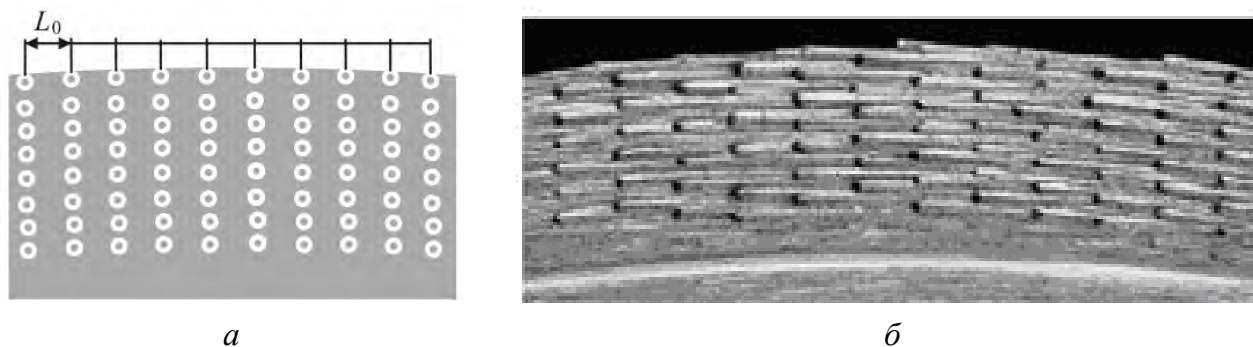
Серед інструментів з гальванічним закріпленням зерен, впорядковане розташування алмазів традиційно використовується для виготовлення алмазних бурів, особливо малих діаметрів. Враховуючи складні умови роботи таким інструментом (низькі лінійні швидкості різання і високі навантаження) позитивний ефект від такого розташування зерен дуже суттєвий, так що значно (до 30%) зменшується питома потужність при збереженні продуктивності оброблення і стійкості інструменту підвищується до 40 %.

При виготовленні правлячих брусків гальванічним способом також використовують різні способи впорядкування алмазів, переважно це способи, аналогічні використуванню при виробництві шкур (орієнтація в сильних електростатичних полях).

Іноді використовують укладання зерен алмазу через спеціальні трафарети. Незважаючи на високу стійкість такого інструменту, його використання може бути виправдане насамперед за рахунок підвищеної здатності зберігати високу точність робочої поверхні інструменту.

Круги на основі спеченого металевого композиту із впорядкованим розташуванням зерен алмазу кардинально змінюють процес шліфування. Фактично оброблення таким інструментом наближається до процесу множинного мікрорізання. Упорядковане розташування дозволяє максимально вирівняти і управляти в широкому діапазоні умовами роботи окремих зерен алмазу. Видається перспективним виготовляти такий інструмент на основі багатшарових зв'язок, оскільки розташування зерен алмаза фактично багатшарово-детерміноване.

Найбільш відома технологія виготовлення інструменту з упорядкованим розташуванням зерен алмазу ARIX (рис. 4.3). Ця технологія заснована на розміщенні зерен об'ємом зв'язки за допомогою спеціальних сепараторів. При обробленні досить в'язких матеріалів такі шліфувальні круги дозволяють підвищити продуктивність оброблення, при незмінній якості до 30%, при цьому питома витрата алмазів на 10...20% менше, ніж при використанні звичайних шліфувальних кругів.



**Рис. 4.3. Схема розташування зерен алмазу (а) і зовнішній вид робочої поверхні шліфувального круга (б), виготовленого за технологією ARIX**

Стримуючим фактором використання такого інструменту є технологічні складності його виготовлення та, відповідно, висока ціна. Одне з рішень у цьому напрямі полягає у виготовленні інструменту з подібними характеристиками шляхом модифікації стандартної зв'язки шліфувального інструменту, додаванням до його зв'язку опорних елементів.

На відміну від широко використовуваних добавок і присадок в абразивному шарі, опорні елементи впливають не на окремі характеристики робочого шару, а комплексно. Змінюються як характеристики зв'язки необхідним чином, так і за рахунок

дистанціювання просторового положення різальних вершин умови різання одиничним зерном.

Багато в чому такий робочий шар аналогічний дрібнодискретному (прядок дискретизації порівнянний з розмірами абразивних зерен) абразивному шару. Для структуризації робочого шару алмазного та cBN інструменту, як структуруючі добавки, добре показали себе зерна подрібненого ПНТМ на основі cBN марки «кіборит».

В умовах високопродуктивного оброблення (від 200 до 500 мм<sup>3</sup>/хв) збільшуються контактні навантаження в зоні оброблення та зерна подрібненого ПНТМ функціонують як структуроутворююча добавка. Опорні елементи знижують інтенсивність зносу зв'язки, але самі, в результаті контакту зі шламом, поступово руйнуються, утворюючи при цьому кратери в інструментальному композиті.

Останні фактично роблять робочий шар переривчастим, в результаті чого покращуються умови відведення шламу та умови різання окремими різальними зернами. З цим пов'язане зменшення тепловиділення, зниження питомої потужності шліфування та відносні витрати НТМ.

#### 4.2.6.2. Дозоване та кероване викладання алмазних зерен

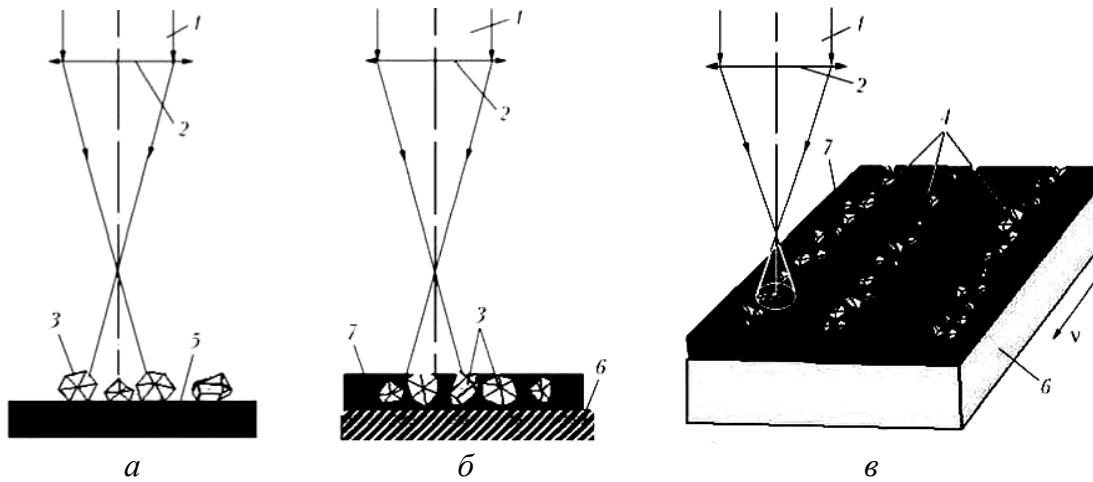
Дозоване та кероване викладання алмазних зерен здійснюється не тільки шляхом застосування спеціальних трафаретів, а і дозаторів, якими зерна прямують до поверхні круга, де закріплюються тремічними або термомодеформаційними методами наприклад, пошаровим лазерним спіканням.

Лазерне випромінювання як джерело нагріву має ряд значних переваг. Воно дозволяє за рахунок високої швидкості безконтактного введення енергії в матеріал з її прецизійним дозуванням здійснювати надшвидкісне нагрівання локальних областей матеріалів в широкому діапазоні температур. Це дає можливість, по-перше, використовувати при спіканні значно більш широкий спектр зв'язок, в тому числі і таких, які вимагають температур нагрівання, що значно перевищують граничні (наприклад, на рівні, що відповідає початку окислення алмазів); по-друге, забезпечити металеву зв'язку між алмазовмісним шаром і сталевим корпусом інструменту, що зумовлює підвищення його міцності. Висока локальність процесу дозволяє пошарово формувати одно- або багаторядні алмазовмісні робочі елементи і таким чином отримувати інструменти практично будь-якої конфігурації, досить легко керувати концентрацією складових композитів, здійснювати термічне зміцнення зв'язки, отримувати структури, що мають високу дисперсність, формувати окремі кластери поверхонь.

Лазерне спікання виконують переважно двома способами – прямим опроміненням зерен алмазів, розташованих на графітовій підкладці (рис. 4.4, а), і непрямим нагріванням алмазів при лазерному оплавленні різних порошкових матеріалів, які оточують і контактують з ними (рис. 4.4, б, в).

Як правило, такі схеми спікання алмазовмісного композиту найбільше застосовуються на тонких відрізних кругах, пилках реноваторів та ін. (так, наприклад, обладнання для виготовлення кругів представлено на рис. 4.5).

Осьове пошарове нарощування алмазовмісного композиту передбачає реалізацію процесу спікання шляхом подачі в спеціальну полупрес-форму з розміщеним в ній корпусом відрізного круга і порошкової зв'язки з алмазами. Одночасно лазерний промінь, скануючий в радіальному напрямку, з амплітудою, що дорівнює ширині алмазозного шару, розплавляє крайку корпусу круга і металеву зв'язку.



**Рис. 4.4. Схеми опромінення алмазів:** *a* – пряме опромінення; *б, в* – розплавлення зв'язки з алмазами відповідно при різному часі експозиції і переміщаються щодо лазерного променя: *1* – лазерний промінь; *2* – лінза; *3, 4* – відповідно алмази та діаманти, занурені в зв'язку; *5, 6* – відповідно графітова і сталева підкладка; *7* – зв'язка



**Рис. 4.5. Пошарове термодформаційне лазерне спікання алмазовмісного композиту на відрізних кругах**

При цьому частота сканування забезпечує квазінеперервність теплового потоку, інтенсивність якого достатня для розплавлення зв'язки.

Закристалізована, але ще пластична зв'язка з алмазами по мірі переміщення прес-форми ущільнюється деформуючим роликком, формуючи необхідні розміри і профіль. Дана схема дозволяє реалізувати й інші варіанти організації процесу спікання.

Радіальне пошарове нарощування дозволяє реалізувати процес спікання однорядних і багатошарових алмазовмісних композитів. Вона реалізується шляхом подачі в зону дії лазерного променя, що переміщається між нерухомими матрицями формує корпус круга порошкової зв'язки і алмазів.

Розплавлена і закристалізована зв'язка ущільнюється деформуючим елементом. Формувальна матриця, що складається з двох напівматриць, має складні профілі, забезпечує можливість при своєму повороті регулювати висоту спікання шару.

На відміну від пошарового лазерного спікання, лазерне термодформаційне спікання дозволяє керовано закріплювати алмазні зерна поодиночі, забезпечуючи не тільки потрібну міцність кріплення, а і надаючи можливість формувати потрібну поверхню.

При цьому порошок зв'язки разом із алмазними зернами дозовано потрапляють у ванну розплаву, сформовану концентрованим лазерним випромінюванням, після чого додатково прикатуються роликком із певним зусиллям  $R$ .

Для того, щоб композит мав визначену форму і розміри, треба застосувати відповідну металеву матрицю, в якій буде кристалізуватись розплавлена лазерним випромінюванням суміш і оплавлений край корпусу інструмента, до якого приєднується різальна частина. Оскільки матриця не буде мати формуючої поверхні з боку дії лазерного променя, цю операцію виконують за допомогою пластичного деформування ще гарячого композиту, наприклад обкаткою роликком.

Це дозволяє, крім надання шару композита необхідного розміру, додатково вирішити ще ряд питань: ущільнити і зміцнити композит, одержати необхідну шорсткість поверхні. Зерна алмазів залишаються розташованими на поверхні регулярно.

### 4.3. Конструктивні виконання алмазно- та cBN-вмісних інструментів

#### 4.3.1. Шліфувально-полірувальні та відрізні круги на різних зв'язках

Серед абразивного інструменту із надтвердих матеріалів (НТМ) найбільш широка номенклатура абразивних кругів з різноманітними формами робочої поверхні у вигляді алмаз- і cBN місткого шару.

За видом виконуваних технологічних операцій круги поділяють такі:

- шліфувальні – для оброблення виробів з досягненням шорсткості обробленої поверхні до  $Ra\ 0,08$  мкм
- полірувальні – для оброблення виробів з досягненням шорсткості обробленої поверхні до  $Rz\ 0,04\dots 0,05$  мкм;
- відрізні – для різання різних матеріалів;
- правлячі – для виправлення кругів з абразивних матеріалів (корунду, карборунду тощо).

Основними конструктивними елементами кругів є: корпус, абразивовмісна абразивовмісний шар і проміжний шар, який забезпечує міцне з'єднання абразивовмісного шару з корпусом. Проміжний шар служить також для зменшення внутрішнього напруження у випадках, коли температурні коефіцієнти розширення корпусу і абразивовмісного шару істотно відрізняються. Корпуса кругів виготовляються з різних металевих і неметалевих матеріалів і мають отвори для закріплення кругів на шпинделі верстата.

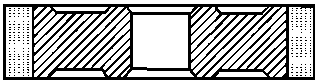
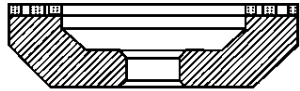

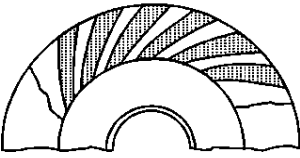
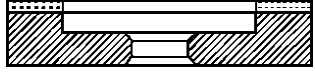
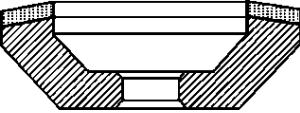
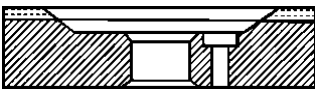
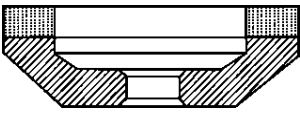
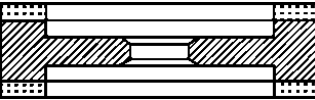
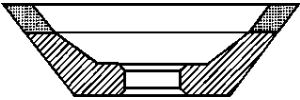
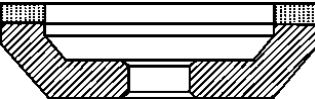
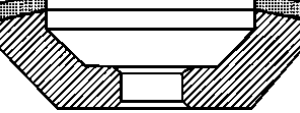
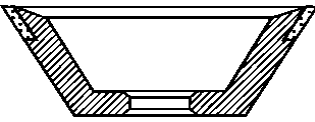
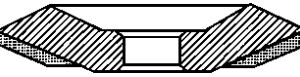
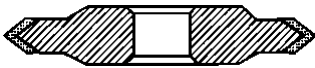
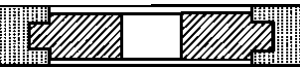
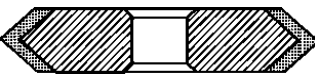
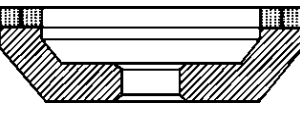
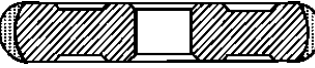
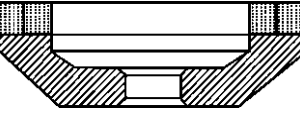

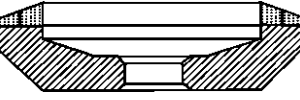
У табл. 4.4 представлені позначення форм та перерізів кругів за класифікацією, запропонованою Європейським стандартом FERA.

Шліфувальні круги характеризуються зовнішнім діаметром  $D$ , шириною  $W$  і товщиною  $T$  абразивного шару, діаметром посадкового отвору  $H$ , параметром переривчастості і рядом інших основних розмірів ( $\nu$  – кут при вершині для кругів 1EE1 тощо). В алмазно- і cBN-абразивному інструменті робоча частина складається з зерен порошку НТМ, які розподілені і міцно закріплені в суцільній або пористій матриці (зв'язці). Для виготовлення такого інструменту використовують в основному шліф-і мікропорошки синтетичних алмазів і cBN. Робочий шар міцно з'єднаний з корпусом інструменту склейкою, паянням, зварюванням.

НТМ-вмісний шар інструменту являє собою композиційний матеріал з матричною структурою, в якій один з компонентів є безперервною фазою (зв'язкою), інший (зерна НТМ – алмазу або cBN) рівномірно розподілений у ній у вигляді включень. При розробці

абразивних композицій із НТМ прагнуть того, щоб інструмент, виготовлений на їх основі, працював у режимі самозаточування.

**Табл. 4.4. Позначення форм і перерізів кругів**

Форма круга	Форми перерізів	Форма круга	Форми перерізів
51A1		12A2-45SS/C1	
14U1			
6A2		12V5-45°	
6A2 C		12A2-20°	
9A3		12R4	
12A2-45°		12V5-20°	
11V9-70°		12D9	
14EEI		1A1R	
1EEI		12A2-45°	
1FFI		12A2-20°	
1FF6V		12M2-45°	

При цьому в міру зносу та притуплення алмазних зерен зношується зв'язка і оголюються нові алмазні зерна. Якщо зв'язка зношується повільніше абразивних зерен –

інструмент втрачає різальні властивості (засолоюється), якщо швидше – відбувається інтенсивне зношування алмазного шару.

Зазвичай зв'язка надійно закріплює абразивні зерна у робочому шарі, а наповнювачі зв'язки підвищують стійкість, покращують різальні властивості абразивного інструменту, визначають фізико-механічні, теплофізичні та інші властивості НТМ шару.

У якості наповнювачів використовують абразивні та металеві порошки, органічні речовини. Вид і структура зв'язки, поряд з концентрацією, маркою та зернистістю алмазного та cBN-порошків, є основними характеристиками, що визначають працездатність та ефективність алмазно- та cBN-абразивних інструментів.

Основні види абразивних інструментів із НТМ випускаються на органічних, керамічних, металевих (у тому числі гальванічних) зв'язках.

У табл. 4.5 наведено рекомендації щодо вибору марки та зернистості порошків алмазу та cBN (кубоніту) для інструменту, що виготовляється, на різних зв'язках.

**Табл. 4.5. Рекомендації з вибору марки НТМ і матеріалу зв'язки**

Зв'язка	Марка алмазу, кубоніту	Зернистість алмазу, CBN (кубоніту)
Органічна жастка	Мікропорошки ACM, ACH, шліфпорошки AC2, AC4, AC6, AC15, AC2MA, AC2M, AC4M, AC4MA, AC6M, AC6MA, AC15M, AC15MA з металевим покриттям; КО, КР, КОС, КРС, КОМ – з склопокриттям і металевим покриттям	Мікропорошки 1/0 і крупні, шліфпорошки 50/40 і крупні; шліфпорошки кубоніту 50/40 і крупні
Органічна каучукмістка	Мікропорошки ACM; шліфпорошки AC2, AC4	Мікропорошки 1/0 і крупні, шліфпорошки 50/40 і крупні
Керамічна	Мікропорошки ACM, ACH, KM; шліфпорошки КО, КР, AC4...AC15	Мікропорошки 3/2 і крупні; шліфпорошки 50/40 і крупні
Металічна	Мікропорошки ACM, ACH; шліфпорошки AC6... AC200	Мікропорошки 14/10 і крупні; шліфпорошки 50/40 крупні
Гальванічна	Мікропорошки ACM, ACH; шліфпорошки AC15...AC50	Мікропорошки 28/20 і крупні; шліфпорошки 50/40 і крупні

На вимогу замовника марка та зернистість алмазного та cBN порошку може бути змінена.

Можливе також виготовлення шліфувального інструменту з природних алмазів (400...600 мкм), проте, як правило, працездатність такого інструменту в 2...5 разів нижча, ніж аналогічний інструмент із синтетичних алмазів. Кристали великих природних алмазів (більше 0,8...1,0 мм) переважно використовують для виготовленняправлячих інструментів, олівців, алмазних голок, алмазних роликів тощо.

#### 4.3.2. Алмазні інструменти для правки

На рис. 4.7 представлена класифікація сучасних інструментів для правки. Промисловість виробляєправлячі інструменти, що відрізняються технологічним призначенням, матеріалом різальних елементів, конструкцією, типажем, габаритами,

способом кріплення в правлячому пристосуванні, методом і кінематичними особливостями правки, точністю.

Характеристики цих правлячих інструментів показано в табл. 4.6, 4.7.

Однокристалні алмазні правлячі інструменти оснащують природними алмазами. Оброблені алмази використовують для виготовлення правлячих різців, голок, а також алмазів в оправі та пластин. Два останні інструменти оснащуються і необробленими природними алмазами.



**Рис. 4.7. Класифікація інструментів для правки**

Алмазні правлячі різці застосовують для профілювання черв'ячних абразивних кругів. Модуль інструменту може змінюватися від 04 до 80 мм. Для виготовлення різців використовують природні технічні алмази масою 0,61...1,10 карата.

**Табл. 4.6. Характеристики інструментів для правки**

Назва	Конструкція	Тип	Позначення	Маса алмазу, карат
1	2	3	4	5
Алмазні олівці		01	3908-0051-3908-0055	0,030... 0,500
		04	3908-0056-3908-0069	—

Продовження табл. 4.6

1	2	3	4	5
Алмазні голки	<p>Виконання В</p> <p>Конус Морзе</p>	01	3908-0070–3908-0073	0,050... 0,500
		02	3908-0074–3908-0077	0,050... 0,200
		04	3908-0078–3908-0080	–
	<p>Виконання С</p> <p>Сфера R</p>	02	3908-0081–3908-0088	0,017... 0,200
		03	3908-0089–3908-0090	0,050... 0,200
<p>Алмаз</p> <p>50° и 80°</p> <p>1,25</p> <p>60° и 90°</p> <p>35 и 50</p> <p>Ø 6 и 9 f9</p>	–	3908-0031 – 3908-0036	0,100... 0,250	
Алмазні різці для профілювання черв'ячних абразивних кругів	<p>Алмаз</p> <p>0,9</p> <p>8</p> <p>1,7</p> <p>16</p> <p>3</p> <p>38 и 46</p> <p>M6</p>	–	3908-0011–3908-0020	0,610... 1,100
Алмази в оправках	<p>Алмаз</p> <p>80 и 120°</p> <p>1,25</p> <p>10</p> <p>18...75</p> <p>Ø 6...12 f9</p>	1	3908-0101–3908-0194	0,020... 2,100

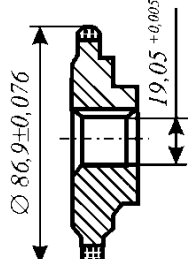
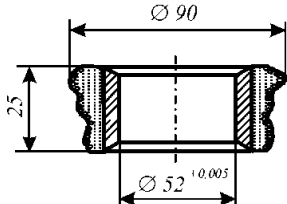
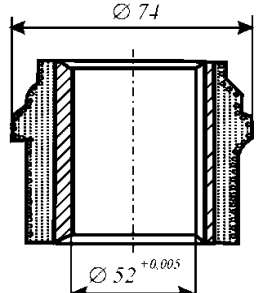
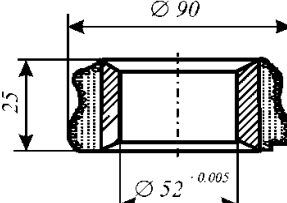
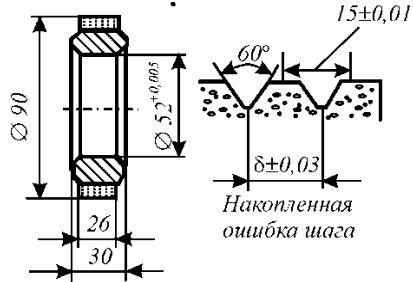
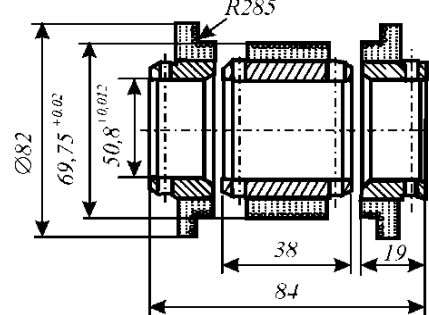
Закінчення табл. 4.6

1	2	3	4	5
	<p>Алмаз 90° и 120° Ø14 12 32 и 50 Ø6 и 8/9</p>	2	3908-0195-3908-0234	0,210... 0,850
Алмази в оправках	<p>Алмаз 1,25 Конус Морзе 28 и 32 8 и 10</p>	3	3908-0235-3908-0254	0,860... 0,100
	<p>Алмаз 90° и 120° R<sub>20</sub> M10x1 10 28 и 32</p>	4	3908-0255-3908-0284	0,310... 1,600

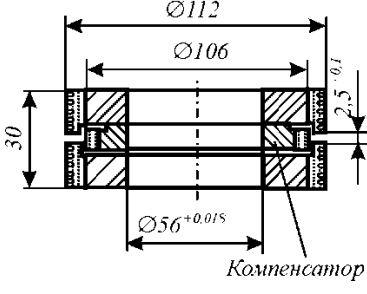
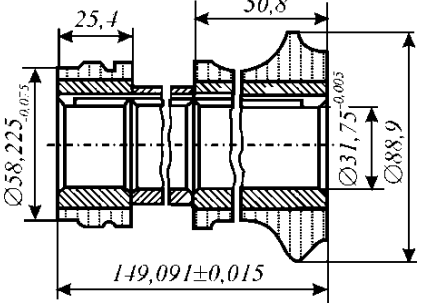
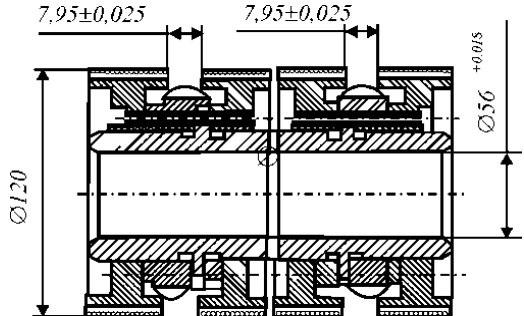
Табл. 4.7. Характеристики алмазної сировини в інструментах

Назва	Конструкція	Алмазна сировина
1	2	3
Алмазні гребінки	<p>38 9,65 25</p>	Природні алмази, 40...60 шт. на карат, XV групи, підгрупи «а», 1-ї якості, 72 алмаза розташовані в трьох шарах. Загальна маса алмазів 1,2...1,8 карата
	<p>60° 30 Ø 11,11 14</p>	Природні алмази, 0,05...0,10 карата, XXXIII групи, підгрупи «б». Товщина алмазу 0,75...1,25 мм, відхилення товщині не більше 0,1 мм. Вершини алмазів розташовані в одній площині

Продовження табл. 4.7

1	2	3
Алмазні ролики		<p>Природні алмази, 90...120 шт. на карат, XV групи, підгрупи «а», 1-ї якості. Маса алмазів в ролику не менше 7 карат. Дисбаланс не менше 0,3 г·см</p>
Алмазні ролики фасонного профілю		<p>Природні алмази, 90...120 шт. на карат, XV групи, підгрупи «а», 1-ї якості. Маса алмазів в ролику не менше 23 карат. Дисбаланс не більше 0,3 г·см</p>
		<p>Природні алмази, 90...120 шт. на карат, XV групи, підгрупи «а», 1-ї якості. Маса алмазів в ролику не менше 45 карат. Дисбаланс не більше 0,4 г·см</p>
		<p>Природні алмази, 90...120 шт. на карат, XV групи, підгрупи «а», 1-ї якості. Маса алмазів в ролику не менше 24 карат. Дисбаланс не більше 0,3 г·см</p>
Алмазні ролики різьбові		<p>Алмазні шліфпорошок А 250/200. Маса алмазів в ролику не менше 35 карат. Відносна концентрація 100...120</p>
Блок алмазних роликів		<p>Природний алмаз, 90...120 шт., на карат, XV групи, підгрупи «а», 1-ї якості. Дисбаланс не більше 0,3 г·см</p>

Закінчення табл. 4.7

1	2	3
		<p>Природний алмаз, 90...120 шт. на карат, XV групи, підгрупи «а» 1-ї якості. По колу 112 мм. на торці рівномірно укладені 23 шт. алмазу 0,04...0,07 карата, XIV групи, підгрупи «а», в інтервалах укладені по 2–3 алмази XV, «а», 1-ї якості, 90...120 шт. на карат. Маса алмазів в блоці не менше 38 карат. Дисбаланс не більше 0,2 г·см</p>
Блок алмазних роликів		<p>Природний алмаз, 90...120 шт. на карат, XV групи, підгрупи «а», 1-ї якості. Маса алмазів в блоці не менше 59 карат. Дисбаланс не більше 0,3 г·см</p>
		<p>Природний алмаз, 90...120 шт. на карат, XV групи, підгрупи «а», 1-ї якості. На торцях ролика 120 мм. по колу укладені 25 алмазів XIV групи, підгрупи «а», 1-ї якості в інтервалах – по 2–3 алмази XV групи, розміром 120–90 шт. на карат. Дисбаланс не більше 0,2 г·см</p>

Через складну технологію виготовлення алмазні різці відрізняються порівняно високою вартістю, але їх експлуатація, особливо в умовах серійного та масового виробництва, економічно виправдана у зв'язку з високими продуктивністю і точністю профільного шліфування деталей кругими, правленими цими інструментами.

Алмазні голки призначені для виправлення односторонніх різьбошліфувальних кругів. Вони можуть використовуватися також і для профілювання абразивних кругів по копіру.

Для виготовлення голок застосовують природні алмази форми октаедра, октаедроїда, ромбододекаедра, ромбододекаедроїда з невеликим спотворенням, а також пиляні та колоті кристали.

Робоча частина алмазу граниться формою чотиригранної піраміди з кутом при вершині 60 і 90°. Для оснащення голок використовують алмази масою 0,10...0,25 карата.

Алмази в оправках (АТ) є універсальними правлячими інструментами і призначені для правки кругів прямого та фасонного профілю. Вони виготовляються чотирьох типів та оснащуються природними алмазами XII групи, підгрупи «а» (1-, 2-, та 3-ї якості) та підгрупи «б», а також ХХХІ групи, підгрупи «а» (1- та 2-го) якості.

Допускається застосування алмазів з металевими та неметалевими покриттями. Для всіх типів АТ використовують алмази масою 0,02...2,10 каратів. АТ виготовляють з

кутами державки  $90^\circ$  (для виправлення кругів фасонного профілю) і  $120^\circ$  (для виправлення кругів прямого профілю).

Стійкість і ефективність експлуатації однокристальних правлячих інструментів можуть збільшуватися, якщо майданчик контакту алмазу зі шліфувальним колом у процесі правки буде залишатися незмінною або змінюватися незначно.

Дана умова здійсненна в тому випадку, якщо алмазу буде надано форму пластини постійного перерізу, яка вирізається з октаедричного кристала і закріплюється в інструменті так, щоб її зношування розвивалося в кристалі в твердому напрямку. Алмазні пластини не переточуються і не встановлюються, працюють до повного зносу.

Багатокристальні алмазні правлячі інструменти виготовляються з оброблених природних алмазів з орієнтованим розташуванням кристалів, а також з необроблених природних та синтетичних алмазів. Алмазні гребінки виготовляють з оброблених та необроблених алмазів з орієнтованим розташуванням кристалів. Вони застосовуються для редагування по копіру профільних шліфувальних кругів.

Робоча частина гребінок складається з алмазних стовпчиків, які розташовані в металевій вставці паралельно осі інструменту. У багатьох випадках гребінки успішно замінюють дорогі однокристальні правлячі інструменти з оброблених алмазів.

Алмазні олівці (АО) відносяться до правлячих інструментів, що знаходять найбільше практичне застосування. Вони виготовляються з природних та синтетичних алмазів з орієнтованим та неорієнтованим розташуванням (табл. 4.10) АО випускають наступних типів: 01 – з алмазами, розташованими ланцюжком по осі олівця; 02 – з алмазами, розташованими шарами; 03 – з алмазами, розташованими на сферичній поверхні; 04 – з неорієнтованим розташуванням алмазів.

**Табл. 4.10. Основні характеристики АО**

Форма корпусу АО	Позначення	Тип	Зернистість алмазів, мкм	Маса алмазів, карат
Циліндрична	A	0,1 0,4	63/50... 1000/800	0,31...2,0
Конічна	B	0,1 0,2 0,4	500/400... 800/630	
Циліндрична ступінчата	C	0,1 0,3	1000/800... 2000/1600	1,0...2,5

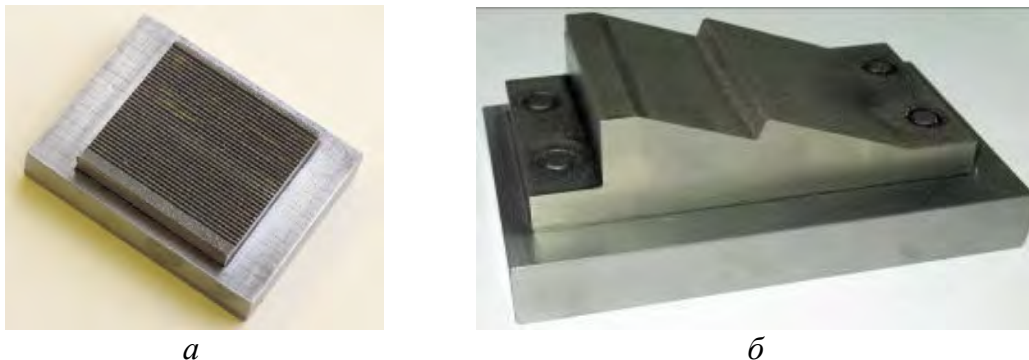
Алмазні ролики (АР) порівняно з іншими правлячими інструментами мають ряд важливих техніко-економічних переваг, які особливо яскраво виявляються в умовах серійного і масового виробництва.

АР виготовляються з тих же алмазів, що олівці та бруски. Залежно від геометричної форми утворює АР можуть бути з прямим і фасонним профілем. Правка абразивних кругів проводиться методом врізання, на прохід або за копіром при робочій окружній швидкості круги.

Ролику повідомляється примусове обертання (зустрічне чи попутне) зазвичай із окружними швидкостями 5...20 м/с.

Розроблено правлячі бруски фасонного профілю, виготовлені методом гальванопластики, призначені для застосування, наприклад, у дрібно-серійному

виробництві деревообробних твердосплавних фрез (рис. 4.8, *а*). Така ресурсозберігаюча альтернатива алмазним роликам виглядає особливо перспективною для таких галузей промисловості, як турбіно-, двигуно- та авіабудування (рис. 4.8, *б*).



**Рис. 4.8. Алмазні фасонні правлячі бруски:** *а* – дрібного профілю; *б* – глибокого профілю для процесів шліфування замкових частин лопаток турбін «Z-подібний профіль»

Економічність використання брусків обумовлена значно меншою їх вартістю та відсутністю необхідності використання спеціального дорогих верстатів для глибокого шліфування. Технологічні причини полягають у тому, що, при забезпеченні тієї ж якості і продуктивності оброблення, для операцій правки правлячими брусками можна застосовувати плоско-і круглошліфувальні верстати.

Схема правлення допускає значні варіації і виключає повідомлення додаткового обертання інструменту, як у випадку з АР, і, як наслідок, додаткового биття інструменту, що викликається як ексцентриситетом шпинделя, так і, нехай і достатньо точної, – за класом точності G1 або ISO 1940/1, – але не ідеальним балансуванням правлячого пристосування.

Для виправлення сегментних кругів розроблені алмазні бруски, оснащені великими алмазами масою 0,05...0,10 карата.

Багатокристалічні алмазні правлячі інструменти виготовляють на різних зв'язках: на мідній основі, твердосплавних, нікелевих, а також металевих адгезійно-активних. При спіканні останніх в результаті хімічної взаємодії металевої зв'язки з алмазними зернами утворюється металоалмазний адгезійний сплав (МААС), що забезпечує надійне утримання зерен в алмазоносному шарі за допомогою хімічних зв'язків і додаткового механічного закріплення.

### 4.3.3. Інструменти для суперфінішування

Процес суперфінішування заснований на принципі обертального руху оброблюваної деталі, поступального руху інструменту (бруска) вздовж виробу з накладенням коливального руху з частотою 500...3000 подвійних ходів за 1 хв і амплітудою 2...5 мм.

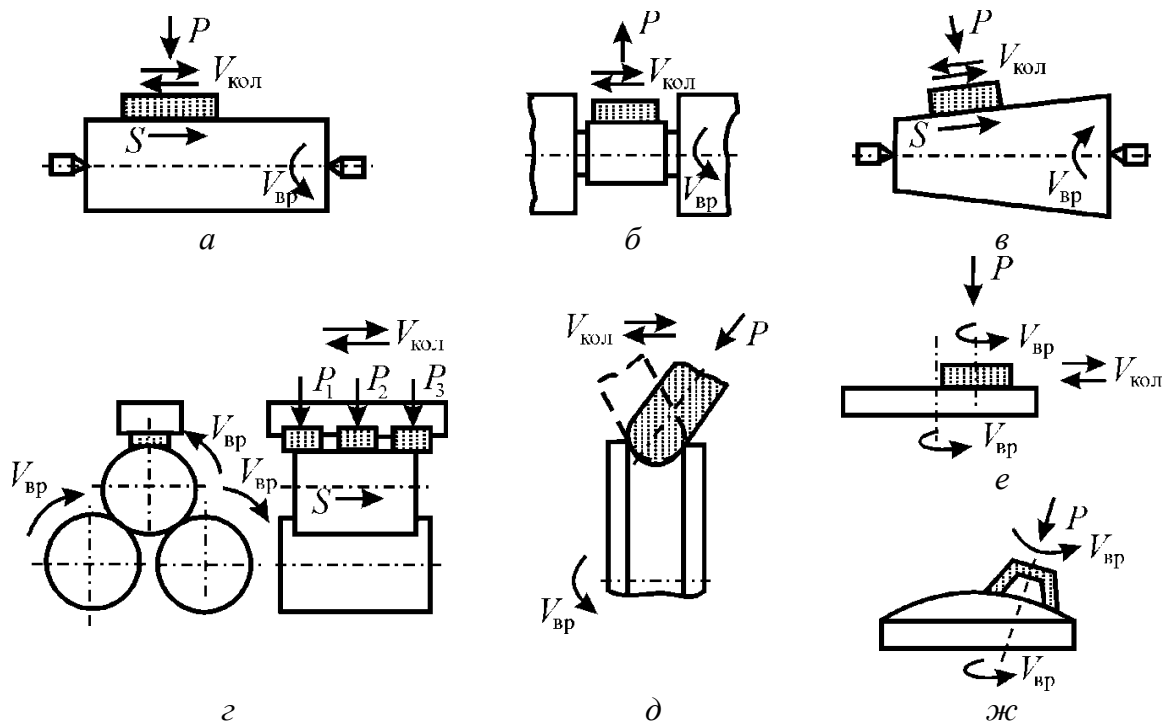
Операції суперфінішування класифікують за такими ознаками (рис. 4.9): за видом базування деталей – центрове та безцентрове; за видом подачі – оброблення врізанням та з поздовжньою подачею; за формою оброблюваної поверхні – суперфінішування циліндричних, конічних, торіодальних (жолоба кілець підшипників), торцевих і сферичних поверхонь.

Як суперфінішний інструмент застосовують алмазні (або cBN) бруски, виготовлені на основі мікропорошків зернистістю АСМ 28/20...АСМ 40/28 (ЛМ 7/5...ЛМ 40/28).

При суперфінішуванні торцевих і сферичних поверхонь як інструмент найчастіше використовують не брусок, а круг чашкової форми, що обертається зі швидкістю  $V_{вр}$  і має коливальний або планетарний рух.

Вони забезпечують шорсткість поверхні  $Ra$  0,40, а АСМ 10/7...АСМ 20/14 – до  $Ra$  0,2...0,1. Щоб досягти шорсткості поверхні  $Ra$  0,1, рекомендується після суперфінювання проводити остаточне оброблення за допомогою алмазних еластичних стрічок на каучуковмісних зв'язках (Р14).

Найбільш ефективні для виготовлення суперфінюного інструменту металеві зв'язки М2-01, М2-08, керамічні К3-01, СК4 та органічні В2-01, В2-07. Бруски на металевій зв'язці М2-01 можна рекомендувати тільки для попереднього суперфінювання (не нижче  $Ra$  0,32), а бруски на зв'язках К3-01, СК4 – для забезпечення шорсткості  $Ra$  0,08...0,16.



**Рис. 4.9. Схеми суперфінювання:** центрове з поздовжньою подачею (а); безцентрове врізання (б); конічної поверхні (в); безцентрове (г); тороїдальної (д), торцевої (е), сферичної поверхні (ж)

В окремих випадках при невеликому зніманні металу і коли висуваються високі вимоги до товарного вигляду виробу використовуються алмазні суперфінюні бруски на органічних зв'язках В2-01, В2-07, В1-10 і керамічних К1-01, К2-01.

Оптимальна відносна концентрація алмазного порошку в алмазозносному шарі бруска для зернистості АСМ 10/7 – 150, а для зернистості АСМ 3/2 – 100.

#### 4.3.4. Інструменти для хонінгування

Хонінгування проводять алмазно-абразивними брусками, рухомо закріпленими в хонінгувальній головці. Хонінгувальні бруски в процесі хонінгування обертаються щодо осі хонінгувального інструменту, здійснюють поздовжній рух і поперечну подачу, що викликається дією радіальних сил, які розтискають алмазно-абразивні бруски.

Характеристика алмазоносного шару брусків представлена табл. 4.11, 4.12.

Технологічну підготовку алмазного хонінгування починають з точної розмірної установки і кріплення алмазних брусків на сталеві колодки. Внаслідок високої зносостійкості металевих зв'язок бруски дуже повільно припрацьовуються в процесі хонінгування.

Під час їх припрацьовання на деталях різко знижується точність хонінгування та продуктивність оброблення.

**Табл. 4.11. Рекомендації щодо застосування алмазних хонінгувальних брусків залежно від зв'язки та марки алмазів**

Марка зв'язки	Марка алмазного порошку	Призначення брусків
M3-21	АРК4, АС15, АРС3	Чорнове хонінгування сірих і загартованих чавунів твердістю 40...50 HRC
M5-09, M5-10	АРК4, АРС3, АС15, АС6	Те ж, напівчистове
M2-03	АСМ, АС6, АС4	Те ж, чистове
M5-01	АС15, АС6, АРК4	Чорнове хонінгування загартованої конструкційної сталі і азотованої сталі твердістю < 60 HRC
M5-03, M1-01	АРК4, АС6	Те ж, напівчистове
M5-06	АРК4, АС6 АСМ, АС6	Те ж, чистове хонінгування деталей з легованих сталей
M1-01, M5-08	АРК4, АС15, АС6, АС4	Напівчистове хонінгування незагартованих сталей, сірих і легованих чавунів,
M1-01, M2-03	АС4, АС6, АСМ	То же, чистове
M2-16	АС15	Хонінгування кілець підшипників із сталі ШХ15
M2-09	АС15, АС6	Те ж загартованих сталей вузькими брусками
M2-03	АСМ	Те ж чавунів чистове і оздоблювальне
M1-05	АС15, АС6	Те ж деталей із загартованих сталей
M2-08	АС4	Те ж тонкостінних чавунних деталей
M2-12	АС6	Те ж, електролітичне хонінгування
V3-03	АС2, АСМ	Те ж деталей з титанових сплавів
V3-09	АС2, АСМ	Те ж деталей з дюралюмінію
V3-07	АС2, АСМ	Чистове і плосковершинне хонінгування
V3-16	АС2, АСМ	Те ж для спеціальних чавунів і хромокремністих сплавів
V3-18	АС2, АСМ	Чистове хонінгування сталей

Тому при встановленні та кріпленні брусків дуже важливо запобігти різновисотності брусків в одному комплекті. Необхідно, щоб їх різальні поверхні при складанні в хонінгувальній головці розташовувалися на одному колі.

Підготовленими до хонінгування вважають такі бруски, поверхня контакту з оброблюваним отвором яких становить не менше 60% всієї номінальної їх різальної поверхні при забезпеченні повного контакту по всій довжині.

Алмазні бруски до металевих колодок кріплять, як правило, шляхом припаювання. В окремих випадках їх приклеюють до колодок епоксидним клеєм.

Остаточню алмазні бруски по радіусу припрацьовують на хонінгувальному верстаті по отвору заготовки, що хонінгується.

З метою підвищення продуктивності притирання алмазних брусків застосовують притиральну пасту (абразивний порошок карбіду кремнію зеленого, змішаний із солідолом у пропорції 1:2). Зернистість абразивного порошку повинна бути на 1 або 2 номери більше зернистості брусків, що припрацьовуються. Припрацьовання проводять, періодично подаючи МОТС.

**Табл. 4.12. Рекомендовані марки та зернистість алмазних порошоків залежно від матеріалу, що обробляється та шорсткості поверхні**

Оброблюваний матеріал	Марка і зернистість алмазного порошку при шорсткості поверхні $Ra$ , мкм						
	10...20	2,0...2,5	1,0...1,2	0,5...0,6	0,2...0,3	0,1...0,2	0,06...0,08
Сірі і леговані чавуни	AC15 315/250, AC6 250/200	AC4 200/160, AC4 160/125, AC4 125/100	AC4 100/80, AC4 80/63	AC4 63/50, AC2 50/40	ACM 28/20, ACM 20/14	ACM 20/14, ACM 14/10	ACM 10/7
Загартовані чавуни	AC15 630/500, AC 15 500/400	AC15 400/315, AC15 315/250	AC 15 250/200, AC15 200/160, AC15 160/125	AC6 125/100, AC6 100/80	ACM 40/28, ACM 28/20	ACM 28/20, ACM 20/14	ACM 20/14, ACM 14/10
Нетермо-оброблені чавуни	AC15 315/250 AC6 250/200	AC6 200/160, AC6 160/125, AC6 125/100	AC6 100/80, AC6 80/63	AC4 63/50, AC2 50/40	ACM 40/28, ACM 28/20	ACM 20/14	—
Загартовані сталі	—	AC6 200/160, AC6 160/125	AC6 125/100, AC6 100/80	AC6 80/63, AC4 63/50	—	—	ACM 14/10

Для попереднього (чорнового) хонінгування гільз тракторних двигунів знайшли широке застосування бруски на зносостійких зв'язках М5-09, М5-10, для виготовлення яких використані високоякісні алмази марок AC15, AC20, AC32 і високоміцні, полікристал АРК4, АРС3 зернистістю 200/160 ... 800/630.

Алмазні хонінгувальні бруски на пористих зв'язках мають об'ємну структуру, необхідну для проникнення охолоджуючої рідини в зону різання і видалення продуктів відпрацювання. Ці зв'язки мають також високе алмазоутримання, що оберігає алмазні зерна від вдавлювання в них і передчасного випадання.

З метою підвищення ефективності попереднього хонінгування загартованих чавунів збільшують площу алмазозносної різальної поверхні хонінгувальної головки,

застосовуючи більш довгі або широкі бруски і збільшуючи їх кількість в комплекті. Для цього рекомендуються бруски з підвищеною різальною здатністю (на зв'язках М5-09, М5-10), в яких використані полікристалічні алмази марок АРК4, АРС3. Із застосуванням хонінгувальних головок з подвоєною довжиною брусків значно підвищується точність (овальність зменшується в 1,5...2 рази) і збільшується продуктивність оброблення (на 20...30%).

Хонінгувальні бруски, в яких застосовані синтетичні полікристалічні дроблені алмази марок АРВ1, АРК4, АРС3, дозволили замінити гостродефіцитні монокристалічні алмази АС15, АС20, АС32. Так, бруски з порошоків АРВ1, будучи найбільш дешевими, дають хороші результати при обробленні сірих чавунів, а бруски з полікристалічних алмазів АРК4 і АРС3 – при обробленні сірих та загартованих чавунів (< 45 HRC) і сталей (< 50 HRC).

Для остаточного хонінгування отворів в деталях з чавуну та сталі застосовують алмазні еластичні блок-бруски на каучуковмісних зв'язках В3-03, В3-07.

Алмазний хонінгувальний блок складається з 6...12 брусків (рис. 4.10). Розміри останніх: довжина  $L$  100, 125, 150 мм, ширина  $B$  8, 10, 12, 16 мм, висота алмазоносного шару  $S$  2 або 3 мм, загальна висота  $h$  4...6 мм. Бруски кріпляться до колодок хонінгувальної головки епоксидною смолою.

Залежно від марки бруски відрізняються лише еластичністю робочого шару у поєднанні з алмазами. Найбільш еластичними є бруски, виготовлені на зв'язці В3-12 і найбільш жорсткими – на зв'язці В3-19.

При підвищенні еластичності брусків без алмазоносного підшару шорсткість обробленої поверхні незначно знижується. Однак застосовувати як підшар еластичні зв'язки (В3-12, В3-09) не завжди доцільно, так як при цьому похибки форми отвору не виправляються.

Ефективним засобом збільшення кількості алмазних зерен, що контактують з оброблюваним матеріалом, є підвищення їх концентрації в алмазоносному шарі. Так, з підвищенням відносної концентрації алмазів АС2 у зв'язці Р11/Р9 від 12,5 до 50% шорсткість поверхні при обробленні чавуну та сталі сильно знижується. Однак найбільш різко вона знижується при зменшенні зернистості алмазів.

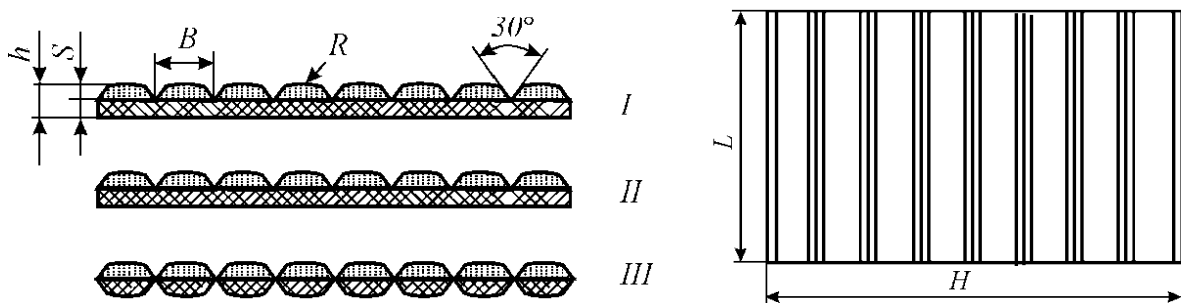


Рис. 4.10. Алмазні еластичні блок-бруски

Стійкість хонінгувальних блок-брусків з алмазів АС2 63/50...АС2 80/63 на еластичній зв'язці каучуковмісної В3-07 при остаточному хонінгуванні блоків циліндрів автомобілів ГАЗ-51, ЗІЛ-130, ЗІЛ-164, ГАЗ-69 в середньому в 3 рази перевищує стійкість брусків з алмазів АСМ20/14 на металевому зв'язуванні М2-01.

Бруски на еластичній основі не засолюються і не утворюють подряпин на оброблюваній поверхні, забезпечують шорсткість поверхні  $Ra$  0,25...0,32. При цьому

створюється мікропрофіль з великою опорною (несучою) поверхнею, що підвищує довговічність машин і механізмів.

Процес оброблення прецизійних отворів у деталях паливної апаратури (втулках плунжерних пар паливних насосів діаметром 8...12 мм) здійснюється одно- та двобрусковими хонголівками. В умовах серійного виробництва на заводах паливної апаратури, як правило, реалізується схема плаваючого кріплення заготовки і жорсткого кріплення хонголівки в шпинделі, що обертається, хонінгувального верстата. Бруски працюють в умовах самозаточування і не вимагають виправлення.

Довжину брусків  $l$  вибирають залежно від довжини  $L$  отвору, що обробляється. Найменші відхилення форми отвору досягаються при  $l = (0,75...1,0) L$ . Довжина виходу брусків з отвору відповідає приблизно  $1/3$ .

Від довжини виходу брусків з отвору залежить відхилення від циліндричності отвору. Якщо отвір при хонінгуванні набуває форми конуса, необхідно збільшити вихід брусків з боку меншого діаметра і відповідно зменшити з боку більшого. За наявності сідлоподібності отвору деталі вихід брусків слід зменшити з обох боків отвору.

У разі бочкоподібного отвору вихід брусків необхідно збільшити. Довжина перебігів коригується як у період опрацювання нового комплекту хонбрусків, так і в процесі налагодження верстата в залежності від характеру відхилень форми отвору.

Для оброблення деталей з термооброблених сталей ШХ15, 25Х5М найбільш оптимальними з точки зору зносостійкості та якості оброблення є алмазні хонбруски на металевих адгезійноактивних пористих зв'язках.

У виробництві втулок плунжера застосовуються бруски наступних характеристик: – чернові – АБХ 60х3х5х1, 5 АС20 (АС32) 200/160 (160/125)-МП1-4 (забезпечують відхилення геометричної форми отвору 5...10 мкм при шорсткості  $Ra$  0,63); – чистові – АБХ 60х3х5х1, 5 АС15 (АС20) 100/80 (80/63)-МП1-4 (забезпечують відповідно – 1...3 мкм і  $Ra$  0,2...0,4).

#### 4.3.5. Доводочні пасти і суспензії

Залежно від типу інструменту розрізняють два види доведення: вільним абразивом (суспензіями, пастами) і закріпленим абразивом (інструментом, шаржованим абразивами). Доведення вільним абразивом – менш досконалий процес, вимагає великих витрат допоміжного часу на нанесення абразиву і промивання деталей. Доведення закріпленим абразивом забезпечує більш стабільні показники продуктивності праці та якості поверхні.

За способом подачі довідної суміші розрізняють доведення з безперервною подачею і з періодичним дозованим нанесенням суміші на притир. У першому випадку суспензія (рідка паста) безперервно переміщується і подається на робочу поверхню притира. Відпрацьовану суміш пропускають через магнітний фільтр або сепаратор доти, поки подрібнення абразивних зерен не призводить до помітного зниження продуктивності процесу. При доведенні з періодичним нанесенням пасти на притир необхідно втручання оператора або створення спеціальних дозуючих пристроїв.

Один з різновидів процесу доведення – оброблення шаржованими притирами. При цьому попередньо шаржують притир вільним абразивом для насичення поверхневого шару інструменту закріпленими абразивними зернами. У процесі доведення на поверхню притиру наносять лише шар мастила. Шаржовані притири застосовують на фінішних операціях з додаванням алмазного мікропорошку зернистістю 1/0...7/5. Доведення шаржированими притирами забезпечує найбільш високу точність (до 0,1...0,3 мкм) і мінімальну шорсткість ( $Ra$  0,01...0,04) поверхні.

Для фінішного оброблення деталей зі сталей, сплавів та неметалічних матеріалів широко застосовуються пасти та суспензії із НТМ. Вони являють собою складні багатокомпонентні структуровані системи, що складаються з порошків природного та синтетичного алмазу, cBN та основи – композиційної зв'язки.

Як абразивні складові в склад паст з НТМ входять шліфувальні порошки з синтетичного алмазу (АС) марок АС2, АС4, АС6 зернистістю від 50/40 до 125/100, мікропорошки марок АМ, АН, АСМ, АСН та ін. 1/0 до 60/40, субмікропорошки марок АСМ1, АСМ5 зернистістю 0,1/0, 0,3/0, 0,5/0, 0,7/0,3, 1/0,5, мікропорошки з cBN (кубоніт марки КМ) зернистістю від 1/0 до 60/40. Суспензії виготовляються з мікропорошків алмазу та cBN зернистістю 1/0...10/7 та субмікропорошків.

Як основу використовують такі речовини, як мінеральні олії, поверхнево-активні речовини (ПАР – суміші складних ефірів, одно- та багатогоатомних спиртів, високомолекулярні жирні кислоти та полімерні сполуки), структуроутворювачі (воски, стеарини, парафіни), мастильні матеріали, присадки тощо.

Пасти та суспензії з НТМ виготовляють з нормальною (Н), підвищеною (П) та високою (В) масовою часткою порошку. Масові частки порошку алмазу або cBN в пастах різних зернистостей наведено у табл. 4.13.

**Табл. 4.13. Вміст порошку НТМ в пасті**

Z, мкм	Масова доля порошку, %			Колір пасти і етикетки
	Н	П	В	
125/100	40	60	–	Бузковий
100/80	40	60	–	
80/63	40	60	–	
63/50	20	40	–	
50/40	20	40	–	
60/40	8	20	40	Червоний
40/28	8	20	40	
28/20	6	15	30	Голубий
20/14	6	15	30	
14/10	6	15	30	
10/7	4	10	20	Зелений
7/5	4	10	20	
5/3	4	10	20	
3/2	2	5	10	Жовтий
2/1	2	5	10	
1/0	2	5	10	
0,7/0,3	2	5	10	Не фарбується
0,5/0,1	2	5	10	

Масові частки мікропорошків із НТМ у суспензіях відповідних зернистостей ті ж, що й у пастах.

За консистенцією пасти з НТМ поділяються на мазеподібні (М) та тверді (Т). Для мазеподібних паст консистенція при температурі 205°C повинна знаходитися в межах від 100 до 400 поділів пенетрометра, твердих – від 20 до 80 поділів.

Абразивна здатність паст з мікропорошків КНБ (кубоніт) по всіх зернистостях в середньому в 2 рази нижче, ніж мікропорошків алмазу.

У табл. 4.14 наведено значення шорсткості поверхні, що досягається, обробленої пастами з мікропорошків алмазу (перед рискою) і з мікропорошків кубоніту (після риски) зернистістю 1/0...60/40.

Кубонітові пасти виготовляються із мікропорошків кубоніту (КМ) зернистістю 1/0...60/40. Масова частка порошку в пастах із НТМ істотно впливає на ефективність оброблення матеріалів. Знижений вміст порошку в пастах призводить до зниження продуктивності оброблення. Високий вміст порошку в пастах, що перевищує оптимальне значення, призводить до порушення структури пасти і накопичення шламу, що також значно знижує працездатність пасти.

Пасти і суспензії з НТМ по змивності поділяються на органічні розчинники, що змиваються – тип «О», водою – «В», водою і органічними розчинниками – «ВО» (універсальна паста).

Пасти, що змиваються органічними розчинниками, рекомендуються для оброблення металів і сплавів, застосовуються в основному при доведенні та поліруванні. Вони забезпечують високоякісну дзеркальну поверхню з чистим та рівним відображенням. Розбавляються вони різними оліями, гасом, їх сумішшю, змиваються гасом, бензином та іншими органічними розчинниками.

**Табл. 4.14. Шорсткість поверхні, обробленої пастами з мікропорошків алмазу (перед рискою) та з мікропорошків кубоніту (після риски)**

Зернистість	<i>Ra</i> , мкм, не более	
	до оброблення	после оброблення
60/40	0,400/0,400	0,200/0,320
40/28	0,200/0,320	0,160/0,250
28/20	0,160/0,250	0,125/0,200
20/14	0,125/0,200	0,100/0,160
14/10	0,100/0,160	0,080/0,125
10/7	0,080/0,125	0,063/0,100
7/5	0,063/0,100	0,050/0,080
5/3	0,050/0,080	0,040/0,063
3/2	0,040/0,063	0,032/0,050
2/1	0,032/0,050	0,025/0,040
1/0	0,025/0,040	0,020/0,032

Пасти та суспензії, що змиваються водою «В», рекомендуються для оброблення неметалічних твердих матеріалів, а також металів у тих випадках, коли неприпустимо застосування вогнебезпечних рідин для промивання оброблених виробів. Вони розбавляються і змиваються 1% водним розчином тринатрійфосфату, слабкими розчинами соди або дистильованою водою. Застосування жорсткої води погіршує змивність паст. Пасти типу «В» характеризуються високими адгезійними властивостями, що сприяють міцному утриманню абразивного прошарку на поверхні притиру.

Пасти та суспензії з НТМ, що змиваються водою та органічними розчинниками «ВО», рекомендуються для оброблення металів, сплавів і неметалевих матеріалів. Вони мають хорошу змочуючу здатність, добре розбавляються і змиваються дистильованою водою, а також органічними розчинниками.

Присутність додаткового абразивного матеріалу у суміші покращує якість обробленої поверхні. Додатково вводиться абразивний матеріал має зернистість менше

або рівну зернистості основного абразивного порошку. Так, деякі алмазні пасти містять карбід кремнію меншої зернистості. Однак дослідження показали, що в цьому випадку абразивна здатність паст практично не змінюється. Для її збільшення як додаткового абразиву слід використовувати порошок, зернистість якого більше зернистості основного порошку; міцність його має бути меншою, а твердість зерен – досить високою.

Таке поєднання властивостей мають порошки cBN і карбїду бору. При використанні паст із суміші цих порошоків знімання матеріалу спочатку виконуть більші зерна карбїду бору, що полегшують подальше доведення. Коли зерна, що руйнуються, зменшуються до величини зерен cBN, знімання здійснюється головним чином cBN, зерна якого зношуються значно повільніше зерен карбїду бору. Завдяки меншим розмірам останні забезпечують необхідну шорсткість оброблюваної поверхні.

Для зняття задирок, округлення гострих кромки у місцях недоступних для звичайних методів оброблення та зниження шорсткості поверхні каналів внутрішніх порожнин деталей з важкооброблюваних матеріалів застосовують еластичні шліфувальні пасти для екструзійної оброблення під тиском.

Основою шліфувальної пасти служать різного роду каучуки, насичені абразивом. Як абразив використовуються порошки карбїду кремнію, карбїду бору, кубоніту та алмазу. В пасту додають різного роду загусники (наприклад, шефлон) або розріджувачі (олеїнова кислота, полісилоксанові рідини).

Створені алмазні пасти, що мають одночасно підвищену колоїдну, механічну та термічну стабільність. Характеристика та призначення паст, що виготовляються з різних компонентів, наведені в табл. 4.15.

Пасти з підвищеною термостійкістю оцінюються максимальною температурою, при якій вони утримуються в зоні оброблення. Їх доцільно застосовувати у випадках, коли процес супроводжується виділенням великої кількості тепла. Розроблений ряд високоефективних складів паст і суспензій на основі ПАР, структуроутворювачів, термостійких сполук, що мають змочуючі диспергуючі, адгезійні, антистатичні та інші властивості, що забезпечують високу працездатність останніх

**Табл. 4.15. Характеристика і призначення паст (суспензій) різних складів**

Змивність	Компоненти паст	Призначення
1	2	3
Органичними розчинниками	Порошок алмазу, карбїд бору, олеїнова кислота, стеарин, кремнійорганична рідина	Оброблення поверхні металів в умовах високих температур
Органичними розчинниками	Порошок алмазу, вуглеводні метанового ряду, консистентне мастило	Оброблення поверхні точних металічних деталей при звичайних і підвищених температурах
Органичними розчинниками	Порошок алмазу, олеїнова кислота, стеарин, воск	Оброблення важкооброблюваних матеріалів
Водою	Порошок алмазу, моноалкілоамід, діалкілоамід	Оброблення крихких неметалічних матеріалів, наприклад, кремнія, германія, кварцу
Водою	Порошок алмазу, моноалкілоамід, алюмосілікат натрію, діалкілоамід	Оброблення крихких неметалічних матеріалів

Закінчення табл. 4.15

1	2	3
Водою (суспензія)	Порошок алмазу, сульфанол НП-3, спирт етиловий	Оброблення крихких неметалічних матеріалів
Водою з органічними розчинниками	Порошок алмазу, стеарин, воск, блок-сополімер оксидів етилену і пропілену	Оброблення металів і крихких неметалічних матеріалів
Водою з органічними розчинниками	Порошок алмаза, гірчичне масло, віск, оксиетильований продукт (синтанол)	Оброблення металів, сплавів і неметалічних матеріалів
Водою з органічними розчинниками	Порошок алмазу, циклімід, стеарин, синтанол	Оброблення неметалічних матеріалів, а також металів у випадках, коли для промивання оброблених деталей неприпустимо застосування вогнебезпечних розчинників
Водою з органічними розчинниками	Порошок алмазу, вазелін гліцерин, синтанол	Фінішні операції механічного оброблення деталей машин і приладів

#### 4.3.6. Трубчасті свердла і коронки

Найбільш ефективні свердла, здатні забезпечити велику продуктивність та високу якість виконання отворів у матеріалах з різними властивостями – це алмазні свердла (коронки).

У порівнянні зі спіральними металевими свердлами алмазні мають більшу у кілька разів продуктивність, відповідно, скорочується час виконання операцій, енергоресурси при виконанні робіт витрачаються більш економно. Якість виконаних отворів також набагато вища, краї гладкі, не мають дефектів. Алмазні корончасті свердла з відповідними характеристиками можуть використовуватися з матеріалами різної щільності, та різними видами інструментів.

Саме їх рекомендують застосовувати для свердління таких твердих матеріалів, як граніт, керамограніт, бетон. Для буріння бетону краще працювати у мокрому режимі (з охолодженням водою). Для точного, акуратного виконання отворів у таких крихких матеріалах, як керамічна плитка або скло, також краще використовувати алмазні свердла спеціального призначення.

За конструкцією такі свердла бувають двох типів: трубчасті (циліндричні) – з циліндричною насадкою та кільцевою алмазною частиною (рис. 4.11); кільцеві (форма насадки може бути різною – циліндричною, шестикутною, або іншою), а різальний елемент має форму кільця, суцільного, або сегментованого.

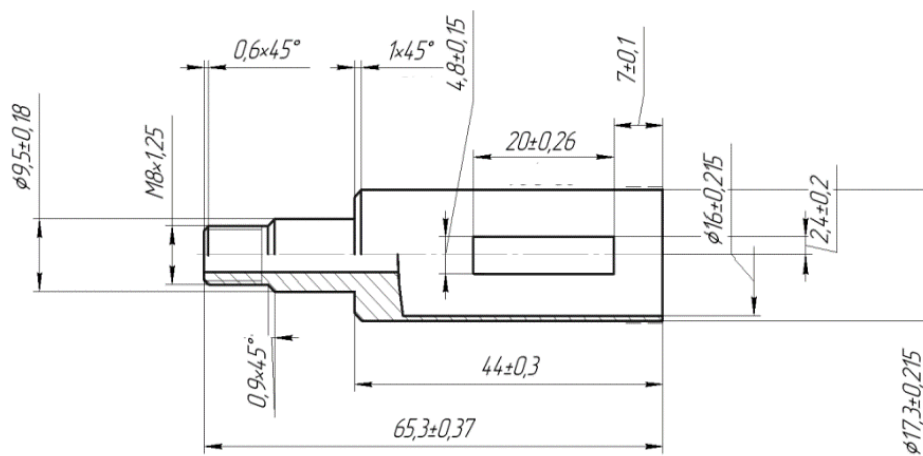
Є кілька засобів нанесення алмазного шару на різальну кромку свердла.

При гальванічному алмазовмісний шар наноситься на коронку шляхом гальванічного осадження сполук нікелю. Алмазне свердло з таким типом різального елемента доступне за ціною, але швидко зношується.

Спікання з нанесенням металевого припою, у складі якого є хром та марганець робить свердла більш довговічними.

Зварювання (вакуумно-дифузійне або лазерне) є найефективнішим способом фіксації алмазних зерен. Алмазні коронки-свердла з таким типом кріплення різальної кромки

мають великий робочий ресурс та продуктивність. Вони найбільш довговічні, але й найдорожчі.



**Рис. 4.11. Конструкція трубчастого свердла**

Хвостовики на трубчастих свердлах можуть бути із механічним кріпленням та можливістю заміни (під різні патрони ручного та машинного застосування) та незмінними, що являють цілу конструкцію разом із робочою частиною.

#### 4.3.7. Стрічки з НТМ та інструменти на їх основі

Розроблений і застосовується в промисловості алмазний інструмент на каучукових зв'язках, призначений, в основному, для шліфування, полірування, віброполірування, суперфінішування, хонінгування, доведення та декоративного оброблення деталей зі сталей, чавуну, кольорових металів і сплавів, неметалічних матеріалів, в тому числі, дорогоцінного каміння, мармуру, граніту, а також для шліфування напилених покриттів [6].

За рівнем еластичності марки каучукових зв'язок можна розділити на чотири основні групи: високоеластичні (ВЗ-10, ВЗ-26, ВЗ-32); еластичні підвищеної жорсткості (ВЗ-09, ВЗ-17, ВЗ-27); напівебонітові (ВЗ-06, ВЗ-07, ВЗ-20); ебонітові (ВЗ-03, ВЗ-22, ВЗ-30, ВЗ-33).

Гама алмазного еластичного інструменту включає (табл. 4.16): алмазні стрічки полірувальні (АЛП) з вільними тканинними кінцями; алмазні стрічки термопластичні полірувальні (АЛТП); алмазні стрічки шліфувальні нескінченні (АЛШБ) і алмазні стрічки шліфувальні переривчасті двох типів (АЛШЕ) і (АЛШЛ).

При необхідності в стрічках можуть використовуватися алмазні шліфувальні порошки марок АС15, АС20.

Як основу в стрічках АЛП використовують високоміцну лавсанову тканину, а як зв'язок – спеціальну гуму різної твердості. Між основною і алмазозносним шаром є підшар з гуми, що покращує еластичність і експлуатаційні властивості стрічок. Такий підшар дозволяє повністю зношувати алмазний шар та забезпечує сталість міцності лавсанової тканини при експлуатації інструменту.

Закріплення алмазозносного шару досягається за рахунок апретування основи спеціальними речовинами і подальшої привулканізації його до основи. З метою економії алмазозносний шар наноситься тільки на робочу частину розміром  $L \times B$ , а кінці основи служать закріплення стрічки. На робочій поверхні є рифлення, завдяки чому не потрібно

її розтину перед початком роботи. Товщина алмазного шару з урахуванням рифлень становить 1,2 мм, тобто, стрічка являє собою багатошаровий інструмент.

**Табл. 4.16. Характеристики стрічок на каучукових зв'язках**

Позначення	Типорозмір $L \times B$ , мм	Марка зв'язки	Марка алмазного порошку	Концентрація алмазу, карат
АЛП	–	В3-10, В3-09, В3-06, В3-03	АС2 80/63...50/40 АСМ 60/40...3/2	–
АТЛП	150×25... 150×180	В3-06, В3-07	АС4 160/125...50/40 АС6 200/160...50/40 АСМ 60/40...3/2	50, 100
АЛШБ	1920×20	В3-10, В3-09, В3-06	АС2 80/63...50/40 АСМ 60/40...3/2	12,5, 25, 50, 100
АЛШЕ	200×55 300×140	В3-27		
АЛШЛ	300×140	В3-25		

Перспективними методами фінішної оброблення фасонних деталей є полірування та віброполірування стрічками АТЛП, виготовленими на спеціальних термопластичних каучукових зв'язках типу напівебоніту. При короткочасному нагріванні до температури 170...175°C стрічки розм'якшуються і в результаті притискання до оброблюваної деталі повторюють її форму. Після охолодження стрічки в притисненому стані, набута форма зберігається.

Розміри стрічок АТЛП у плані відповідають розмірам АЛП, а загальна товщина стрічок за рахунок еластичного підшару збільшена до 3,6+0,2 мм.

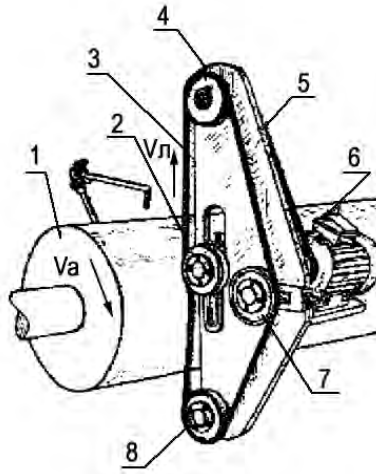
Для забезпечення низької шорсткості обробленої поверхні, високої точності розмірів і форми для знімання великих припусків та зачистки фасонних деталей шліфування та полірування здійснюють стрічками АЛШБ вільною стрічкою в умовах охоплюючого контакту без контактної опори.

При шліфуванні з контактною опорою стрічка до заготовці підтискується за рахунок спеціальних опор (дисків, роликів, копирів та інших елементів) (рис. 4.12).

Шліфування з контактною опорою забезпечує високу точність оброблення деталей складної форми, що мають нерівномірні припуски. Однак це оброблення викликає велику деформацію стрічки і, як наслідок, формується шорсткість поверхні, більша за величиною, ніж при обробленні без контактної опори.

В умовах шліфування вільною стрічкою важливими характеристиками процесу є площа контакту стрічки з деталлю та фактичний тиск у зоні контакту. Збільшення площі контакту стрічки з деталлю при постійному тиску призводить до підвищення продуктивності і зниження шорсткості поверхні. Найменша шорсткість поверхні досягається при низьких тисках у контакті.

Відмінністю АЛШБ від АЛП є наявність алмазозносного шару по всій робочій поверхні нескінченної стрічки. Для надання гнучкості стрічкам на зв'язках марок ВЗ-09 та ВЗ-06 в алмазозносному шарі роблять надломи. Товщина алмазозносного шару з урахуванням рифлення 1 мм, загальна товщина стрічки  $1,9 \pm 0,2$  мм.



**Рис. 4.12. Схема стрічкового шліфування з контактною опорою:**

1 – деталь; 2 – контактний ролик; 3 – алмазна стрічка; 4, 8 – ролики;  
5 – корпус; 6 – електродвигун; 7 – натяжний ролик.

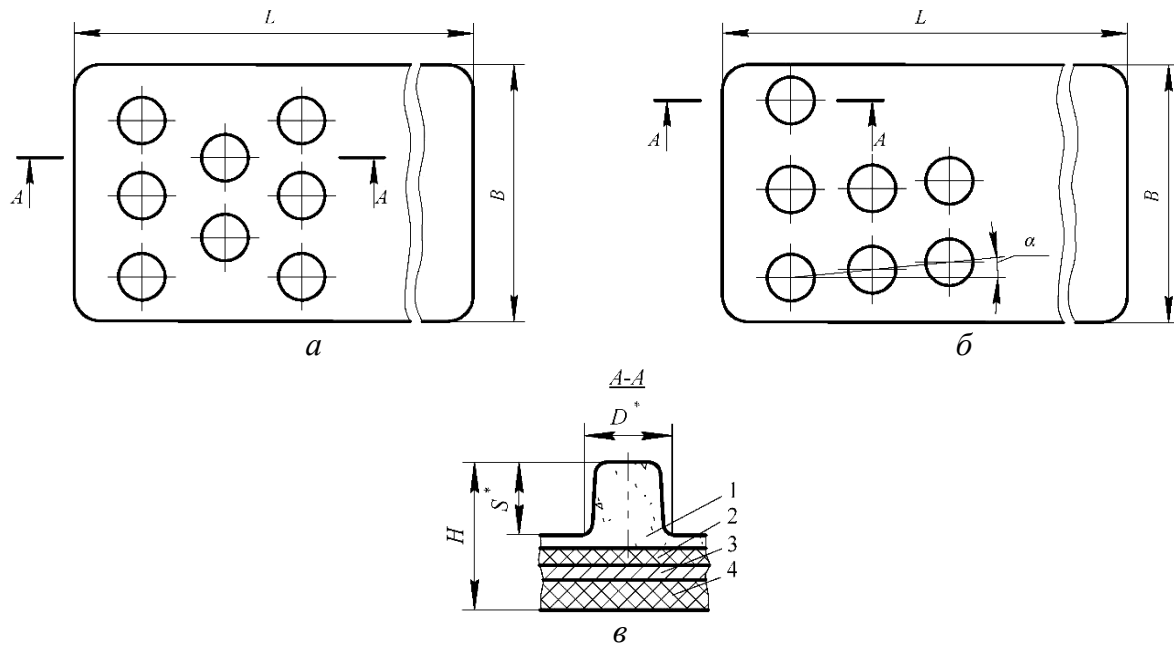
Використання стрічок з порошками АС2 дозволяє досягти найбільшої продуктивності оброблення за рахунок найбільш розвиненої поверхні зерен.

Порошки алмазу зернистістю  $> 80/63$  і менше  $40/28$  застосовувати не доцільно, так як, в процесі шліфування, перші частково дробляться, а другі мають знижену зносостійкість і не ефективні при знятті великих припусків. Крім того, в процесі роботи стрічок алмазні зерна частково потопують в еластичній зв'язці, фактично знижуючи зернистість інструменту, і видаляють матеріал на меншу глибину.

Концентрація алмазів у стрічках відіграє меншу роль, ніж у жорсткому інструменті. Незначне підвищення знімання оброблюваного матеріалу відбувається зі збільшенням концентрації алмазів з 50 до 100 %. Шорсткість обробленої поверхні при цьому дещо знижується. Шліфування профільних і циліндричних деталей із загартованих і легованих сталей стрічками АЛШБ з характеристиками АС2 63/50 ВЗ-06 дозволяє отримати поверхню з шорсткістю  $Ra 0,32 \dots 0,63$ .

З метою зниження теплонапруженості процесу оброблення використовують інструмент, що являє собою шліфувальну стрічку з переривчастим робочим шаром типу АЛШЕ (рис. 4.13). Стрічка має підшар товщиною 5 мм. Поруч із алмазними порошками у стрічках використовуються і порошки  $cBN - KP 125/100 \dots 50/40$ ,  $KM 60/40 \dots 1/0$ .

Алмазозносний шар типу АЛШЕ виготовляється трьох виконань і має форму усічених конусів висотою 3, 6 і 10 мм, розташованих паралельно сторонам стрічки і під кутами ( $\alpha$ )  $3^{\circ}09'$  і  $4^{\circ}50'$  до більшої сторони стрічки. Алмазовмісний елемент в них є окремою частиною інструменту, яка в залежності від умов оброблення може переміщатися, вдавлюючись в підкладку на певну глибину, і не впливає при обробленні на сусідні ділянки робочої поверхні. Відхилення елементів на робочій поверхні інструменту в процесі роботи забезпечують зниження засолення і сприяють як проникненню МОТС в зону різання, так і інтенсифікації процесу оброблення.



**Рис. 4.13.** АЛШЕ з переривчастим алмазозносним шаром, розташованим паралельно сторонам стрічки (а) та під кутом до більшої сторони стрічки (б), у формі конусів (в): 1 – алмазний шар; 2 – шар із зв'язки алмазозносного шару; 3 – еластичний шар з підвищеним вмістом сірки; 4 – еластичний шар

Оброблення ряду деталей вимагає застосування еластичних інструментів із меншим ступенем деформації робочого шару у зоні оброблення.

З цією метою застосовуються стрічки типу АЛШЛ (рис. 4.14), різальна поверхня яких сформована з трапецеїдальних брусків висотою 5 і 10 мм у двох виконаннях, розташованих паралельно і під кутом до меншої сторони стрічки.

Бруски через проміжні шари з'єднані з еластичною основою, завдяки чому навіть при жорсткому алмазозносному шарі, блоки мають можливість згинатися. Алмазозносний шар виготовляється на різних зв'язках – від високоеластичних гум до ебонітів. Зі стрічок АЛШЕ та АЛШЛ виготовляються спеціальні еластичні круги – стрічки наклеюється на цільний або збірний корпус круги епоксидним клеєм.

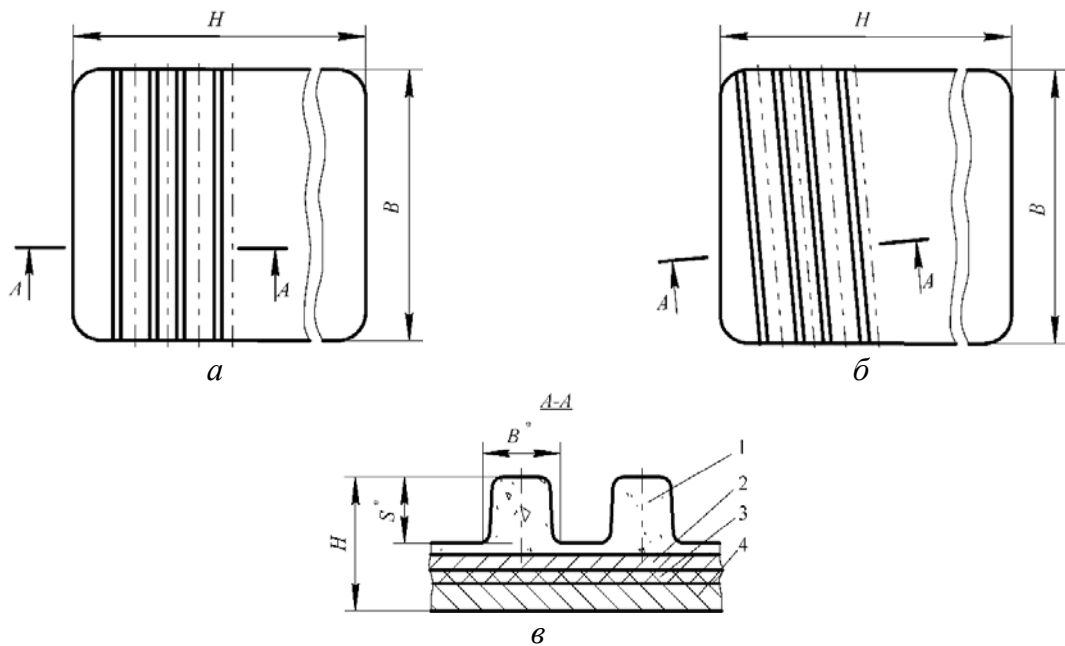
4.3.8. Інструмент із обмеженою жорсткістю. Пелюсткові круги із НТМ, алмазовмісні шнури та пилки

#### 4.3.8.1. Пелюсткові круги із НТМ.

При фінішному обробленні деталей застосовується специфічна група еластичних інструментів з різальною частиною зі шліфувальної шкірки – пелюсткові круги (рис. 4.15). перевагами пелюсткових інструментів є велика різноманітність конструктивних рішень, що дозволяють створювати їх для оброблення різних за формою поверхонь, широкий діапазон характеристик, що забезпечує різні вимоги до якості поверхні, а також простота виготовлення.

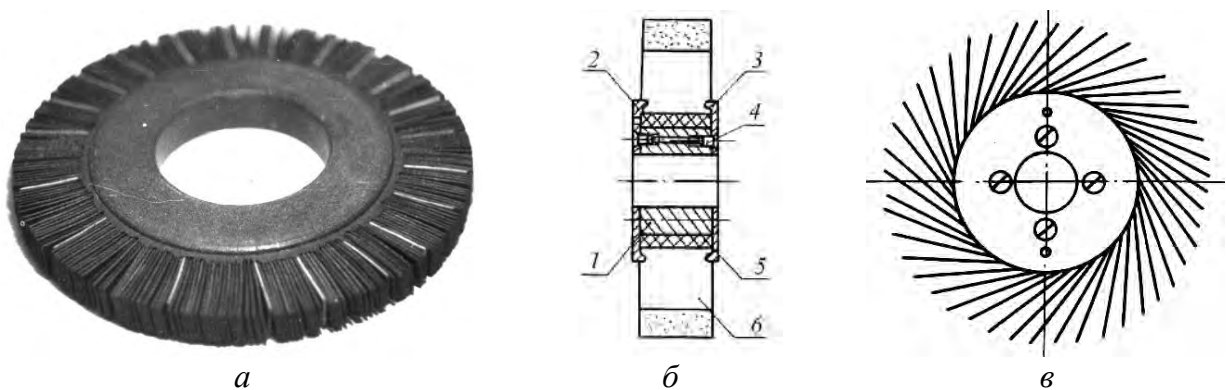
В таких кругах поєднуються порівняно жорстке кріплення абразиву і висока еластичність у радіальному та тангенціальному напрямках. Пружна взаємодія зерен з оброблюваною поверхнею знижує напруженість теплового потоку в процесі різання.

Наслідком чого є повне усунення припалів і відсутність розтріскування поверхневого шару при обробленні крихких матеріалів.



**Рис. 4.14.** АЛШЛ з переривчастим алмазозносним шаром, розташованим паралельно (а) та під кутом до меншої сторони стрічки (б), у формі брусків (в):

1 – алмазний шар; 2 – шар із зв'язки алмазозносного шару; 3 – еластичний шар із підвищеним вмістом сірки; 4 – еластичний шар



**Рис. 4.15.** Пелюстковий круг з алмазних стрічок (а), схема пелюсткового круга з алмазних стрічок з нахиленим розташуванням різальних елементів (б, в):

1 – ступиця; 2 – фланці

Найбільш продуктивними є процеси оброблення деталей лепестковими кругами форми 1А1 розміром  $250 \times 76 \times 15$  зі стрічок на каучукових зв'язках В3-10 і В3-06 з алмазами марок АС2 і АСМ зернистістю 50/40...40/28 100 %-ної концентрації

Для отримання обробленої поверхні з низькою шорсткістю розроблені інструменти з похилим розташуванням пелюсток, сумісні переваги шліфувальної стрічки і пелюсткового круга з радіально розташованими пелюстками. Така установка пелюсток збільшує їх пружність і площу контакту з деталлю.

Переривчастий, імпульсний характер різання і вентиляційний ефект, що виникає в зоні оброблення, сприяють оновленню абразивних зерен, що затупилися, і швидкому видаленню шлама із зони оброблення.

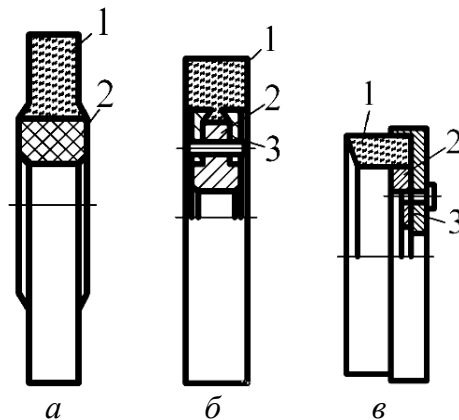
Алмазні пелюсткові круги не вимагають правки, пелюстки мають здатність приймати профіль оброблюваної поверхні. При цьому висока різальна здатність і зносостійкість інструменту забезпечують стабільну якість поверхневого шару виробу. Продуктивність процесу оброблення ( $60 \dots 400 \text{ мм}^3/\text{хв}$  залежно від зернистості алмазу та властивостей оброблюваного матеріалу) в 1,3...1,5 рази вище, ніж із використанні нескінченних стрічок, а витрати на інструмент скорочуються на 30...40 %. Витрата алмазу в інструменті 2...8 мг/г залежно від матеріалу, що обробляється.

Поряд із пелюстковими кругами в сучасному виробництві застосовується фіброві диски та круги. Фіброві диски діаметром 25...60 мм виготовляються з нормального та легованого електрокорундів і їх сумішей зернистістю 6...125. В якості основи застосовується фібра. Конструкції притискних елементів для фібрових дисків повинні забезпечувати вигин диска при експлуатації, для чого застосовуються планшайби або набір дисків з зовнішнім діаметром, на 5...10 мм меншим діаметра інструмента.

З підвищенням швидкості диска та сили притискання збільшуються глибина різання і знос диска. На шорсткість поверхні найбільш суттєво впливає зміна швидкості шліфування. Зі збільшенням швидкості шліфування шорсткість поверхні зменшується.

З урахуванням цих положень здійснюють вибір характеристик фібрових дисків і режимів їх експлуатації (табл. 4.17). Шліфування фібровими дисками проводять без використання ЗОТС.

Полірування пелюстковими кругами (ПК) найбільш розповсюджене при ремонті автомобілів та в інших ремонтних виробництвах на фінішних операціях замість полірування повстяними кругами, ручного полірування шліфувальною шкуркою (рис. 4.16).



**Рис. 4.16. Пелюсткові круги:** *а* – площинний нерозбірний; *б* – площинний розбірний; *в* – торцевий розбірний: 1 – пелюсток; 2 – маточина; 3 – фланець

В процесі оброблення пелюстковими кругами здійснюється їх самопрофілювання; профіль обробленої поверхні зберігається протягом всього періода роботи круга. Оброблення пелюстковими кругами забезпечує низьку шорсткість обробленої поверхні при зниженій інтенсивності зношування інструмента. Перелічені фактори обумовлюють основне призначення ПК – операції полірування. Використання ПК дозволяє механізувати і автоматизувати операції фінішного оброблення.

Найбільш широко застосовуються плоскі і торцеві (ПКП та ПКТ) декількох виконань, основними з яких є наступні: круги з кріпленням пелюстків у монолітній маточині з композиції на основі епоксидної смоли (див. рис. 4.16, а); круги з кріпленням пелюстків за допомогою фланців (див. рис. 4.16, б, в).

**Табл. 4.17. Характеристики фібрових шліфувальних дисків і режими оброблення різних матеріалів**

Оброблюваний матеріал	Вид операції	Абразивний матеріал	Зернистість	Швидкість різання, м/с	Тиск, $10^{-5}$ Па
Вуглецеві сталі	чорнова	Нормальний електрокорунд	25...125	18...55	1,5...10,0
	чистова		16...20		0,1...1,0
Леговані сталі і сплави	чорнова	Нормальний і хромотитанистий електрокорунд	80...25	23...55	1,0...3,5
	чистова		20...16		0,1...1,0
Жароміцні, корозійностійкі сталі і сплави	чорнова	Нормальний і хромотитанистий електрокорунд	80...25	15...55	0,5...3,0
	чистова		20...16		0,1...0,4
Титанові сплави	чорнова	Нормальний, легований електрокорунд	80...25	28...51	0,3...1,0
	чистова		20...16		0,1...0,5
Кольорові сплави	чорнова	Нормальний електрокорунд	80...25	9...55	1,0...7,0
	чистова		20...16		0,08...1,0

Для виготовлення розбірних пелюсткових кругів діаметром до 400 мм і висотою до 100 мм використовується шкурка на тканевій основі зернистістю 16...M40, для нерозбірних кругів з зовнішнім діаметром до 150 мм і висотою до 50 мм – шкурка зернистістю 50...M40.

Технологічні схеми оброблення пелюстковими кругами подібні основним схемам шліфування жорсткими кругами.

Товщина зрізаного шару матеріалу, шорсткість обробленої поверхні та швидкість зносу пелюсткового круга залежать від довжини пелюстка; збільшення довжини пелюстка до певних значень підвищує різальні властивості круга, при подальшому збільшенні довжини пелюстка понад оптимальну різальні властивості круга погіршуються. Сила притискання круга до оброблюваної поверхні є основним параметром режиму полірування. Зі збільшенням сили притискання збільшуються ступінь деформації круга та площ його контакту з поверхнею деталі.

Це призводить до підвищення різальних властивостей круга. При попутному поліруванні шорсткість обробленої поверхні на 20...30 % нижча, ніж при зустрічному.

З підвищенням зернистості пелюсткових кругів шорсткість обробленої поверхні збільшується.

Застосування пелюсткових кругів і фібрових дисків передбачає широке використання ручних пневмо- та електричних машинок (табл. 4.18). В якості стаціонарних установок, на яких здійснюється полірування фібровими дисками, використовуються настільно-свердлильні, універсально-заточні, токарні верстати. Пелюсткові круги можуть бути використані на всіх шліфувальних верстатах.

Табл. 4.18. Технічні характеристики ручних шліфувальних машинок

Параметр	Пневматичні моделі				Електричні моделі			
	ПІ-2009А	ПІ-2014	ПІ-2015	ПІ-2203	ІЕ-2201А	ІЕ-820РА	фірма Bosh	
Частота обертання шпинделя, $\text{хв}^{-1}$	12700	5100	7600	4580	830	2920	6000	
Діаметр шліфувального круга, мм	60	150	100	125	130	125; 200	178	100
Потужність, кВт	0,45	1,30	0,75	1,35	0,14	0,6	0,75	1,13
Маса, кг	2,2	5,5	3,5	4,3	8,2	26,5	4,0	5,1

У ремонтному виробництві для цих цілей використовують токарні верстати, на супорт яких встановлюють полірувальні головки. Методом поздовжнього полірування обробляють заготовки, довжина яких перевищує висоту круга. При цьому методи оброблення висоту круга вибирають максимальною за паспортними даними верстата, що забезпечує найбільшу продуктивність процесу. При обробленні врізним методом висоту круга приймають рівною довжині полірованої шийки. При більшій висоті в процесі роботи на крузі утворюється уступ, що викликає необхідність його періодичної правки з метою видалення уступу, що призводить до непродуктивних витрат інструменту. Зазвичай ПКП стійко самозаточуються і самопрофілюються протягом всього терміну експлуатації і їх правка здійснюється тільки при установці круга на верстат.

Зовнішнє кругле полірування ПКП східчастих і профільних поверхонь виконують на шліфувальних верстатах, оснащених пристроєм для профільної правки круга. Правку здійснюють алмазними олівцями, після чого круг припрацьовують на одній-двох заготовках.

Сумісне полірування торцевих і циліндричних поверхонь здійснюють на торцекруглошліфувальних верстатах. Для одночасного полірування шийок колінчастих валів можуть використовуватися верстати з багатокруговим налагодженням.

#### 4.3.8.2. Еластичні інструменти з полімер-абразивною різальною частиною

Крім шліфування пелюстковими кругами з полімерними різальними елементами при обробленні деталей з покриттями успішно застосовуються методи крацевання і «флекс-хон». Ці два методи оброблення поверхонь відрізняються від зазначених насамперед конструкцією і принципом роботи самого інструменту (рис. 4.17, 4.18).

Крацювання – оброблення щітковими кругами. Щітки широко використовуються в ремонтному виробництві для виконання найрізноманітніших робіт з очищення поверхонь від окалини, фарби, іржі, зняття задирок, скруглення гострих кромки, зміцнення поверхні з метою підвищення зносостійкості і втомної міцності деталей машин.

При крацюванні деталей використовують щіткові круги з металевого дроту і полімер-абразивних волокон, які ударно діють на оброблювану поверхню для підвищення якості поверхневого шару виробів, в т.ч. з газотермічними і гальванічними покриттями. При цьому оброблення щітками проводять в 2...3 % водному розчині соди, мила або поташу.

Дискові щітки великого діаметру (450...500 мм) використовуються на безцентрово-шліфувальних верстатах для остаточного оброблення деталей автомобільних, тракторних і авіаційних двигунів, а також хромованих деталей гідро-і пневмообладнання.

Щітки діаметром 240...350 мм застосовуються на кругло-і плоскошліфувальних верстатах для зняття задирів, скруглення гострих країв, очищення, полірування деталей. Для оброблення криволінійних і інших складних поверхонь використовуються чашкові щітки. На ручних механізованих інструментах і спеціальному обладнанні застосовуються щітки з щетиною, розташованою в радіальному або осьовому напрямку. Такі щітки служать для чистового оброблення внутрішніх циліндричних, різьбових поверхонь, зачистки та полірування торцевих поверхонь що прилягають до отворів. Параметр шорсткості досягає  $Ra\ 0,16...0,04$ .



**Рис. 4.17. Круг-щітка з полімер-абразивними волокнами**



**Рис. 4.18. Інструмент типу «флекс-хон»**

Щітки представляють собою більш гнучкий інструмент, в порівнянні з еластичними шліфувальними кругами, і тому рівномірніше притискаються до оброблюваної поверхні. Це створює більш сприятливі умови оброблення фасонних поверхонь, тому що ворсинки щіток проникають у западини мікропрофілю оброблюваної поверхні.

Щітки розрізняються за типами, розмірами, матеріалом робочої (ворсової) частини. Основними показниками щітки є: матеріал і діаметр ворсинок, ширина, діаметр щітки, вільна довжина ворсинок, розміри і форма посадочного місця. Матеріалом робочої частини щітки служать: дріт діаметром 0,1...1,2 мм (сталевий або з кольорових металів), щетина з полімер-абразивного волокна. Чим довші ворсинки щітки і менш щільна робоча частина, тим менш інтенсивно зіскоблюються нерівності. Такі щітки використовуються при оздоблювальних роботах.

Чим більше діаметр щітки і швидкість різання, тим тонше повинен бути дріт. Швидкість очищення щітками при ширині очищення 35...40 мм складає 1,0...1,5 м/хв. Перевищення оптимальної колової швидкості може привести до хвилястості поверхні і зниження терміну служби щітки через підгоряння кінців і поломки окремих елементів основи від втомних напружень.

Оптимальна тривалість оброблення залежить від багатьох факторів і встановлюється експериментально.

При крацюванні не рекомендується робити сильний тиск на інструмент, тому що інакше кінці ворсинок згинаються, що веде не тільки до погіршення якості оброблення, але і до зниження продуктивності оброблення. Велика швидкість обертання щіток вимагає більш високих швидкостей обертання шпинделя верстата. Оброблення ведеться до тих пір, поки не буде досягнутий характерний блиск обробленої поверхні.

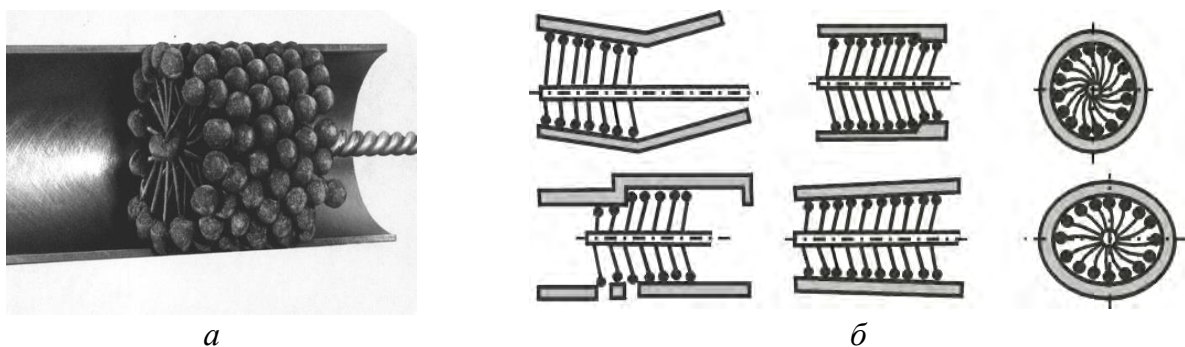
Особливе місце займає полімер-абразивний інструмент. При деякому наближенні можна допустити, що волокно щітки має вигляд окремого елемента пелюсткового круга, розрізаного на окремі волокна. Однак, він має більші можливості в порівнянні з пелюстковим інструментом. Так як абразивні частинки розподілені, як по зовнішній циліндричній поверхні, так і по всьому перетину волокна, різання може здійснюватися при більшому початковому навантаженні на інструмент, ніж це можливо при застосуванні звичайного круга-щітки. Абразивні частинки розташовані також на торці робочих волокон, що дозволяє працювати в режимі тонкого шліфування. Цей інструмент може працювати в двох режимах: різання і полірування. Будь-яке використання інструментів, з метою оброблення поверхонь, викликає необхідність кількісно оцінити силові показники процесу різання (силу різання, потужність затрачену на процес оброблення і момент різання).

Особливим видом інструменту для фінішної оброблення є «флекс-хон» – гнучкий інструмент, сформований з робочих елементів у вигляді абразивних сферичних глобул, кожна з яких закріплена на незалежній пружній підвісці. Інструмент застосовується в ремонтному виробництві при хонінгуванні отворів і обробленні поверхонь недоступних будь-яким іншим методам, забезпечуючи високу якість поверхневого шару.

Ефективність процесу механічного оброблення багато в чому визначається конструкцією застосованого інструмента. Справедливо це і до випадку фінішного оброблення отворів. На рис. 4.19 показано приклад оброблення отворів інструментом, який отримав назву «флекс-хон».

За рахунок своєї надзвичайної гнучкості інструмент дозволяє обробляти отвори складної форми – еліптичні в перерізі, зі сходами по довжині, з перегинами, конічні тощо. При цьому, залежно від зернистості абразиву, з якого сформовані робочі гранули, на поверхні виробу формується сітка слідів оброблення, подібна створюваній при процесі хонінгування, а шорсткість поверхні істотно менша, ніж та, яка забезпечується процесом хонінгування.

Існуючі на сьогодні технології формоутворення фасонних поверхонь, особливо поверхонь з періодично повторюваним профілем, засновані на просторовій реалізації складного відносного переміщення інструмента і виробу. Верстати для такого оброблення характеризуються особливою кінематикою і конструктивно складні.



**Рис. 4.19. Оброблення отворів інструментом «флекс-хон»:**

*a* – приклад оброблення; *б* – схематичний вид оброблюваних отворів

Сучасні генеративні технології, такі як селективне лазерне спікання функціональних деталей з порошкових сумішей за методом «рапід-прототайпінг», дозволяють по-новому підійти до ідеології створення інструментів для оброблення складно-профільних виробів. Технологія дозволяє «виростити» з полімерного композиційного або метало-полімерного

порошкових матеріалів твердотісну конструкцію інструменту практично будь-якої об'ємної просторової форми, представленої на комп'ютері. В цьому випадку кінематичний ланцюг верстата, що забезпечує для прийнятої форми і конструкції інструмента формоутворення необхідного виробу, може бути істотно спрощеним, що знизить складність і вартість технологічного обладнання. Такий підхід дозволить методами механічного оброблення забезпечити необхідну форму деталей, які в даний час виготовляються методами лиття з використанням методів складання або створенням нероз'ємних з'єднань.

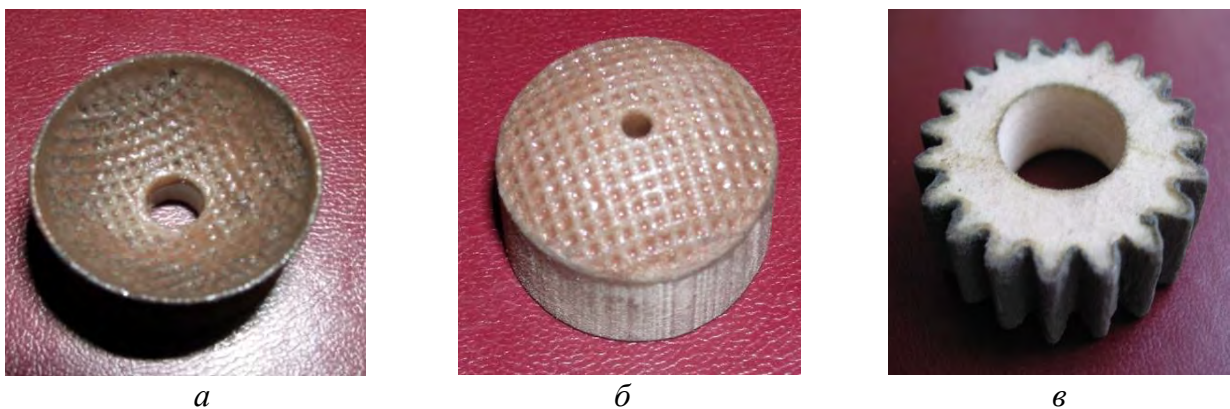
Для виготовлення складнопрофільного інструменту з алмазно-полімерних композитів з використанням методу «рапід-прототайпінг» запропоновані два варіанти: – «виросування» корпусу інструменту та нанесення на його робочі поверхні різального алмазного шару; «виросування» корпусу з пористою структурою і інтегрування в пори алмазовмісної композиції.

Приклади інструментів, створених відповідно до розглянутих підходів, представлені на рис. 4.20.

Зубчасті хони модулем 2,0 мм, корпуси яких виготовлені селективним лазерним спіканням з еластополімерного порошку, з робочим шаром, що містить алмазний порошок АС6 100/80, пройшли виробничу апробацію при обробленні термооброблених зубчастих коліс зі сталі 18ХГТ (58–63 HRC). Зубохонінгуванням усувається дефектний шар на евольвенті поверхні зубів, радіальне биття коліс знижується на 0,05 мм.

#### 4.3.8.3. Алмазовмісні пилки реноватора та шнури

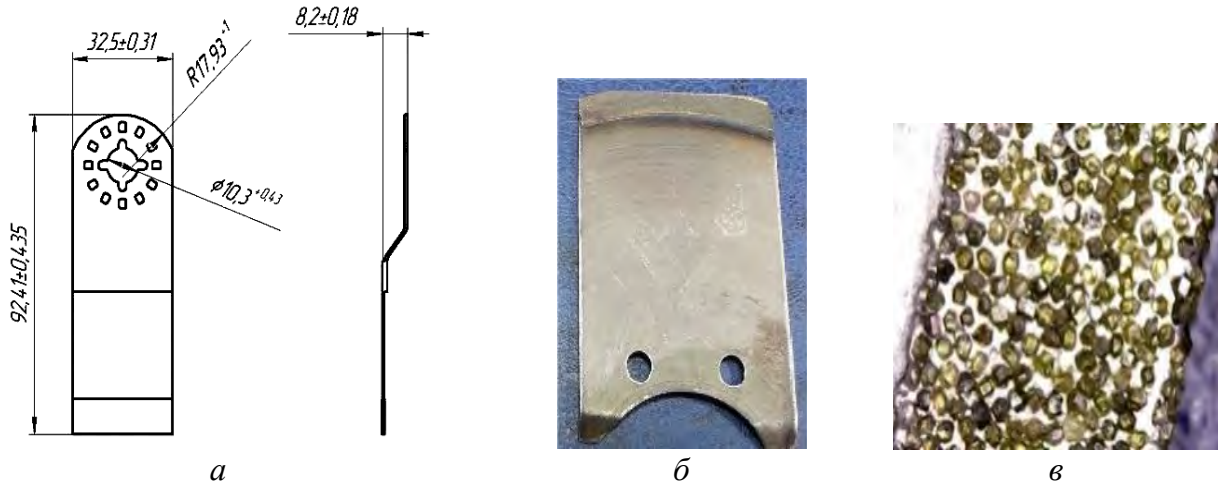
Реноватор (комерційна назва багатофункціонального інструменту, який набуває популярності на ринку ручних інструментів в усьому світі) являє собою ручну електричну машину, шпіндель якої здійснює високочастотні поворотні коливання на невеликий кут. Однак на відміну від кутових шліфмашин, оснащення пристрою спеціальним інструментом лопаткової форми із периферією, що вміщає алмазозносний шар (рис. 4.21), дозволяє виконувати унікальні операції за схемою занурення робочої частини. Так отримують пазы, пропили, виконують розділові операції. При цьому оскільки амплітуда коливань зовнішньої (робочої) крайки інструменту не перевищує 2..3 мм, оброблення йде зі значно меншим поширенням пилу від зони різання, а різ має більш якісну форму і крайки.



**Рис. 4.20.** Зразки інструментів з алмазно-полімерних композитів, отримані з використанням методу «рапід-прототайпінг»: *а, б* – для оброблення випуклих і ввігнутих сферичних поверхонь; *в* – зубчастий хон

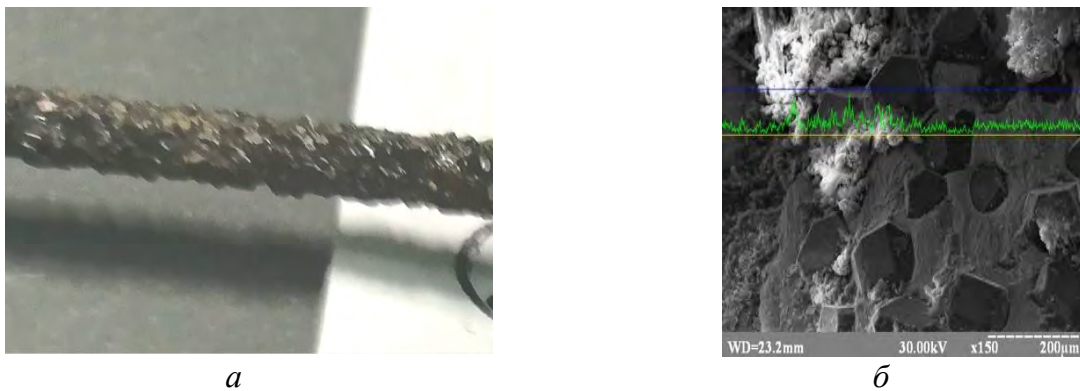
Досвід нанесення робочого шару з алмазного порошку методом гальваностегії на стандартну занурювану пилку конструкції фірми Bosch, показав, що такий інструмент з високою продуктивністю виконує прорізання пазів у важкооброблюваний композиційних вуглець-вуглецевих матеріалах і залишається практично безальтернативним для виконання високоточних пазів обмеженої глибини. При цьому виключається проблема перегріву робочої поверхні, значної диспергації шкідливої пилу, що виникає в процесі оброблення.

Такий інструмент має високу ефективність і при обробленні інших квазікрихких матеріалів, зокрема, скляних виробів, різних видів високоміцних пластиків.



**Рис. 4.21.** Кресленик занурювального пильного полотна (а), його змінна частина (б), робочий алмазовмісний шар інструменту (в)

Іншим спеціальним інструментом для оброблення важкооброблюваних композитів, є шнури, оснащені алмазовмісним різальним шаром (рис. 4.22).



**Рис. 4.22.** Алмазовмісний шнур (а) та фрагмент його поверхні із залишками шламу від розрізання вуглець-вуглецевої заготовки (б)

Як правило, такий інструмент є нежорстким і призначений переважно для відокремлення проміжної заготовки від тіла матеріалу. При цьому швидкість головного руху не перевищує 25 м/хв, однак навіть за таких умов головною проблемою роботи інструменту залишається його здатність до самоочищення

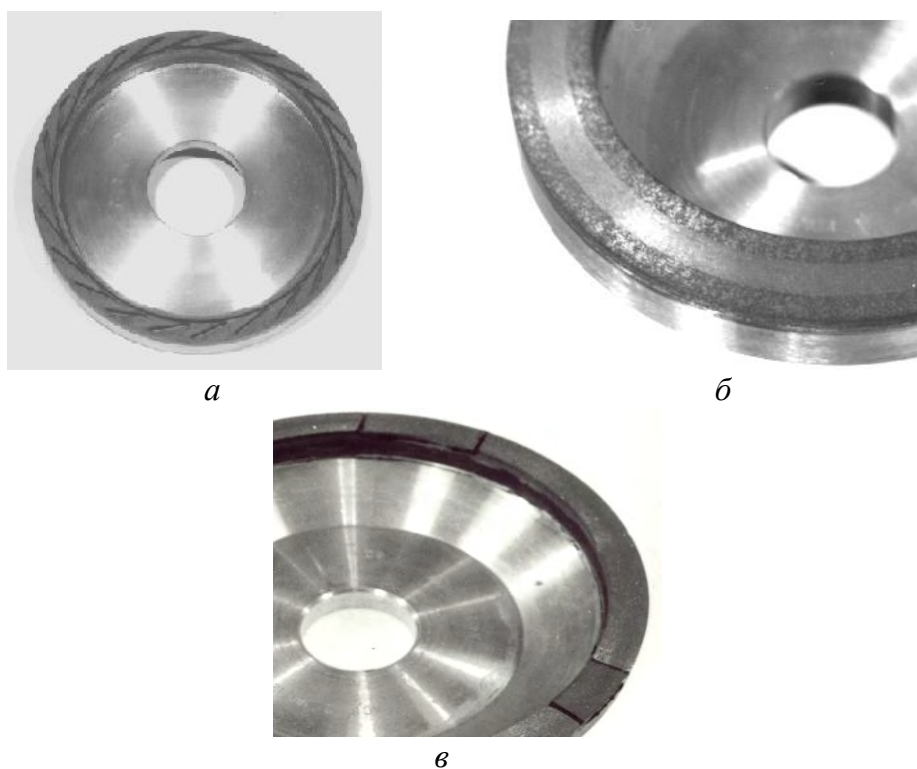
## 4.3.9. Інструменти для комбінованих методів оброблення

Перспективними варіантами комбінованого оброблення, є методи оброблення, в яких механічний вплив при абразивному різанні об'єднаний із електроерозійним, електроіскровим або електрохімічним впливом в контактній зоні.

Оброблення плоских поверхонь. Найбільшого поширення в промисловості отримали електрохімічне (ЕХШ) і електроерозійне (ЕЕШ) шліфування.

Шліфувальні круги для електрошліфування – круги форм 12А2-45° 125(150)х10(20)х3х32 або 6А2 150(250)х20х3х32(76). Алмази марок АС6 чи сVN марки кубоніт КР (КВ). Зернистість шліфпорошків НТМ 80/63...250/200. Відносна концентрація НТМ у робочому шарі кругів – 100 % (можлива 75 %). Зв'язки кругів – металеві (М1-01, М1-10, М2-12Е, М020-2) або металополімерні (В1-01, В1-03, В1-13).

Спеціальні круги – 6А2SS 250х20х5х76 на полімерних зв'язках для шліфування безвольфрамових твердих сплавів. 12А2-45° багат шарові і з шаром, що чергується для глибокого шліфування твердих сплавів і швидкорізальних сталей.



**Рис. 4.23. Круг форми 6А2SS діаметром 250 мм для глибокого шліфування (а), фрагменти спеціальних багат шарових кругів із шарами, що чергуються в радіальному (б) та окружному (в) напрямках**

Шліфувальні круги для електроерозійного шліфування – круги форм 12А2-45° 125(150)х10(20)х3х32 або 6А2 150(250)х20х3х32(76). Алмази марок АС6 чи кубоніт марок КР (КВ). Зернистість шліфпорошків НТМ 80/63...250/200. Відносна концентрація НТМ у робочому шарі кругів – 100 % (можлива 75 %). Зв'язки кругів – металеві (М1-01, М2-01, М2-12Е, М020-2).

На рис. 4.23 наведено спеціальні круги 12А2-45° – багат шарові і з шаром, що чергується для глибокого шліфування твердих сплавів і швидкорізальних сталей.

При необхідності для підвищення подачі технологічної рідини в зону оброблення використовують спеціальні круги з канавками в різальному шарі (рис. 4.23, *a*). У разі глибинного шліфування для обліку нерівномірності зносу різальної поверхні круги в радіальному напрямку застосовують багатошарові круги, кожен шар яких відрізняється за фізичними і технічними характеристиками (рис. 4.23, *б*).

Основними перевагами таких спеціальних інструментів є те, що при їх використанні реалізується можливість цілеспрямовано змінювати характеристику робочого шару на одному колі, наприклад, застосовувати одночасно шари з великими зернами алмазу для досягнення високої продуктивності оброблення і шари з дрібнішими зернами для забезпечення низької шорсткості обробленої поверхні.

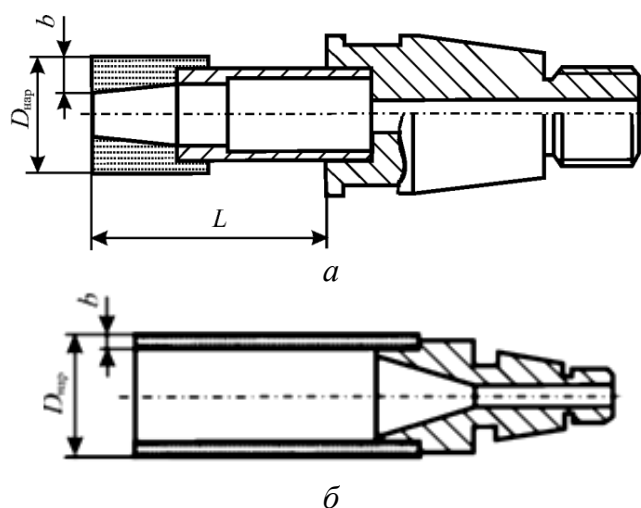
Алмазно-електрохімічне оброблення зовнішніх поверхонь обертання. Вибір інструменту пов'язаний безпосередньо з розмірами оброблюваних ним виробів, величиною припуску на оброблення і вимогами до їх якості. Використовуються стандартні алмазні круги прямого профілю з алмазо-носним шаром на металевих зв'язках марок М1-04, МС6, М3-21 і їм подібних з алмазами АС15 ... АС32 зернистістю 125/100 - 315/250 при відносній концентрації 100.

Алмазно-електрохімічне оброблення внутрішніх поверхонь обертання. Як алмазно-абразивних інструментів використовують стандартні круги прямого профілю (1А1), алмазні циліндричні головки (АГЦ) або круги спеціальних форм. Зазвичай алмазоносний шар формується на металевих зв'язках типу М3-21, М1-04, гальванічної нікелевої та подібних до них з алмазами АС15...АС32 зернистістю 80/63–315/250 з відносною концентрацією 100...150.

Алмазно-електрохімічне свердління. Інструменти (свердла-трепани, конічні круги, інструменти з фасонною робочою частиною) різняться між собою в залежності від галузі застосування, конструкції та характеристики алмазоносного шару.

Свердла-трепани використовуються при обробленні внутрішніх циліндричних поверхонь у цільних або вже мають отвори заготовках і можуть використовуватися для формування ступінчастих отворів.

Інструменти можуть бути з круговим (тобто невисоким) або трубчастим з алмазоносним шаром (рис. 4.24).



**Рис. 4.24.** Алмазні свердла з кільцевим алмазовмісним шаром (*a*), з трубчастим алмазовмісним шаром (*б*):  $L$  – довжина робочої частини;  $b$  – товщина кільцевого алмазоносного шару свердла;  $D_{нар}$  – зовнішній діаметр свердла.

Свердло-трепан (рис. 4.25) складається з хвостовика, до якого припаюється (латунню) металічний трубчастий корпус з алмазоносним шаром.

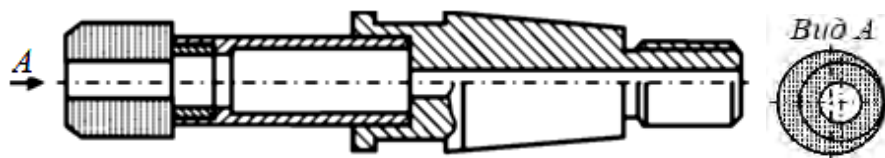
Якщо алмазозносний шар (зазвичай кільцевий) зформований на метало-керамічній зв'язці, то він скріплюється з корпусом при спіканні. Якщо ж алмазозносний шар (звичайно трубчастий) формується методами гальванопластики, екструзії або з алмазозносного прокату, який скручують в трубку, то він прикріплюється до трубчастого металічного корпусу або безпосередньо до хвостовика пайкою із застосуванням припою ПСР 40 або олова (рідше).

Характерною особливістю свердлів з кільцевим алмазозносним шаром є наявність у ньому каналів, що забезпечують можливість (або покращують умови) надходження електроліту в торцевий зазор і видалення з нього продуктів знімання. Такі канали розташовані по утворюючих зовнішньої та внутрішньої поверхонь.

Правку кільцевого або трубчастого алмазозносного шару для усунення радіального та торцевого биття, а також розтину алмазів, що здійснюється до формування каналів, проводять методом абразивного шліфування на заточних або круглошліфувальних верстатах з використанням кругів прямого профілю з абразивами.

Необхідні умови для забезпечення подачі електроліту в робочий зазор виконуються також у разі зміщення кільцевого алмазозносного шару щодо осі обертання свердла.

Для надання такому свердлу стійкості в процесі співвісної трепанації на його зовнішній торцевій кромці формують конічну фаску. Вона не тільки виключає відведення свердла від осі отвору, але і штучно підвищує пропорційно синусу кута при вершині конуса щільність технологічного струму в напрямку знімання матеріалу без зміни висоти міжелектродного зазору, підвищення напруження на електродах, швидкості обертання інструменту тощо.



**Рис. 4.25. Алмазне свердло-трепан зі зміщенням в радіальному напрямку кільцевим алмазовмісним шаром і співвісною конічною фаскою**

Наявність конічної фаски дозволяє згідно зі схемою розкладання сил знизити задане зусилля притиску свердла і полегшити тим самим здійснення оброблення з переважно абразивно-механічним зніманням твердого сплаву.

Необхідні умови для надходження електроліту під торець свердла реалізуються і в разі ексцентричного розташування внутрішньої поверхні кільцевого алмазозносного шару щодо його зовнішньої поверхні.

Втіленням у конструкції АСТ зазначених вище вимог є також свердла з тонкостінним трубчастим гранованим алмазозносним шаром (формується методом гальванопластики), завдяки чому забезпечується утворення в процесі трепанації природних бічних зазорів як між стінкою отвору і зовнішньою поверхнею алмазозносного шару, так і між алмазозносним шаром.

Для застосування АСТ при розшліфуванні отворів на їх металевому трубчастому корпусі методом гальваностегії формують круговий алмазозносний шар або закріплюють спеціальні сегменти, що розташовуються якомога ближче до хвостовика свердла, завдяки чому в процесі розшліфування забезпечується велика жорсткість технологічно.

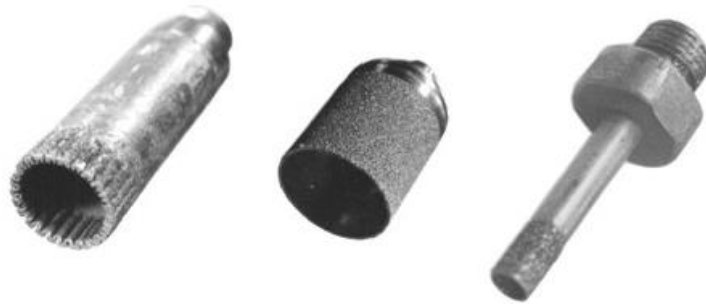
Для усунення або зменшення биття торцевої поверхні алмазо-носного шару, доцільно застосовувати свердла зі спеціальним корпусом, що дозволяє нахилити вісь

інструмента щодо осі обертання шпинделя або використовувати універсальну оправку з гнучким трубчастим елементом (рис. 4.26).

Різновидом АСТ є свердла з алмазозносним шаром, що формується методом гальванопластики (рис. 4.27). Відмінною особливістю їх конструкції є максимальна міцність з'єднання алмазозносного шару з трубчастим корпусом, так як у процесі виготовлення вони формуються як одне ціле; їм властива і мала товщина алмазозносного шару. Дані свердла використовуються в основному для АЕС отворів малого діаметра.



**Рис. 4.26. Алмазне свердло-трепан, що дозволяє нахилити ось інструмента відносно осі шпинделя**



**Рис. 4.27. Алмазні свердла-трепани з трубчастим і кільцевим алмазозносним шаром, що формується методом гальваностегії**

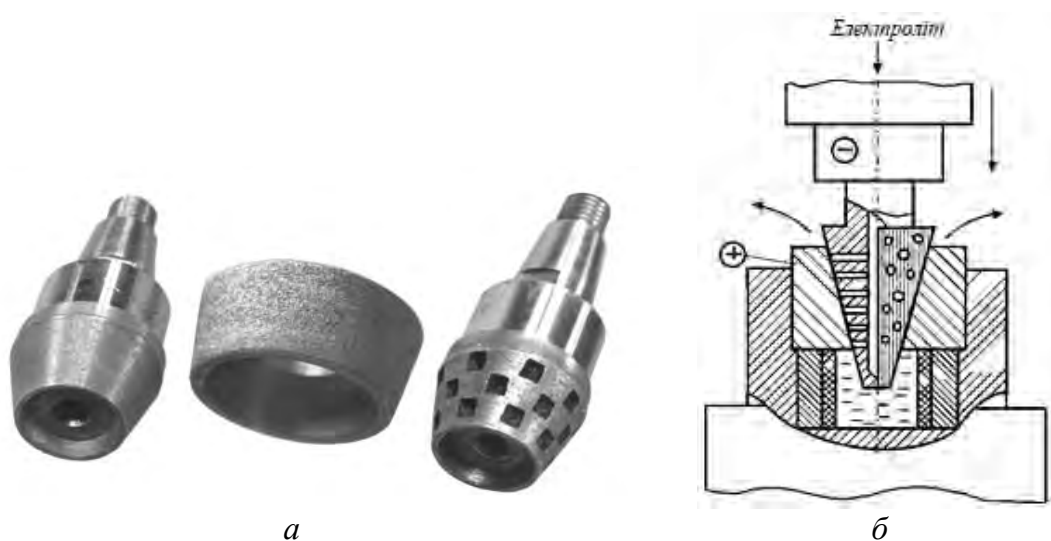
Ще один з різновидів АСТ – свердла з алмазозносним шаром, що отримується на металевому корпусі заданої форми методом гальваностегії (рис. 4.28). Технологія виготовлення цього виду свердлів дозволяє створювати інструменти з робочою частиною та каналами будь-якої форми. У таких АСТ виключається поломка алмазозносного шару керном, що випадає. Вони придатні і для розшліфування периферійною поверхнею кільцевого алмазозносного шару свердла.



**Рис. 4.28. Алмазні свердла-трепани з алмазозносним шаром, що формується методом гальваностегії**

Найбільш поширені круги, що складаються з хвостовика, до якого припаяно конічний металевий корпус з алмазозносним шаром (рис. 4.29, а). Останній може бути

сформований методом спікання (на металокерамічному зв'язуючому), нанесений на сталевий металевий корпус методом гальваностегії (на нікелевій зв'язці) або утворений з листового алмазозносного прокату.



**Рис. 4.29. Конічні круги з алмазовмісним шаром на гальванічній і твердосплавній зв'язках (а), схема роботи конічного круга з радіальними каналами (б)**

Для формування конічних отворів використовують різні типи алмазних конічних кругів, що обумовлюється як формою оброблюваних отворів, так і вимогами до їх оброблення.

Відмінністю алмазних конічних кругів з робочим шаром, що формується методом спікання, є можливість виготовлення їх з алмазозносним шаром на твердосплавному електроерозійностійкому зв'язуванні. Для надходження електроліту міжелектродний зазор в алмазозносному шарі утворюють канали, які можуть мати різну конфігурацію. Вони можуть бути прямолінійними і розташованими віялоподібно за утворюючим конічною поверхнею, можуть мати зигзагоподібну форму або виконані у вигляді заглиблень, розташованих у шаховому порядку. Якщо кут конічного круга великий ( $90\dots120^\circ$ ), то канали можуть бути прямолінійними і розташованими віялоподібно по утворюючим алмазозносного шару.

При обробленні глибоких конічних отворів, коли умови витікання електроліту із зони оброблення надзвичайно утруднені внаслідок великої площі контакту алмазозносного шару з оброблюваною поверхнею, канали доцільно формувати в корпусі у вигляді радіально розташованих отворів, з'єднаних із загальним осьовим і периферійними каналами, що забезпечує подачу електроліту в робочий зазор під тиском (рис. 4.29, б).

Для формування конічного або зенкованого отвору в цілісній заготовці застосовуються конічні круги, що є в нижній частині кільцевого алмазного свердло-трепан, зовнішній діаметр якого дорівнює меншому діаметру конічного алмазозносного шару (або трохи більше його).

У цьому випадку безкерна свердління і оброблення фасонних отворів оброблення проводиться при проходженні осі отвору в заготовці, що обертається через алмазозносний шар обертового інструменту. Конструктивні форми найпростіших інструментів для здійснення безкерна свердління показано на рис. 4.30, а, б.

У зв'язку з тим, що при формуванні глухих отворів забезпечувати малий радіус переходу від стінки до дна отвору важко внаслідок значного зносу алмазозносного шару

по зовнішній торцевій кромці, в деяких випадках доцільно застосовувати «сорочні» свердла спеціальної конструкції (рис. 4.30, *з*).

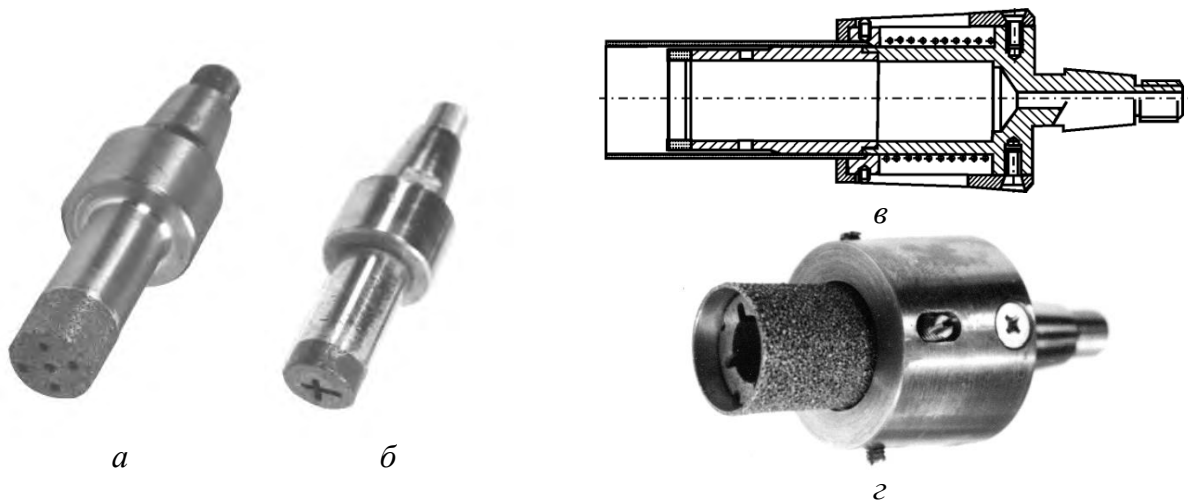
Робоча поверхня їх утворена кільцевим алмазозносним шаром і охоплює його іншим, тонкостінним трубчастим алмазозносним шаром, закріпленим на циліндричній поверхні пружнорухливої в осьовому напрямку втулки. Тонкостінний трубчастий алмазозносний шар формують методом гальванопластики. Це дозволяє отримувати його завтовшки 0,1...0,5 мм і забезпечувати тим самим у процесі оброблення перехід від стінки до дна отвору з малим радіусом.

До конструкції фасонних інструментів для алмазно-електрохімічної оброблення (рис. 4.31) пред'являються ті ж вимоги, що і до конструкції конічних кругів.

Оскільки різновиди таких інструментів не можуть бути типізовані внаслідок великої різноманітності їх форм, додаткові вимоги до їх конструкції встановлюються на підставі вимог до оброблення конкретних виробів.

Інструменти для ХППД (вигладжування та накочування) піддаються високим контактним навантаженням і температурам. Тому їх матеріали повинні мати велику твердість, здатність чинити опір стиранню, високу границю міцності на стиск, низький коефіцієнт тертя і низьку схильність до схоплювання з оброблюваним матеріалом по металу, велику термостійкість.

Для виготовлення вигладжувачів широко застосовуються полікристалічні композиційні матеріали на основі синтетичних надтвердих матеріалів. Мікроструктура таких композитів містить каркас із часток НТМ, між якими є зв'язуюча.

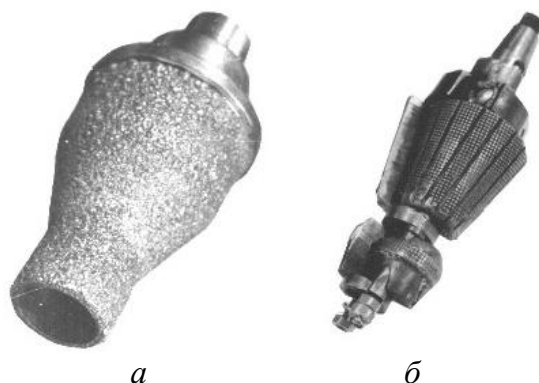


**Рис. 4.30.** Алмазні інструменти для безкерового свердління з робочою частиною з слаутича (*а*) і на металокерамічній зв'язці (*б*); схема «рубашечного» свердла для формування глухих циліндричних отворів з малим радіусом скруглення на ділянці переходу від стінки до дна отвору (*в*); свердло (*г*)

#### 4.3.10. Інструменти із НТМ для оброблення холодним поверхневим пластичним деформуванням

Розроблено технологію отримання алмазного композиційного термостійкого матеріалу (АКТМ) на основі алмазу та карбиду кремнію. Введення в композит нанопорошку алмазу збільшує дисперсність карбиду кремнію, що утворюється при просочуванні шихту з зернами алмазу кремнієм, зменшує кількість незв'язаного кремнію в композиті і таким чином підвищує міцність матеріалу на стиск. Отриманий композит

відрізняється від монокристалів вищою термостійкістю і вільний від такого недоліку, як анізотропія властивостей.



**Рис. 4.31. Фасонні алмазні інструменти:** цільний з алмазоносним шаром, сформований методом гальванопластики (а); багатоеlementний з робочою частиною з листового алмазоносного прокату (б).

За своїми фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками алмазний композит АКТМ істотно перевершує відомі синтетичні полікристалічні алмази: – термостійкість композиту АКТМ зберігається незмінною практично до температури 1200 °С у той час, як термостійкість аналогів – полікристалів типу АСПК та природного алмазу  $\leq 700$  °С; – границя міцності при стисканні композиту АКТМ перевищує міцність полікристалу-аналогу на 30%.

Фізико-механічні характеристики матеріалу АКТМ представлені в табл. 4.19.

Зазначені властивості дозволяють ефективно застосовувати даний композит як матеріал робочої частини вигладжувачів. Вставки  $\varnothing 4 \times 5$  мм із АКТМ після металізації міддю запаюють у сталевий корпус.

**Табл.4.19. Фізико-механічні характеристики композиту АКТМ**

Параметр	Величина
Щільність, г/см <sup>3</sup>	3,45
Твердість по Кнупу, ГПа	50...55
Трещиностійкість, МПа·м <sup>1/2</sup>	10...12
Міцність на стиск, ГПа	2,2...3,1
Модуль Юнга, ГПа	970
Теплопровідність, Вт/(м·К)	250...300
Зносостійкість при правці корундового круга, мг/кг	~4,4
Термостабільність, К	~1500

Заточування робочої частини вигладжувача виконується на заточувальному верстаті в пристосуванні, що забезпечує отримання на вершині інструменту сфери з шорсткістю  $Ra$  0,044...0,048.

Алмазними вигладжувачами можуть оброблятися як кольорові метали і незагартовані сталі, так і сталі, загартовані до високої твердості.

Слід зазначити, що АКТМ є перспективним матеріалом для вигладжувачів, що застосовуються для оброблення виробів із сталі. У той же час, він не дозволяє ефективно обробляти вироби з титанових сплавів, цирконію, ніобію, що пов'язано з підвищеною схильністю до схоплювання алмазу з цими матеріалами.

Оздоблювально-зміцнююче оброблення виробів з цих матеріалів доцільно виконувати накочуванням кульками, тобто. методом, у якому тертя ковзання зведено до мінімуму, а переважає тертя кочення.

Розроблено технологію виготовлення робочих елементів накатників з АКТМ, після механічного оброблення шорсткість поверхні кулі –  $Ra$  0,16.

Застосування накатників з робочим елементом з АКТМ дозволяє істотно розширити технологічні можливості процесу накочування і знизити ймовірність появи браку.

#### 4.3.11. Інструменти для фінішного оброблення зубчастих коліс

Інструменти з НТМ застосовуються для оброблення термічно оброблених зубчастих коліс – шліфування, зубохонінгування, полірування.

Для зубохонінгування використовуються алмазні або  $cBN$ -зубчасті хони – циліндричні зубчасті колеса або рейки, що мають відповідний вихідний контур. При зубохонінгуванні відбувається взаємна обкатка колеса та інструменту із схрещуваними осями, в результаті якої, за рахунок взаємного ковзання, знімається шар металу.

В результаті зубохонінгування знімається припуск із поверхні зубів (0,02...0,05 мм).

Шліфування зубців здійснюється за методами копіювання або вимушеного обкату (рис. 4.32). Метод копіювання заснований на відтворенні робочою поверхнею шліфувального круга западини зубців колеса, що шліфується.

Метод обкату заснований на зачепленні колеса, що обробляється, з зубом рейки, що відтворюється поверхнями шліфувального круга.

Шліфування зубців методом обкатки з періодичним розподілом здійснюється одним конусним, одним плоским колом або двома тарілчастими кругами.

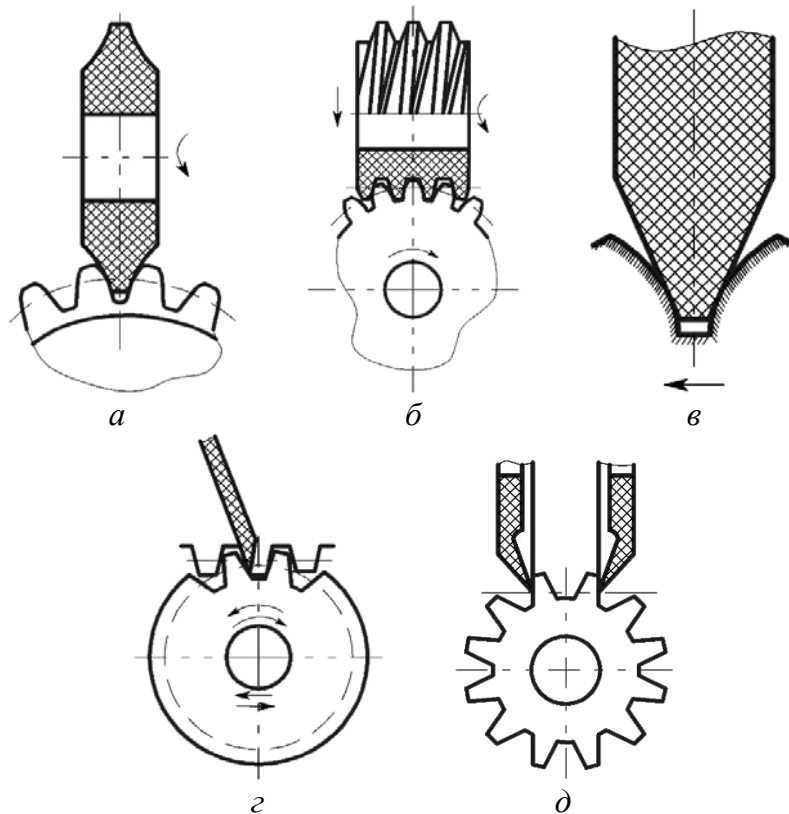
Вид конусних шліфувальних кругів для зубошліфування вибирається, виходячи з форми і розмірів зубчастого колеса, що обробляється, моделі верстата (рис. 4.33).

Для забезпечення безприпалювального зубошліфування і необхідної точності зубчастих коліс на верстатах типу Найльс розроблені круги на металевих зв'язках з металевими і неметалевими покриттями зерен.

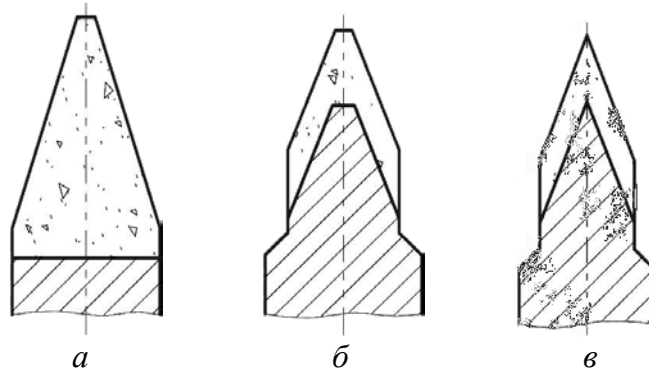
Від типу зв'язуючого інструменту залежить різальна здатність, стійкість круги, продуктивність зубошліфування, а також якість обробленої поверхні. Для зубошліфування деталей із загартованих та цементованих сталей 40X, 18ХГТ, 12ХНЗА, швидкорізальних сталей Р6М5 рекомендуються круги на металевих зв'язках М08, М1. Доцільно застосовувати  $cBN$  підвищеної міцності марки КР.

Зернистість порошків НТМ для кругів вибирають в залежності від необхідної шорсткості оброблених зубців, необхідної продуктивності процесу, а також виходячи з економічних міркувань. Шорсткість обробленої поверхні  $Ra \leq 0,63$  і висока зносостійкість інструментів з  $cBN$  забезпечується при використанні порошку  $cBN$  зернистістю 160/125.

Розроблено технологію зубошліфування методом обкатки з використанням алмазних кругів із синтетичних алмазів на органічних зв'язках. Головною перевагою алмазного зубошліфування є низька температура обробленої поверхні, що виключається можливість появи припалів і тріщин.



**Рис. 4.32. Методи шліфування зубчатих коліс:** копірування (*а*); обкатка черв'яком (*б*); обкатка конусним кругом (*в*); обкатка плоским кругом (*г*); обкатка двома торільчатими кругами (*д*)



**Рис. 4.33. Радіальний переріз робочої частини шліфувальних кругів:** круг з робочим шаром із НТМ, напресованим на алюмінієвий корпус (*а*); круг з робочим шаром із НТМ для зубошліфування повного профілю зубця (*б*); круг з робочим шаром із НТМ для зубошліфування евольвентної поверхні зубця (*в*)

Правка кругів необхідна при первинній установці на шпиндель верстата для усунення биття і перед чистовими проходами для отримання необхідної геометрії зуба. Виконують її алмазними олівцями електроерозійним методом правки.

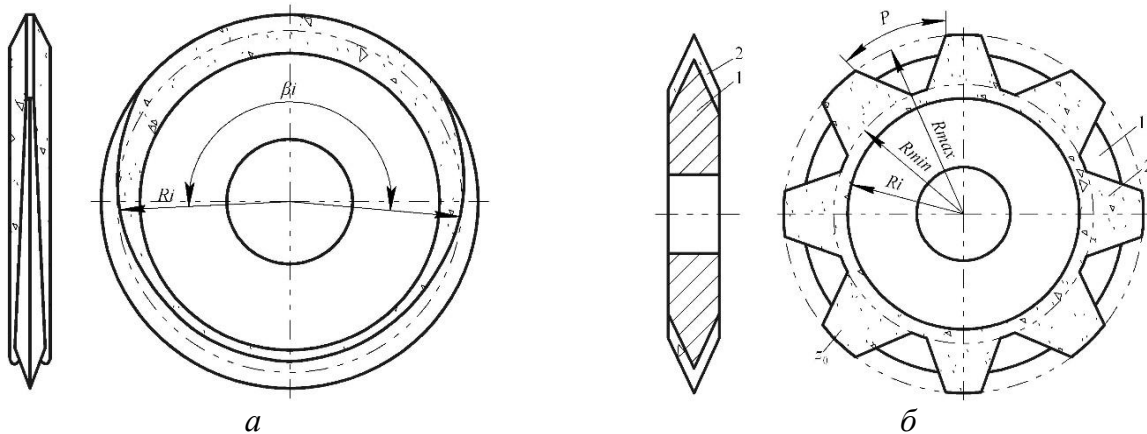
Для підвищення ефективності зубошліфування розроблені спеціальні конструкції кругів з переривчастою робочою поверхнею (рис. 4.34).

Круги з ексцентричним розташуванням робочого шару дозволяють обробляти зубчасті колеса до 6 ступеня точності з періодами між правками круга 3 год, що в 4,5

більше, ніж при шліфуванні кругими звичайної конструкції 14EE1X. Продуктивність процесу зростає у 1,2 рази.

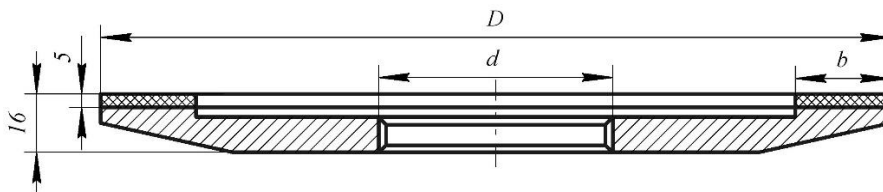
Круги з робочим шаром у вигляді зубчастого диска характеризуються покращеною динамікою і 1,5...1,8 рази більшою стійкістю, до 4-х разів більшим періодом між правками. Знижується температура шліфування, що позитивно впливає на якість оброблення.

Розроблено спеціальну конструкцію конічного шліфувального круга з переривчастою робочою поверхнею, в якому робочі елементи із НТМ закріплюються в корпусі механічним шляхом.



**Рис. 4.34. Схеми зубшліфувальних кругів з ексцентричним розташуванням робочого шару (а) і з робочим шаром у вигляді зубчастого диска (б)**

Для виготовлення алмазозносного шару алмазного тарільчастого круга (рис. 4.35) застосовуються алмазні шліфпорошки марок АСР і АСО зернистістю від 160/125 до 50/40 або мікропорошки марки АСМ зернистістю від 60/40 до 6 зв'язку марки Б1.



**Рис. 4.35. Круг алмазний тарільчатий для зубшліфування**

Відносна концентрація алмазів в об'ємі алмазозносного шару 100 і 150. Ширина круги повинна бути більшою за висоту шліфованих зубців (табл. 4.20)

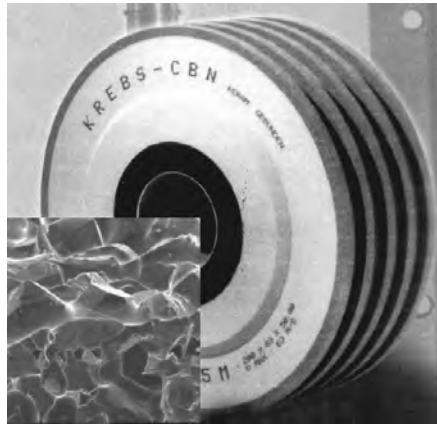
Розроблено круги форми 12V9 зі сталевим корпусом, алмазозносний шар яких виконаний під кутом  $5^\circ$ , що дозволяє запобігти "затирання" евольвентної поверхні зубця при шліфуванні зубчастого колеса і скоротити період припрацювання круга.

Черв'ячний шліфувальний круг фірми «Krebs» показано на рис. 4.36.

В кругах використаний СВН-керамічний композит з високопористою структурою, що забезпечує інструменту високу працездатність.

**Табл. 4.20. Ширина тарільчатого круга**

Модуль	2,5	2,75... 3,25	3,5...5,5	6...7	8...10	11...12
Ширина алмазоносного шару круга, мм	8	10	16	20	25	30



**Рис. 4.36. Черв'ячний шліфувальний круг фірми «Krebs»**

Фірмою «Krebs» також розроблено технологію шліфування зубчастих коліс профільними кругами з cBN. Інструментом є сталевий корпус з точно відшліфованим базовим профілем, на який гальванічним способом нанесений робочий шар, що включає одиничний шар зерен cBN, закріплений нікелевою або іншою зв'язкою.

Таке оброблення не вимагає зупинки процесу для виправлення круга, гарантує постійну високу точність профілю зуба зубчастого колеса і структуру матеріалу його поверхневого шару. Використання кругів малого діаметра (до 25 мм) дає можливість шліфувати колеса з внутрішніми зубами.

#### **4.4. Інструменти для оброблення гуми, полімерних та деревинних композиційних матеріалів, скла та каменю**

##### **4.4.1. Інструменти для оброблення полімерних та композиційних матеріалів**

Інструменти для оброблення гуми, полімерних та композиційних матеріалів виготовляють з розміщенням зерен алмазу на поверхні корпусу інструменту в один шар і закріпленням їх методом гальваностегії.

Створено надійні, довговічні та продуктивні конструкції одношарових алмазно-абразивних інструментів з суцільною та переривчастою робочою поверхнею.

Суцільна робоча поверхня інструментів забезпечує нижчу шорсткість обробленої поверхні, але при цьому спостерігається висока теплонапруженість процесу в зоні контакту інструмента з деталлю. Застосування переривчастої робочої поверхні дозволяє знизити нагрівання, поліпшити умови видалення зрізаного шару оброблюваного матеріалу, підвищити працездатність інструменту.

Алмазно-абразивні інструменти для різання (розрізання), шліфування (зачищення), свердління та зенкування поверхонь виробів з ПКМ, зокрема, вуглепластиків, органопластиків, склопластиків, стільникових заповнювачів і конструкцій з них повинні

експлуатуватися при температурі навколишнього середовища не вище 40 °С та відносної вологості повітря не більше 80 %.

Алмазний відрізний круг із зовнішньою різальною кромкою (рис. 4.37) складається з корпусу  $l$  зі сталі марки 9ХФ за ДСТУ 3953-2000 або сталей марок 50ХФА, 65Г за ДСТУ 8429:2015, зовнішнім діаметром  $D$ , діаметром посадкового отвору  $d$  і товщиною  $h$  у вигляді диска з потовщеною ( $h_1$ ) центральною частиною та без неї.

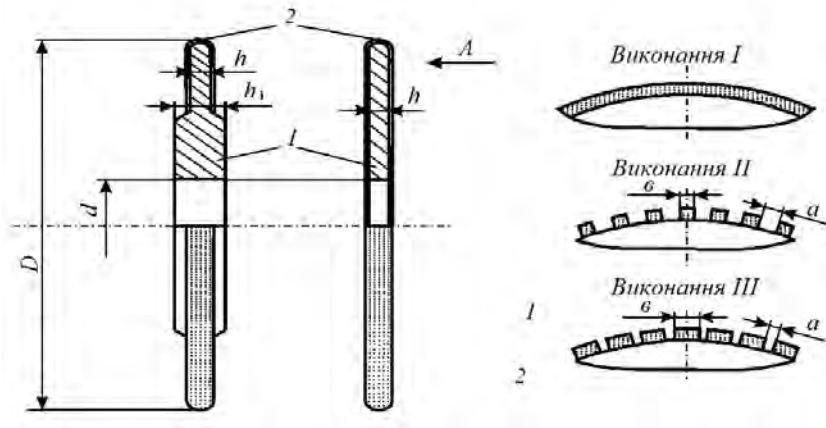


Рис. 4.37. Алмазний відрізний круг

Основні конструктивні та геометричні параметри одношарових кругів наведені у табл. 4.21. На зовнішній периферійній частині круги гальванічним методом закріплені алмазовмісний шар 2.

Для його виготовлення застосовують шліфпорошки синтетичного алмазу АС15-Н, АС32-Н (ТУ2-037-344-85) або АС15, АС20, АС020/00 400 (ДСТУ 3292-95). Вибір марки і зернистості шліфпорошків проводиться виходячи з фізико-механічних і теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу, режимів різання. Приймаються до уваги і вимоги до якості поверхні деталей, що обробляються.

Закріплення зерен алмазу на корпусі круги проводиться електролітичним осадженням нікелю. У цьому забезпечується виступання зерен алмазу  $H = (0,33...0,67)d$ , де  $d$  – середня величина зерна.

В умовах шліфування полімерних композиційних матеріалів під дією сили різання, температури, ударних навантажень, вібрацій і зносу ця величина зазвичай змінюється до  $H = (0,45...0,55) d$ . Для кожної зернистості порошку алмазу існує оптимальна висота виступу зерен у круга, при якій допустимому його зносу відповідає найбільша продуктивність процесу оброблення.

Зовнішня робоча поверхня алмазних відрізних кругів виконується як суцільний (виконання I), так і переривчастої (виконання II і III), що представляє собою чергування виступів шириною  $b$  і западин шириною  $a$ .

Приклад запису позначення алмазного відрізного круга форми 1A1R з суцільною робочою поверхнею діаметром 125 мм, товщиною корпусу 1,2 мм, діаметром отвору посадкового 32 мм, оснащеного шліфпорошками синтетичного алмазу марки АС 15–5,0 обкладеним нікелем:

круг 1A1R 125×1,2×32 АС15–Н 400/315

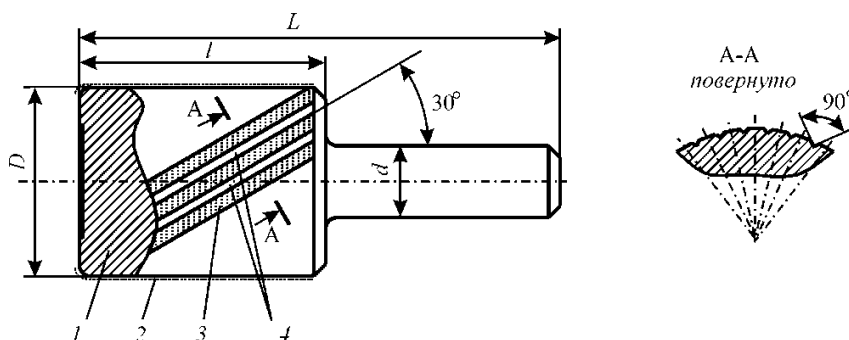
Те саме з переривчастою робочою поверхнею:

круг 1A1RSS/C2 125x1,2x32 АС15–Н 400/315.

Алмазна головка шліфувальна (рис. 4.38) складається зі сталевого незагартованого корпусу 1 діаметром  $D$  і довжиною  $L$  і алмазовмісного шару 2.

**Табл. 4.21. Основні конструктивні і геометричні параметри (в мм) одношарових алмазних кругів і їх робочої поверхні**

$D$ h11	$h$ H8	$E$ H14	Зернистість порошку алмазу				Кількість виступів $n$ , штук						
			200/160	315/250	400/315	500/400	парне	непарне					
90	12	1,0	1,58	1,82	1,99	2,21	–	47					
							–	71					
							94	–					
125	32	1,2	1,78	2,02	2,19	2,41	36	–					
							72	–					
							–	131					
160							50	–					
							84	–					
							100	–					
							–	131					
							62	–					
							124	–					
200							1,8	2,38	2,62	2,79	3,01	60	–
												120	–
												62	–
	–	209											
250	1,8	2,38	2,62	2,79	3,01	–	53						
						174	–						
320	2,2	2,72	3,07	3,24	3,47	–	67						
						–	223						



**Рис. 4.38. Алмазна головка шліфувальна**

Алмазовмісний шар закріплений на зовнішній поверхні корпусу головки на довжині  $l$ , для його виготовлення застосовують шліфувальні порошки синтетичного алмазу АС15, АС20 зернистістю 200/160...400/315.

Зовнішня робоча поверхня шліфувальних головок може бути виконана як суцільною, так і переривчастою. На рис. 4.38. показано фрагмент переривчастої робочої

поверхні шліфувальної головки. Сукупність алмазно-абразивних елементів 3 утворена гвинтовими канавками 4 лівого напрямку, виконаними під кутом  $30^\circ$  до геометричної осі інструменту. Основні геометричні параметри одношарових алмазних шліфувальних головок наведені в табл. 4.22.

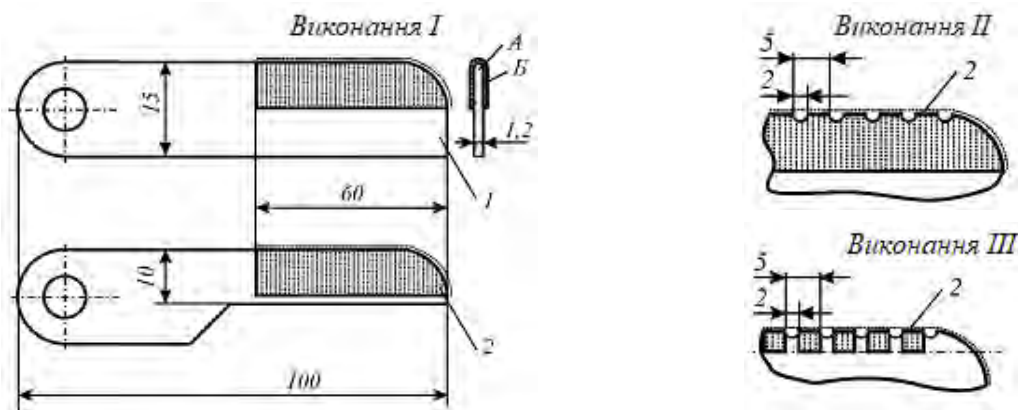
**Табл.4.22. Основні конструктивні параметри (в мм) одношарових алмазних шліфувальних головок**

$D$	$d$	$l$	$L$	Кількість гвинтових канавок $n$ , штук
6	6	40	80	8
8				11
10	8	40	80	14
12				16
16	10	40	80	22
20				27

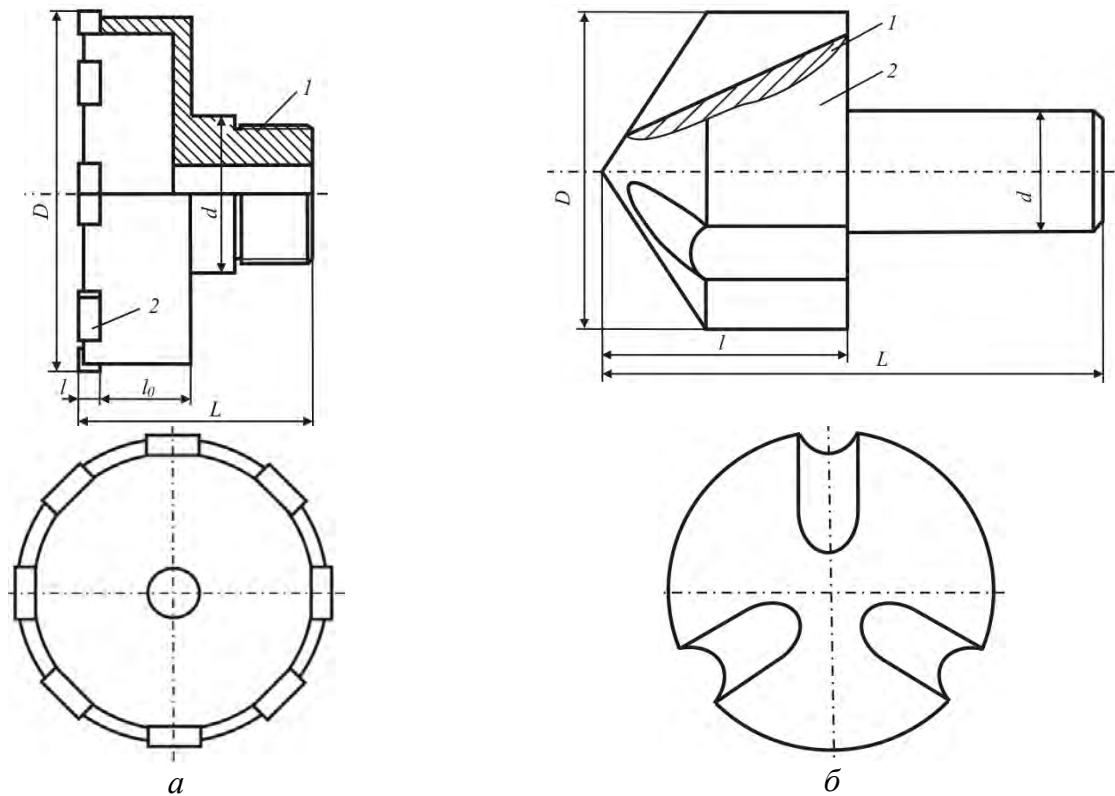
Алмазні ножовочні полотна (рис. 4.39) складаються зі сталевого корпусу  $I$  довжиною 100 мм, шириною 10 і 15 мм і товщиною 1,2 мм. На одній з торцевих поверхонь  $A$  і бічних поверхонь  $B$ , що примикають до неї, закріплений суцільний (виконання  $I$ ) і переривчастий (виконання  $II$  і  $III$ ) робочий шар 2, для виготовлення якого застосовують шліфувальні порошки алмазу АС20 зернистістю 200/160/500.

При обробленні внутрішніх отворів, свердлінні отворів в деталях з полімерних і металополімерних (МПКМ) композиційних матеріалів, з метою забезпечення можливості врізання алмазно-абразивних відрізних кругів і ножовочних полотен, отримання отворів під складальні роботи, виготовлення зразків-«свідків» матеріалів. Необхідних для визначення їх фізико-механічних характеристик, ефективно застосовувати алмазно-абразивні свердла.

Розроблено конструкції стрижневих та кільцевих алмазно-абразивних одношарових сверدل діаметром від 2 до 60 мм, призначених для свердління отворів у листових та плиткових полімерних та металополімерних композиційних матеріалів (рис. 4.40). Оптимальні режими різання: швидкість різання 5...20 м/с; позадвжняя подача 0,01...0,10 мм/об.



**Рис. 4.39. Конструкція одношарових алмазних ножовочних полотен**



**Рис. 4.40. Алмазно-абразивне кільцеве (а) та стрижневе (б) свердло**

Застосування одношарових алмазно-абразивних свердл на нікелево-гальванічній зв'язці в технології оброблення отворів у виробках з ПКМ і МПКМ дозволяє підвищити термін служби інструменту в порівнянні з базовою технологією, заснованої на застосуванні лезового швидкохідного та твердосплавного інструменту: при свердлінні отворів, скло- та ор-ганопластиках у 5...10 разів, у металополімерному композиційному матеріалі типу АЛОР (гібридний матеріал «алюміній-органопластик») в – 9...10 разів; збільшити продуктивність оброблення у 3...9 разів; поліпшити якість обробленої поверхні: звести до мінімуму дію термічної деструкції полімерної складової, припали, розшарування, ворсистість, фарбування кромки та інші дефекти на обробленій поверхні виробів, забезпечуючи шорсткість в межах  $Rz\ 20\text{...}40$ ; підвищити точність оброблення в 2,0...2,5 рази, забезпечуючи отримання отворів за точністю не нижче 10 квалітета.

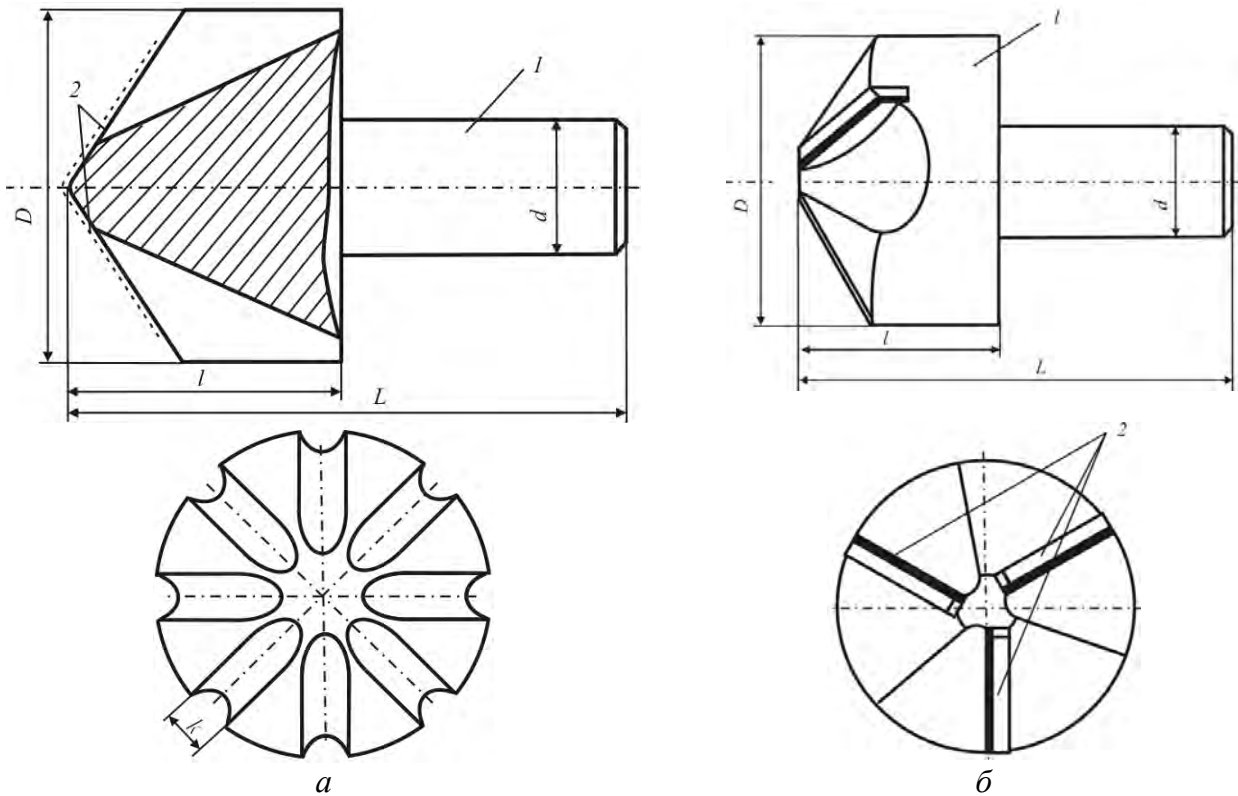
При виготовленні клепанних елементів конструкцій, що складаються з пакетів ПКМ, наприклад, вуглепластик-вуглепластик, органопластик-вуглепластик, а також гібридних змішаних пакетів, що складаються з вуглепластику та металу (сплави на основі алюмінію та титану), необхідно виконувати зенкування циліндричних або конічних заглиблень в отворах під заклепки з кутом конуса  $2\varphi = 90^\circ$  і  $120^\circ$ . Товщина листових ПКМ та МПКМ, що використовуються у з'єднаннях, не перевищує 6 мм.

Домінуюче місце в технології різання плитних і листових полімерних матеріалів займають різальні інструменти у вигляді відрізних кругів (рис. 4.42) та круглих пилок.

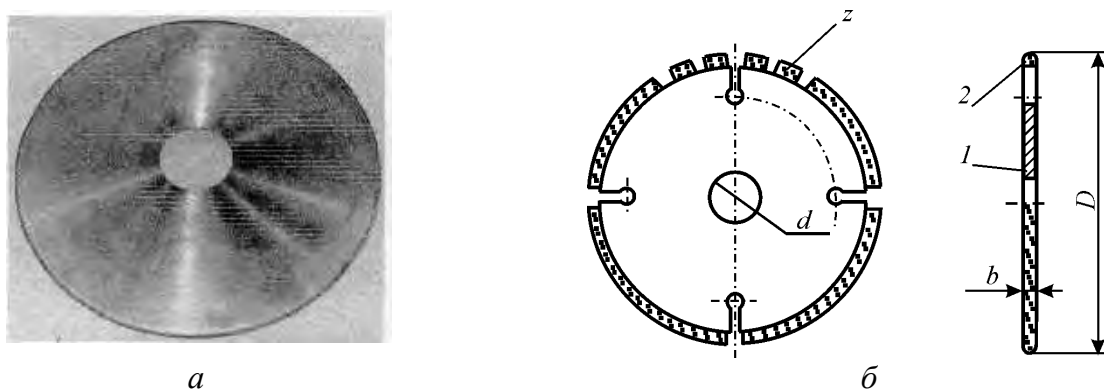
Розроблено одношарові алмазно-абразивні та лезові, оснащені пластинами АТП, зенківки, а також науково-обґрунтовані практичні рекомендації щодо їх раціональної експлуатації (рис. 4.41).

Для виготовлення різальної частини по зовнішньому колу диска і боковим його поверхням використовуються шліфпорошки синтетичного алмазу марок АС15...АС32 зернистістю 315/250...630/500 на металевій (нікелегальванічній) зв'язці, що облягається

способом гальваностеги. Різальна частина може бути виконана у двох варіантах: суцільний та переривчастий. Алмазні відрізни круги з суцільною різальною частиною виготовляються діаметром до 250 мм і застосовуються, головним чином, на переносних електро- та пневмомашинках для оброблення шаруватих пластиків товщиною до 10 мм і ручною подачею  $\leq 6$  м/хв.



**Рис. 4.41.** Алмазно-абразивна конічна зенківка (а), конічна зенківка, оснащена пластинами АТП (б): 1 – корпус зенківки; 2 – алмазоутримуюча частина



**Рис. 4.42.** Алмазний відрізний круг із суцільною різальною частиною (а) і з переривистою різальною частиною: 1 – корпус диска; 2 – алмазоносний шар

Застосування алмазних відрізних кругів з переривчастою різальною частиною дозволяє знизити до 30-40% теплонапруженість у зоні різання та підвищити їх стійкість у роботі. Периферійна зона диска алмазного відрізного круга з переривчастою робочою частиною складається з алмазовмісних виступів довжиною  $l$  і западин з кроком  $t$ ,

величина яких залежить від товщини диска  $b$  і знаходиться в межах  $t = (4...8)b$ , при цьому  $l/t = 0,6 ... 0,8$ , а висота виступу  $h = (0,3 ... 0,4) t$  (табл. 4.23).

**Табл.4.23. Основні розміри (в мм) алмазних відрізних кругів**

Зовнішній діаметр $D$ $h14$	Діаметр посадкового отвору $d$ $H3$	Товщина $b$ $h14$	Кількість виступів $z$
160	32	1,2; 1,4	36
200	32	1,2; 1,4; 1,6	48
250	32	1,4; 1,6; 1,8	60
315	50,8	1,8; 2,0; 2,2	76
355	50,8	2,0; 2,2; 2,5	86
400	50,8	2,2; 2,5; 2,8	96

В дисках таких відрізних кругів вирізані радіальні прорізи довжиною 25...30 мм і шириною 2...3 мм, які виконують роль температурних компенсаторів.

#### 4.4.2. Інструменти для фінішного оброблення виробів зі скла

Залежно від конструкції алмазні інструменти для оброблення скла розподіляються на групи: відрізні круги; – свердла; – шліфувальні круги і головки; – гнучкі та еластичні інструменти.

Корпуси алмазних шліфувальних кругів виготовляють зі сталі марок Ст3, 20, 25, 30 або алюмінієвого сплаву марок АК6, АК7, АК5М2, Д16. Корпуси відрізних кругів виготовляють із листової холоднокатаної сталі, сталі 9ХФ або 50Г, 60Г, 65Г. При виготовленні сегментів відрізів сегменти паяють на корпус припоєм ПСр 45.

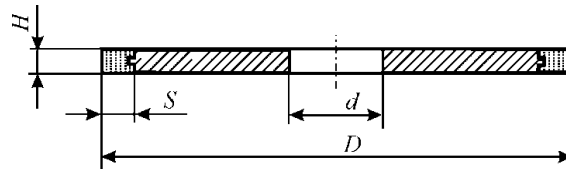
Характеристика алмазоносного шару інструменту визначається маркою, зернистістю та концентрацією алмазних порошків, а також зв'язкою. Для виготовлення алмазного інструменту, що застосовується для оброблення скла, зазвичай застосовують шліфпорошки з синтетичних алмазів АС4, АС6 та АС15, а також мікропорошки АСМ та АСН. Зернистість алмазних порошків, що використовуються в інструменті, визначається операцією оброблення. Оброблення деталей зі скла доцільно здійснювати в два і більше переходів (операції чорнового і чистового шліфування; декоративного полірування; при обробленні оптичного скла – операції грубого шліфування, тонкого алмазного шліфування, супертонкого алмазного шліфування).

Зернистість алмазного порошку в робочому шарі інструменту встановлюється залежно від вимог до шорсткості оброблених поверхонь. Концентрація алмазів в інструменті становить 25...100% – для грубих операцій, 5...25% – для шліфування.

Інструменти для оброблення скла випускають на металевих, органічних, керамічних і еластичних (каучуковмісних) зв'язках. Найбільш широке поширення в інструментах для оброблення скла знайшли металеві зв'язки М2-01, М1-04, М3-01, органічні – В2-01, В1-02, В3-01 і керамічні – К2-01, К3-01.

Алмазні круги виконують у вигляді 17 основних типових форм більше 200 різних типорозмірів. Основні форми кругів: – алмазні відрізні круги із зовнішньою різальною кромкою форми 1А1R (рис.4.43); – алмазні відрізні сегментні круги форми 1А1RSS; – алмазні відрізні круги з внутрішньою різальною кромкою форми АКВР; – свердла алмазні кругів'цеві АКС; – круги плоскі прямого профілю форми 1А1; – плоскі круги

прямого профілю без корпусу форми А8; – круги плоскі прямого профілю тристоронні форми 14U1; – круги плоскі з двостороннім конічним профілем форми 14EE1; – круги плоскі з напівкругло-опуклим профілем форми 1FF1; – плоскі круги з виточкою форми 6A2; – круги плоскі форми 6A2Т; – круги алмазні кругівьцеві форми 2A2; – круги чашкові конічні форми 12A2 з кутом 45°; – круги плоскі з напів-кругло-увігнутим профілем форми 2F6V та 2FF6V; – алмазні еластичні диски форми ДО; – алмазні еластичні круги для оброблення екранів кінескопів форми АЕТ; – алмазні збірні таблеткові інструменти для оброблення оптичних деталей.



**Рис. 4.43. Алмазний круг із зовнішньою різальною кромкою форми 1A1R:**  
 $H$  – ширина,  $S$  – товщина алмазного шару,  $D$  – зовнішній діаметр,  $d$  – діаметр посадкового отвору

При виготовленні деталей різного призначення та конструктивного виконання (автомобільне скло, дзеркальне скло, скляні труби, хімічний посуд, блоки оптичного скла та оптичні деталі тощо) значне місце займає операція різання, яка може виконуватися як вручну за допомогою алмазного склоріза, так і на спеціальних відрізних верстатах за допомогою алмазних відрізних кругів (рис. 4.22).

Різання напівфабрикатів, а також різання шматкового скла та оброблення шматків різанням, здійснюються за допомогою відрізних кругів діаметром від 50 до 500 мм з прямокутним та трапецеїдальним профілями робочої поверхні. Товщина різальної частини відрізних кругів залежно від діаметра та виду профілю становить 0,15...2,44 мм. Характеристики алмазоносного шару кругів (синтетичні алмази АС6, АС15, АС32, АС50, зернистість – 100/80...160/125, 400/315 та 500/400, відносна концентрація – 25...100-0,3 вибираються в залежності від виду матеріалу, що розрізається, його розмірів і вимог до якості поверхні пропилю.

Для отримання отворів в деталях зі скла та вирізування круглих заготовок із пластин застосовують алмазні свердла діаметром від 0,5 до 450 мм. Використовуються кристалні (кристал алмазу, запаяний в корпус), стрижневі (циліндричний алмазоносний шар, закріплений на хвостовику), трубчасті (алмазна кільцева коронка на циліндричному корпусі) і сегментні кільцеві алмазні свердла. Найбільшого поширення при свердленні скла отримали трубчасті алмазні свердла.

Для виготовлення стрижневих сверدل використовують алмазні порошки марки АСН зернистістю 28/20...60/40 (метод гальваностегії) і марок АС15...АС32 зернистістю від 50/40...100/80 (метод порошкової металургії). Для виготовлення кільцевих коронок застосовують алмазні порошки АС6...АС32 із відносною концентрацією алмазів 75 %. Сегменти для свердл великого діаметру виготовляють на зв'язці М2-01 з алмазів АС32 зернистістю 400/315 при відносній концентрації також 75 %.

При виборі конструкції робочого шару інструменту забезпечується сталість його форми в процесі експлуатації і виключається операція її коригування.

Інструмент для фінішного оброблення плоских поверхонь виробів із каменю характеризується однаковою інтенсивністю зношування периферійної та центральної частини робочого шару. Коефіцієнт заповнення інструменту робочим шаром по круговим

зонам радіуса  $r$  описується зростаючою кривою. При виконанні робочого шару у вигляді окремих елементів, зафіксованих в полімерній масі, додатково забезпечується поліпшення технології виготовлення інструменту і захист елементів від сколювання в процесі оброблення. Робочі елементи (шліфувальні та полірувальні таблетки) виготовляються з алмазних і полірувальних порошоків і зв'язуючого поліетилентерефталату (ПЕТФ).

Використання такого зв'язуючого робить можливим значне зменшення кількості абразиву в масі, за рахунок чого зменшується ймовірність утворення конгломератів абразивних зерен, через які виникають окремі глибокі подряпини на оброблюваній поверхні в процесі оброблення. Внаслідок цього досягається висока якість оброблених поверхонь.

Поліетилентерефталат добре змочує абразивні зерна, у тому числі алмазні мікропорошки, що визначає високу міцність маси (границя міцності на згин не менше 100 МПа). Це, у свою чергу, дозволяє значно інтенсифікувати процес оброблення за рахунок підвищення тиску притиску інструменту до оброблюваної деталі (до 0,5 МПа). Як матеріал корпусу інструменту – полімерної маси для операції шліфування доцільно використовувати поліетилен високого тиску марки ВД 15803-020, а для операції полірування – кабельний пластикат І 40-13А.

Робочий шар у вигляді окремих елементів, зафіксованих у полімерній масі, має вигляд вигнутих лопатей, ширина яких зростає від центральних зон до периферії. При використанні інструменту з такою конструкцією робочого шару для шліфування та полірування плоских поверхонь виробів з природного та штучного каменю

З наведених у таблиці даних випливає, що для виготовлення полірувального інструменту найбільш доцільно використовувати порошки оксиду алюмінію, ультрадисперсного алмазу (УДА) і порошки на основі діоксиду церію в залежності від виду оброблюваного каменю.

#### 4.4.3 Інструменти для оброблення природного та штучного каменю

Головним завданням під час алмазного шліфування та полірування виробів із природного та штучного каменю є досягнення високої якості оброблених поверхонь, що залежить від умов контакту поверхонь робочого шару інструменту та оброблюваної деталі.

У процесі оброблення робочий шар інструменту, як правило, зношується нерівномірно, його форма змінюється, що призводить до погіршення точності формоутворення оброблюваної поверхні і зниження якості її оброблення. У зв'язку з цим забезпечення рівномірності зносу робочого шару інструменту є актуальним завданням, яке може бути вирішене двома шляхами. Перший із них пов'язаний із використанням оптимальної конструкції робочого шару інструменту для конкретної схеми оброблення, а другий – із використанням оптимальних режимних і кінематичних параметрів налаштування обладнання для конкретних конструкцій робочого шару інструменту.

Під час оброблення виробів з каменю довільних розмірів і форми, залежно від режимів і кінематичної схеми оброблення, забезпечення сталості форми робочої поверхні інструменту може бути досягнуто завдяки конструкції робочого шару, виконаної згідно з розрахунковими значеннями коефіцієнта заповнення:

$$k_i(y) = \frac{\text{const} \cdot Z(y)}{V_N(y)},$$

де  $Z(y)$  – рівняння твірної профілю оброблюваної поверхні,  $V_N(y)$  – рівняння зносу робочого шару інструменту за його постійної форми.

Інструмент для фінішного оброблення плоских поверхонь виробів з каменю характеризується однаковою інтенсивністю зносу периферійної та центральної частини робочого шару. Коефіцієнт заповнення інструмента робочим шаром за круговими зонами радіуса  $r$  описується зростаючою кривою. При виконанні робочого шару у вигляді окремих елементів, зафіксованих у полімерній масі, додатково забезпечується поліпшення технології виготовлення інструменту і захист елементів від сколювання в процесі оброблення. Робочі елементи інструментів виготовляються з алмазних і полірувальних порошоків і сполучного поліетилентерефталату.

Зносостійкість і міцність робочого шару такого інструменту менші, ніж у інструменту на металевих зв'язках. Для усунення цього недоліку використовується армована абразивна маса. За рахунок додавання в розплав зв'язуючого абразивної маси базальтових волокон, останні утворюють сітку, що є армувальним елементом, наявність якого зумовлює збільшення міцності інструменту і, як наслідок, можливість підвищення тиску притискання інструменту до оброблюваної деталі.

У робочих елементах для оброблення виробів з каменю як зв'язуюче використовуються полімерні матеріали, як абразивні порошки – алмазні шліф- і мікропорошки, як полірувальні порошки – порошки оксидів металів. Виготовляються інструменти діаметром 160, 250 і 320 мм. У робочих елементах діаметром 10 мм і 16 мм використовуються порошки алмазу з розміром зерен 80/63, 40/28, 20/14, 10/7, 7/5 і полірувальні порошки.

Для полірування каменю можуть використовуватися порошки ультрадисперсного алмазу.

### Контрольні запитання

1. Абразивні інструменти з надтвердими матеріалами.
2. Металеві зв'язки для абразивного інструменту.
3. Гальваричні зв'язки для абразивного інструменту.
4. Керамічні зв'язки для абразивного інструменту.
5. Органічні зв'язки для абразивного інструменту.
6. Гібридні зв'язки для абразивного інструменту.
7. Самоадаптивні композити для абразивних інструментів.
8. Інструменти із впорядкованим розположенням частинок надтвердих матеріалів.
9. Методи спікання абразивних інструментів.
10. Конструктивні виконання абразивних інструментів.
11. Алмазні правлячі інструменти.
12. Інструменти для фінішного оброблення.
13. Доводочні пасти і суспензії.
14. Інструменти на основі стрічок.
15. Еластичні оздоблювальні інструменти.
16. Інструменти для комбінованого оброблення.
17. Інструменти для оброблення зубчастих коліс.
18. Інструменти для оброблення неметалевих матеріалів.

## РОЗДІЛ 5 ІНСТРУМЕНТИ З ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ НТМ

### 5.1. Загальні уявлення

Відповідно до прийнятих уявлень під лезовим інструментом розуміється різальний інструмент із заданим числом лез встановленої форми [7]. Види лезових інструментів наведено у табл. 5.1.

**Табл. 5.1. Види лезвих інструментів**

Інструмент	Загальна характеристика
Різець	Однолезовий інструмент для оброблення з поступальним або обертальним головним рухом (рухом різання) та можливістю руху подачі в будь-якому напрямку
Фреза	Лезовий інструмент для оброблення з обертальним головним рухом без можливості зміни радіуса траєкторії цього руху на принаймі з одним рухом подачі, напрямком якого не збігається з віссю обертання
Осьовий різальний інструмент	Лезовий інструмент для оброблення з обертальним головним рухом різання та рухом подачі вздовж осі головного руху різання
Свердло	Осьовий різальний інструмент для утворення отворів у суцільному матеріалі та (або) збільшення діаметра наявного отвору
Зенкер	Осьовий різальний інструмент для підвищення точності форми отвору та збільшення його діаметра
Разготка	Осьовий різальний інструмент для підвищення точності форми та розмірів отвору та зниження шорсткості поверхні
Зенковка	Осьовий багатолезовий різальний інструмент для оброблення конічної вхідної ділянки отвору
Цековка	Осьовий багатолезовий різальний інструмент для оброблення циліндричної та (або) торцевої ділянки отвору заготовки.
Мітчик	Осьовий багатолезовий різальний інструмент для утворення та оброблення внутрішнього різьблення
Плашка (лерка)	Осьовий багатолезовий різальний інструмент для утворення та оброблення зовнішнього різьблення
Протяжка	Багатолезовий різальний інструмент з рядом послідовно виступаючих один над одним лез у напрямку, перпендикулярному до напрямку швидкості головного руху, призначений для оброблення при поступальному або обертальному головному русі та відсутності руху подачі

Працездатність та надійність різальних інструментів залежать від стабільності та фізико-механічних властивостей матеріалів їх робочих елементів – моно- та полікристалічних надтвердих матеріалів, конструктивних форм, способу кріплення в корпусі інструменту.

Використовуються різці з монокристалів алмазу, полікристалів з алмазних порошоків (ПСА) і CBN (PCBN), спечених при високих тисках, з металокерамічних твердих сплавів і мінералокераміки з покриттям у вигляді тонких алмазних або алмазоподібних плівок. Конструкція інструменту у кожному даному випадку визначається вимогами, що пред'являються до його експлуатації.

Лезові інструменти з НТМ діляться за типом закріплення різального елемента на дві основні групи – збірні (з механічним кріпленням безпосередньо в державці інструменту, а також з механічним або нероз'ємним кріпленням в різальній вставці, що закріплюється в державці інструменту) і цілісні (з нероз'ємним кріпленням різальних елементів з НТМ безпосередньо в державці інструмента) (рис. 5.1)..

Інструменти з механічним кріпленням пластин і змінних вставок з ПНТМ і різальних елементів з монокристалів алмазу мають ряд переваг у порівнянні з інструментами другої групи. До них відносяться: можливість швидкої зміни зношеної різальної кромки, багаторазове використання корпусу інструменту, підвищена надійність кріплення різальних елементів інструменту. До інструментів із НТМ другої групи пред'являються менш жорсткі вимоги до виготовлення посадкових місць під заготовки полікристалів. Крім того, при такому закріпленні можна виготовити інструмент, габаритні розміри якого менші в порівнянні з розмірами інструментів першої групи.

Вибір типу закріплення полікристалу в корпусі інструменту проводиться з урахуванням конкретних умов його експлуатації.

До механічних методів кріплення робочих елементів із НТМ пластин відносяться кріплення безпосередньо в державці, зачеканка полікристалів у державці, запресування в отвір державки або порошкову композицію. Два останні методи не набули досить широкого поширення внаслідок труднощів, що виникають при переточенні різальних елементів.

З високотемпературних методів кріплення різальних елементів із НТМ широкого поширення набув метод порошкової металургії, який використовується для закріплення полікристалів у вставках, що в свою чергу механічно закріплюються в корпусах різців, фрез та інших інструментів.

Для з'єднання ПНТМ з металами використовують спеціальні адгезійно-активні припої. До їх складу входять метали з високою спорідненістю до вуглецю та cBN (Cr, Ti, Nb, Zr). Зазвичай цими металами легують (до 5...10%) менш тугоплавкі і пластичні сплави на основі Cu, Ag, Zn, бронзи. Малих добавок адгезійно-активних металів до таких розплавів достатньо збільшення ступеня змочування алмазу.

Припої, що застосовуються для паяння НТМ, умовно поділяють на дві групи.

До *першої групи* відносяться припої, до складу яких входять компоненти, що хімічно не взаємодіють з НТМ і не утворюють адгезійних зв'язків з поверхнями алмазу і cBN (сплави на основі міді, алюмінію, цинку тощо). У цьому випадку для реалізації адгезійної взаємодії використовують металеве напилення, тонка плівка якого сприяє утворенню міцного з'єднання з припоєм.

До *другої групи* відносять припої, що мають хімічну спорідненість до вуглецю і cBN і утворюють з ними міцні адгезійні зв'язки. Найчастіше використовують Ti, Cr, Zr. Паяння адгезійно-активними припоями проводиться в вакуумі  $(1...5) \cdot 10^{-3}$  Па.

Паяння неметалізованих ПНТМ срібним (ПСр 40, ПСр 45) або безсрібним припоєм з температурою плавлення 600...700 °С проводиться у вакуумних печах або на установках ТВЧ. Паяння у відкритий паз державки проводять після металізації полікристалів.

До переваг паяння відносяться простота конструкції інструменту і можливість отримання різців малих розмірів, до недоліків – нагрівання полікристалів до високої

температури і виникнення в них при охолодженні внутрішніх термічних залишкових напружень, що знижують стійкість інструменту.



**Рис. 5.1. Методи кріплення різальних елементів з ПНТМ**

Недостатньо висока теплостійкість ПНТМ, особливо з алмазних порошоків, визначає необхідність створення методів закріплення полікристалів, при яких температура на межі полікристал-державка не перевищує 750 °С.

Таким вимогам відповідають способи закріплення елементів із НТМ у державці приклеюванням термостійкими клеями підвищеної міцності або припіканням під деяким тиском з використанням композицій на основі низькоплавких металів, що самотвердіють, а також спеціальних клеїв. Так, для склеювання ПНТМ і державки застосовують високотемпературні клеї теплостійкістю до 1000...1200 °С на основі кремнійорганічних сполук.

Універсальна технологія виготовлення інструменту з полікристалів алмазу та кубічного нітриду бору відсутня, тому її вибір проводиться залежно від конструкції та умов роботи інструменту.

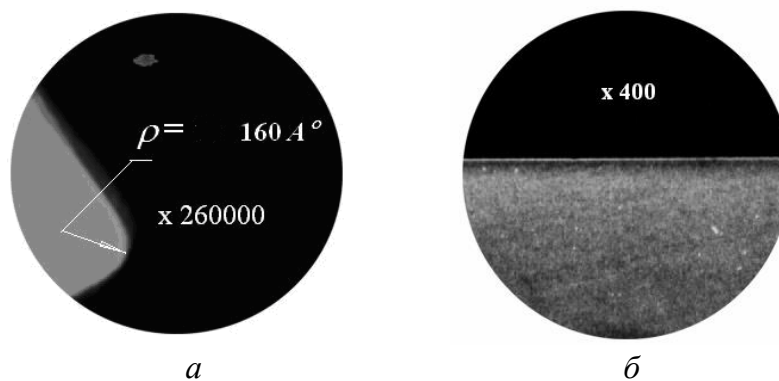
## 5.2. Лезові інструменти із НТМ

### 5.2.1. Різці з монокристалів алмазу

Точне фінішне оброблення виробів з кольорових металів і неметалевих матеріалів виконується інструментами з монокристалів алмазу, в основному природного, розміром 0,8...2,0 карат, які заточені з радіусом округлення різальної кромки 10...300 Å.

До якості заточування такого інструменту пред'являються надзвичайно високі вимоги як за величиною радіуса округлення різальної кромки, так і досконалості самої кромки (рис. 5.2):

- шорсткість поверхонь різця, що беруть участь у процесі знімання стружки і контактують з оброблюваною поверхнею, повинна становити  $R_{max} < 1$  мкм;
- оптимальна геометрія і форма різальної частини інструменту, що забезпечує процеси відділення стружки мікронної товщини і вигладжування обробленої поверхні.



**Рис. 5.2. Різальна кромка інструмента: поперечний переріз (а); вид якісної кромки (б)**

Найбільш повно зазначеним вимогам задовольняють різці, оснащені природними монокристалічними алмазами, які при обробленні алюмінієвих сплавів, міді, монокристалічного кремнію, германію та подібних матеріалів дозволяють отримувати поверхню, що характеризується такими показниками:  $R_a \sim 10$  нм;  $R_q \sim 0,1$  мкм; коефіцієнт дзеркального відображення – до 96%.

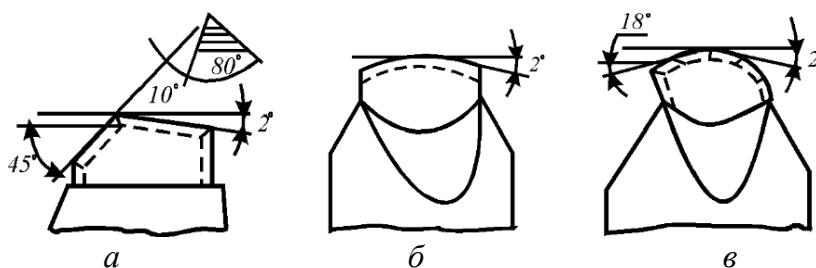
Доведення різців з природного алмазу виконують на чавунному притирі, шаржированном алмазним порошком АСМ зернистістю 10/7-7/5.

Однією з основних умов, що сприяють забезпеченню працездатності різального інструменту з монокристалічним алмазом, є облік кристалографічних особливостей

кристалів. Зазвичай різці, виготовлені з кристалів алмазу з октаедричною формою і напрямом доведення по передній поверхні перпендикулярно різальній кромці, мають знижену стійкість. Для підвищення стійкості алмазних різців доцільно різальну кромку різця в кристалі розташовувати таким чином, щоб при експлуатації напрям стружки, що сходиться, і дія сил різання збігалася з напрямом найбільшої твердості кристала. Кут між різальною кромкою і «м'яким» напрямком або напрямком доведення алмазного різця доцільно приймати ближче до величини, що дорівнює  $90^\circ$ .

Економічно доцільно застосовувати алмазні різці з кутом доведення по передній грані  $20^\circ$ . Напрямок оброблення кристала має йти назустріч різальній кромці, щоб забезпечити відсутність на ній сколів.

Форми лез інструмента з монокристалічного алмазу представлені на рис. 5.3.



**Рис. 5.3. Форми лезвійого інструменту з природного алмазу:**  
*a* – прямолінійна; *б* – радіусна; *в* – фасеточна

### 5.2.2. Різальні пластини та вставки з ПНТМ

Основним напрямом удосконалення конструкцій лезового інструменту з ПНТМ є використання змінних не переточуваних багатогранних пластин.

Заготовки пластин з ПНТМ випускають у двох виконаннях: цілісні (без підкладки) та двошарові (з підкладкою, як правило, твердосплавною).

З них випускають круглі та багатогранні різальні пластини. Якщо конструкція інструмента з механічним кріпленням пластин технічно неможлива, то застосовують паяний інструмент з ПНТМ, оснащений змінними вставками, або цільний.

Наявність підкладки дозволяє підвищити міцність робочих елементів, зменшити товщину шару ПНТМ, здійснювати паяння пластини безпосередньо до корпусу різального інструменту.

На рис. 5.4 показано систему умовних позначень різальних пластин з ПНТМ, розроблену на основі стандарту ISO 1832–2014. При позначенні різальної пластини з ПНТМ вказують: форму, задній кут, клас точності пластини, тип пластини, довжину різальної кромки  $L$ , товщину пластини  $S$  і радіус  $R$  при вершині пластини, а також виконання пластини та марку ПНТМ.

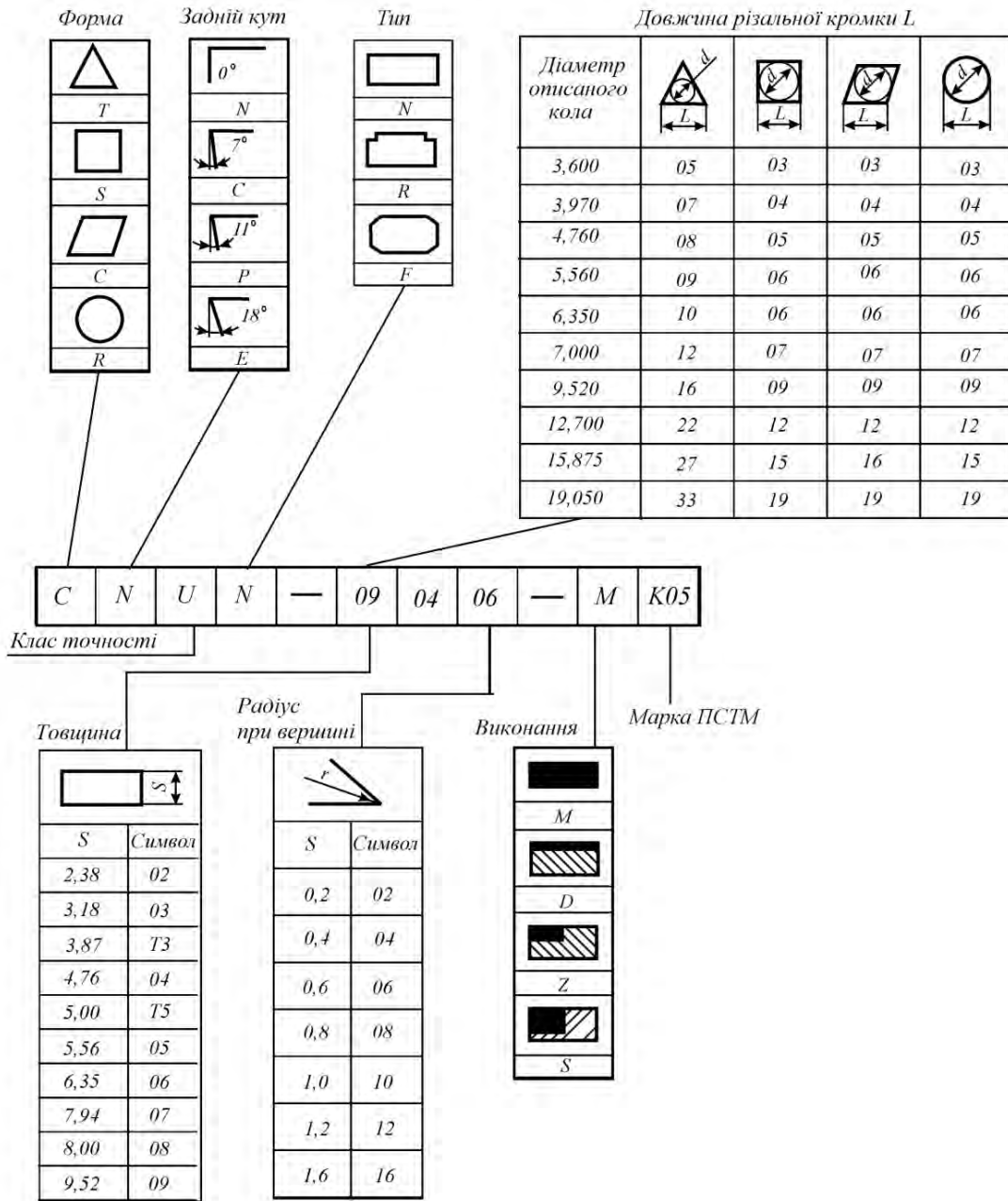
Розрізняють чотири виконання різальних пластин: цілісні ( $M$ ), двошарові ( $D$ ), складові з монолітним ( $Z$ ) та двошаровим ( $S$ ) полікристалами.

Змінні вставки, оснащені різальними елементами із НТМ, призначені для закріплення в корпусах збірного лезового інструменту, борштангах.

Деякі конструкції вставок показано на рис. 5.5.

Циліндричні вставки призначені для прохідних, спеціальних, фаскових, різбових різців та торцевих фрез. Прямокутні вставки випускаються для кріплення в борштангах і оправках для верстатів. Виготовляються також прохідні вставки з різбовим отвором,

плоскі вставки з отвором, вставки-ножі, вставки-різці до комбінованого розточувального інструменту, що працює в умовах гнучкого автоматизованого виробництва.



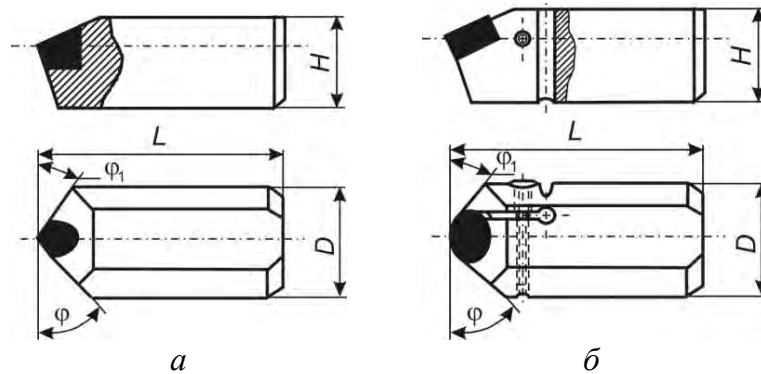
**Рис. 5.4. Система умовних позначень пластин з ПНТМ**

До особливої групи змінних вставок, оснащених ПНТМ, належать ножі (рис.5.6). Розрізняють ножі для оснащення кінцевих фрез і прохідних різців, комбінованих інструментів типу «свердло-свердло», «свердло-зенкер» тощо.

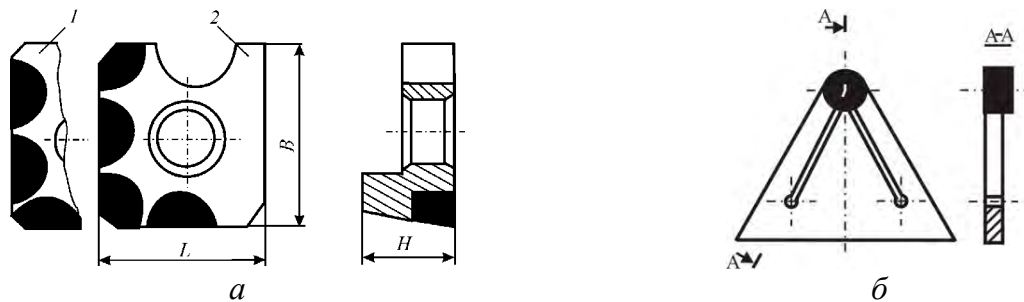
### 5.2.3. Різці з різальними елементами із ПНТМ

Найбільш поширеним видом різального інструменту, оснащеного НТМ, є різці. Вони використовуються для зовнішнього точіння, розточування і різних спеціальних

операцій (прорізання канавок, різьбонарізання тощо). На рис. 5.7 показано схему умовних позначень токарних різців, розроблену на основі стандарту ISO 5608 – 2014.



**Рис. 5.5. Циліндричні змінні вставки, оснащенні ПНТМ:** паяна (а); з механічним кріпленням різального елемента (б)  $\phi$  і  $\phi_1$  – головний і допоміжний кути в плані



**5.6. Ножі, оснащенні ПНТМ:** паянні багатокристалльні (а); з механічним кріпленням різального елемента (б)

Цілісні різці випускають з механічним кріпленням змінних вставок та різальних пластин з ПНТМ. За кількістю полікристалів, що утворюють різальну кромку, різці ділять на однокристалльні та багатокристалльні.

Напайні різці з ПНТМ (рис. 5.8) можна розділити на групи за наступними ознаками:

- за типом державки – прямі та відігнуті, прямокутного та круглого перетину;
- за призначенням – прохідні, прохідні завзяті, підрізні, розточувальні, галтельні, канавкові, для різання та скрайбування.

Різці з механічним кріпленням змінних вставок з ПНТМ (рис. 5.9) діляться на різці з кріпленням вставок прихватом зверху (спосіб С) і по бічній поверхні (спосіб D).

Змінна вставка з ПНТМ 2 встановлюється в державці 1 і кріпиться прихватом 3 або за допомогою гвинта 4. Прихват 3 контактує безпосередньо з державкою або через проміжну опору. Встановлення вільоту вставки може здійснюватися регулювальним гвинтом 5. Змінні вставки 2 можуть кріпитися також за допомогою цангового затиску, що закріплюється в корпусі різця.

До цієї групи інструментів з різальними елементами з ПНТМ належать різці системи «Cut-Grip», розробленої ізраїльської фірмою «ISCAR». Різальний елемент припаяний до вставки з твердого сплаву (рис. 5.10) [11], яка жорстко базується та кріпиться у державці інструменту за рахунок призматичних канавок на верхній та нижній поверхнях.

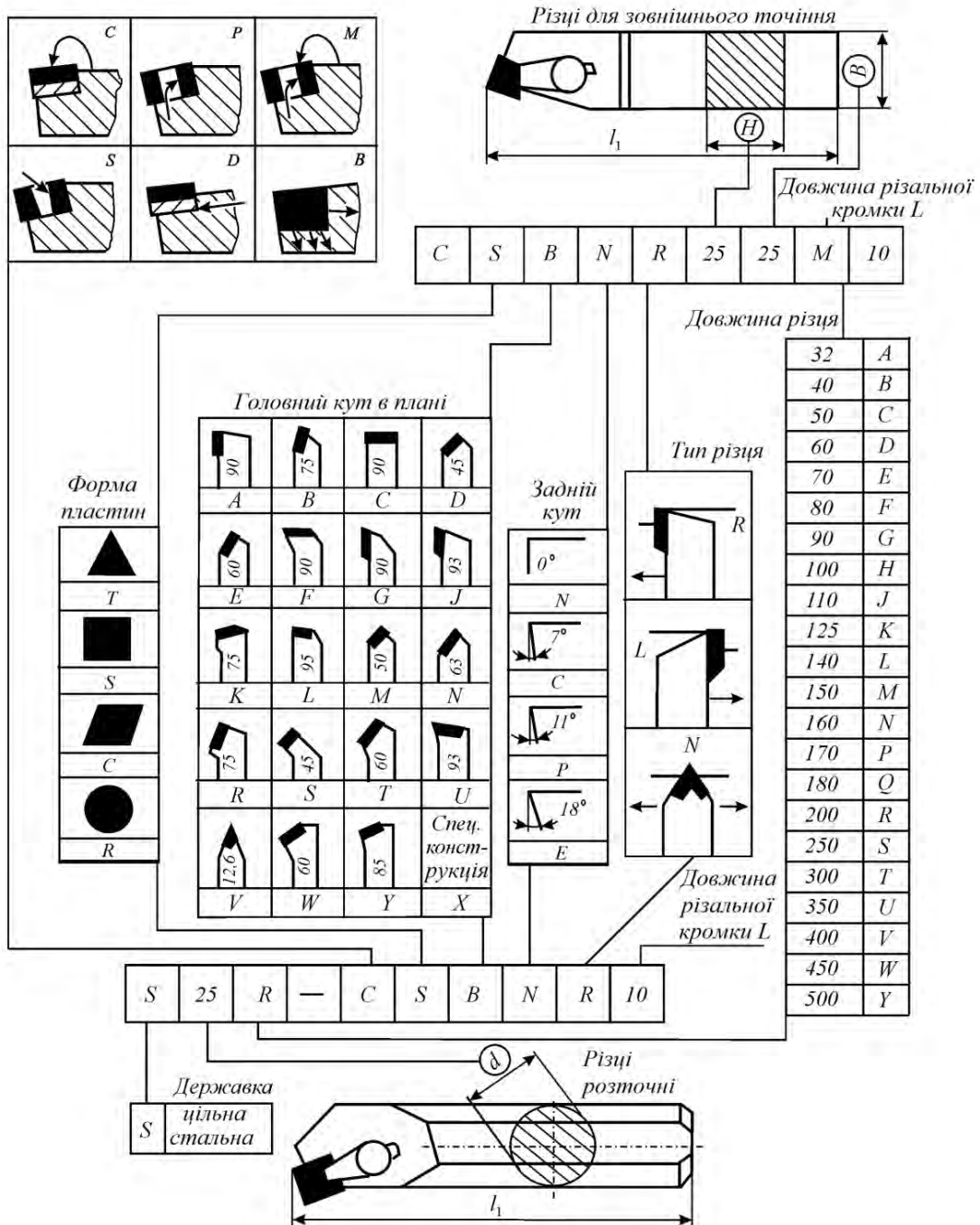


Рис. 5.7. Система умовних позначень різців з ПНТМ

Основним принципом роботи такого інструменту є деформація робочої частини інструменту, яка призводить до появи фронтального зазору під кутом  $\phi_1$  між різальною пластинкою та заготовкою. Один і той же інструмент дозволяє обробляти на деталях вісім різних поверхонь. Крім того, такий інструмент, завдяки тому, що різальний елемент відкритий практично на  $120^\circ$ , успішно використовується при обробленні складних фасонних поверхонь.

Різці з механічним кріпленням пластин із ПНТМ досить широко представлені в номенклатурі інструментальної промисловості. Найбільш поширеними є різці із кріпленням пластин прихватом зверху.

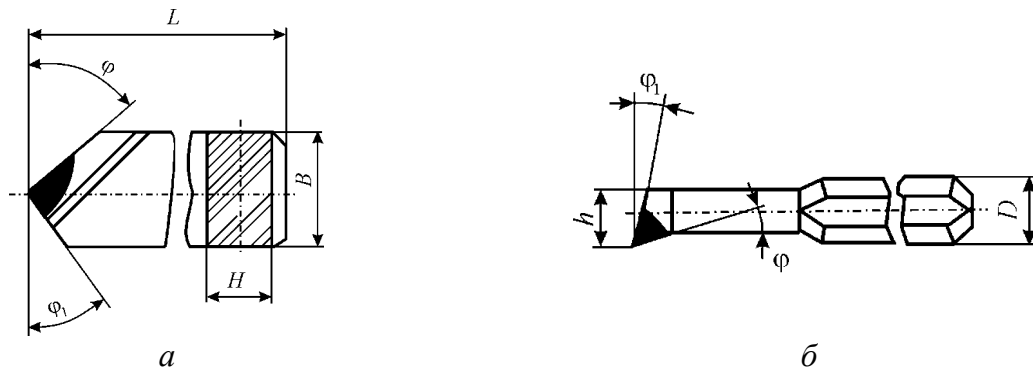


Рис. 5.8. Прямі (а) і розточні (б) напайні різці, оснащені різальними елементами з НТМ:  $\varphi$  і  $\varphi_1$  – кути в плані, відповідно головний і допоміжний

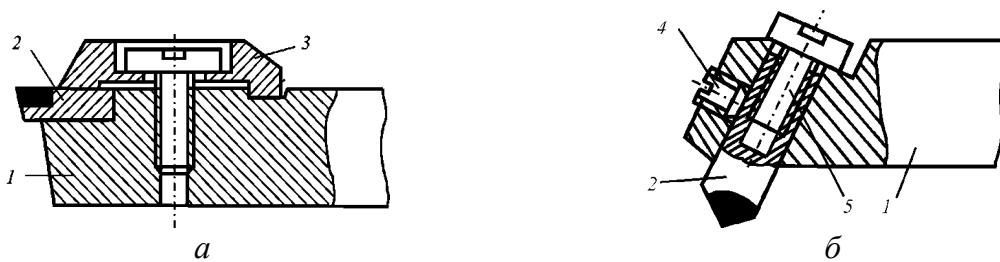


Рис. 5.9. Різці з механічним кріпленням вставок з НТМ прихватом зверху (а) і по бокових поверхнях (б)

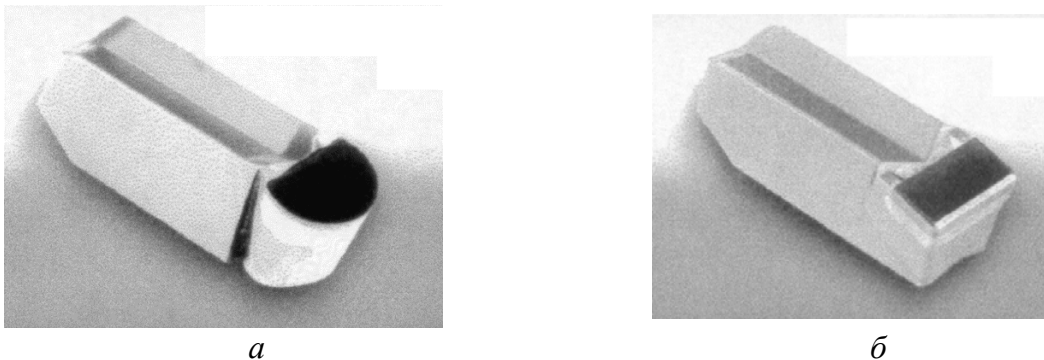


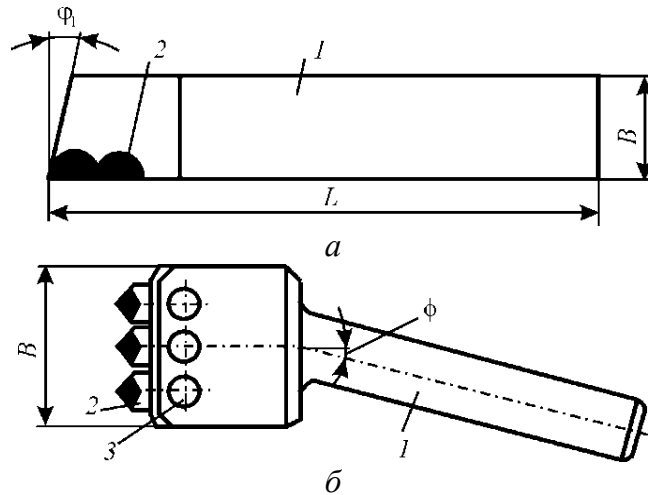
Рис. 5.10. Паянні вставки з ПНТМ з круглим (а) і прямокутними різальними елементами (б) для різців системи «Cut-Grip»

Ряд конструкцій розрізняються схемою закріплення і базування пластини : клиновий прихват, пружний прихват з бічними пазами для установки пластин, Г-подібний прихват з циліндричною напрямною частиною і установкою пластини в напівзакритий паз державки, циліндричний прихват з пружним гвинтом і установкою пластини в напівзакритий паз, прихват з рифленнями для кріплення кінцевих різальних елементів з НТМ у відкритий паз, прихват-планка з опорою у відкритий паз і встановленням пластини на сферичну опору, безпосередньо в державку.

На рис. 5.11 показані багатокристалічні різці з ПНТМ. Багатокристалічні різці складаються з корпусу 1, різальних елементів 2, кріпильних гвинтів або прихвату 3.

Випускаються токарні, прохідні різці з механічним кріпленням круглих пластин з ПНТМ для оброблення прокатних валків з глибиною різання 6-8 мм. В окремих

випадках, коли потрібно посилене закріплення різальної пластини у зв'язку зі значними глибинами різання і подачами використовують кілька прихватів.



**Рис. 5.11.** Багатокристалічні різці з різальними елементами з НТМ: напайний (а); з механічним кріпленням (б);  $\varphi_1$  – допоміжний кут у плані;  $\varphi$  – кут нахилу державки різця щодо його головки

Фрези є другим за застосовністю типом інструменту після різців з полікристалічними різальними елементами. Розрізняють торцеві (найпоширеніший вид), кінцеві, дискові та черв'ячні фрези.

#### 5.2.4. Фрези з різальними елементами із ПНТМ

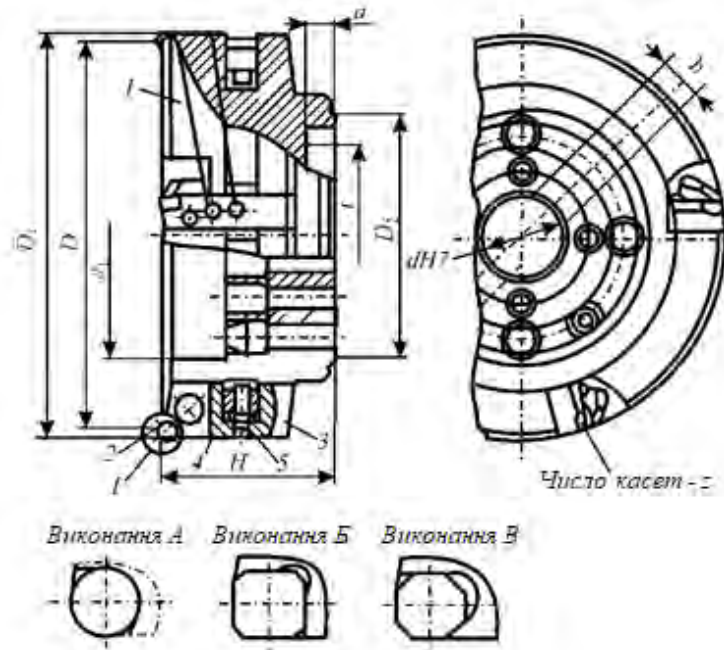
Торцеві фрези випускають з механічним кріпленням вставок, круглих і багатограних різальних пластин; «прямі» та «зворотні»; насадні та хвостові; однозубі та багатозубі; однорядні, ступінчасті та багаторядні; фрези для оброблення відкритих, напівзакритих та закритих поверхонь.

Найбільш поширені торцеві збірні регульовані фрези (рис. 5.12) з пластинами з ПНТМ або зі вставками, оснащеними НТМ. Фреза складається з корпусу 1 і різальних пластин або вставок 2, механічно закріплених в касетах 3. Останні, у свою чергу, складаються з корпусу 4 і кріпильного механізму 5. Касети кріплять в корпусі фрези з можливістю радіальної і торцевої настройки.

Випускають регульовані торцеві насадні (однорядні та східчасті) фрези діаметром 100...800 мм і нерегульовані східчасті фрези діаметром 100...400 мм з механічним кріпленням різальних елементів із НТМ.

Кріплення в фрезах різальних елементів з ПНТМ-вставок і пластин має особливості. Різальний елемент кріпиться у корпусі фрези тангенційно або радіально розташованим гвинтом. Кріплення різальних вставок в однозубих фрезах-летучках може здійснюватися двома гвинтами зверху. Кріплення вставки клином при обертанні гвинта забезпечує досить високу надійність закріплення та регулювання їх положення.

В деяких конструкціях кріплення вставки в корпусі здійснюється тангенціальним гвинтом, а регулювання вильоту вставки – другим гвинтом.



**Рис. 5.12. Торцова фреза з механічним кріпленням резальних пластин**

У фрезах інших конструкцій на корпус встановлюється кільце із пластиною, що здійснює закріплення вставок. Торцеве биття регулюється гвинтом через штифт, а радіальне обертанням ексцентрика.

Різальні вставки з ПНТМ у черв'ячних фрезах можна кріпити зворотним та прямим клином, поворотним штифтом або гнучкою стінкою.

Різальні пластини в основному кріпляться в корпусах фрез за допомогою касет, які встановлюються в корпусі фрези на штифті і закріплені гвинтами та клин-прихватами. Притискання пластин до касети здійснюється прихватом. Відомий спосіб кріплення, при якому пластина розташовується в призматичних пазах, виконаних і на корпусі фрези, і в касеті. У нерегульованих ступінчастих фрезах з пластинами з композиту використовується спосіб закріплення пластин циліндричним клином-прихватом, гайкою, що затягується, або циліндричним гвинтом зі скосом, що захищається від провороту штифтом. Різальна пластина при цьому встановлюється на опорну поверхню.

Окрема група фрез, оснащених ПНТМ – кінцеві фрези для оброблення пазів, уступів та інших напівзакритих і закритих поверхонь.

Розроблено конструкції кінцевих фрез, оснащених змінними багатокристалльними ножами. На рис. 5.13, а показані схема розташування елементів і загальний вигляд кінцевої фрези зі змінними багатокристалльними ножами з НТМ.

Корпус 1 має базові поверхні для установки змінних ножів 2, 3. Вони кріпляться в корпусі гвинтами з конічною голівкою 4 через фасонний отвір в ножі. Виробляються також напайні багатокристалльні кінцеві фрези (рис. 5.13 б), однокристалльні, з механічним кріпленням змінних пластин з запаяним полікристалом і цільних пластин з ПНТМ.

Для оброблення пазів в деталях з важкооброблюваних матеріалів застосовуються дискові фрези і пилки, оснащені ПНТМ (рис. 5.14), що виконуються з монолітними або двошаровими різальними елементами, які кріпляться методом паяння з наступним заточуванням.

Випускають дискові фрези з механічним кріпленням змінних вставок, оснащених ПНТМ, для оброблення пазів в деталях із загартованих сталей. Черв'ячні зуборізні фрези,

оснащені різальними елементами з ПНТМ, працюють за двома відмінними один від одного схемами різання – кромочний і профільний.

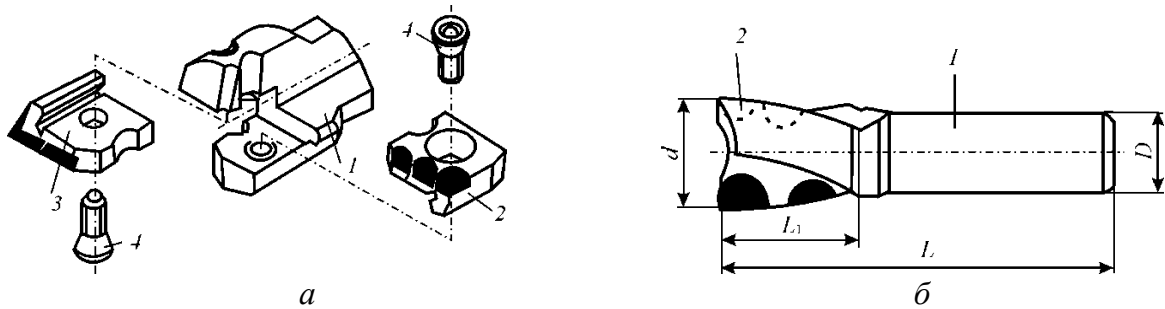


Рис. 5.13. Кіцеві фрези, оснащені різальними елементами з НТМ з механічним кріпленням напайних вставок (а) і напайна (б)

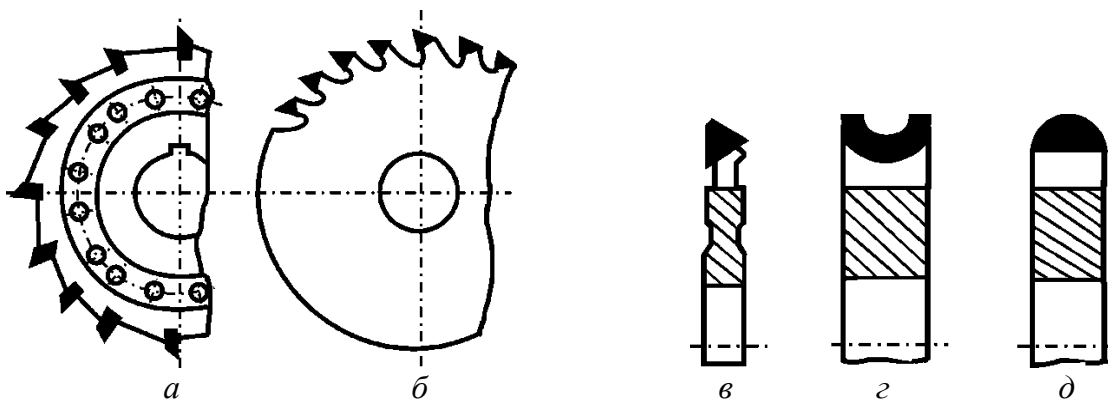


Рис. 5.14. Дискові фрези, оснащені різальними елементами із ПНТМ: фреза (а); пила (б); фрези зі спеціальною формою різальної частини (в–д)

За типом різальних елементів черв'ячні фрези ділять на фрези з механічним кріпленням змінних вставок або пластин. Конструктивно черв'ячні фрези можуть складатися з однієї та двох напівфрез. Зазвичай різальна частина фрези виконується з ПНТМ на основі нітриду бору. Полікристали розташовують на корпусі таким чином, щоб забезпечити взаємне перекриття різальних кромки і зняття необхідного припуску рівномірно на всій заданій довжині оброблюваної поверхні. Способи закріплення різальних елементів у фрезах, оснащених ПНТМ, застосовують ті ж.

#### 5.2.5. Інструменти для оброблення отворів

Інструмент для оброблення отворів, оснащений різальними вставками з НТМ, не набув широкого поширення. Однак, саме при обробленні отворів (особливо малих діаметрів) найбільш повно реалізуються переваги такого інструменту.

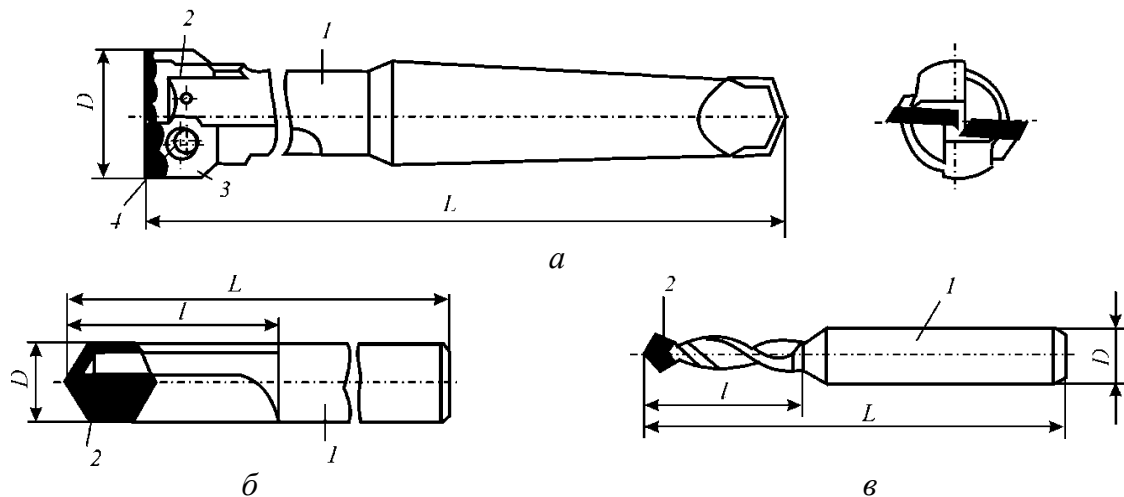
Розроблено конструкцію свердл з механічним кріпленням змінних багатокристалічних ножів із НТМ. На рис. 5.15 показані схема розташування елементів та загальний вигляд свердл, оснащених різальними вставками із НТМ. Найбільш широкого поширення набули напайні свердла: з впаяними полікристалами і цільною головкою з ПНТМ, рушничні, з прямими канавками, однокромкові, спіральні.

На рис. 5.16 показаний зенкер, оснащений різальними елементами НТМ. Положення ножів можна регулювати гвинтами. Зенковки для оброблення отворів в деталях з неметалевих матеріалів виготовляють з напайними елементами і з механічним кріпленням вставок або пластин з НТМ. На рис. 5.17 показана найбільш поширена розгортка з різальними елементами НТМ. Розгортки робляться з конічним та циліндричним хвостовиком; прямозубі та спіральні, без напрямних та з напрямними поясками, з отвором для підведення МОТС.

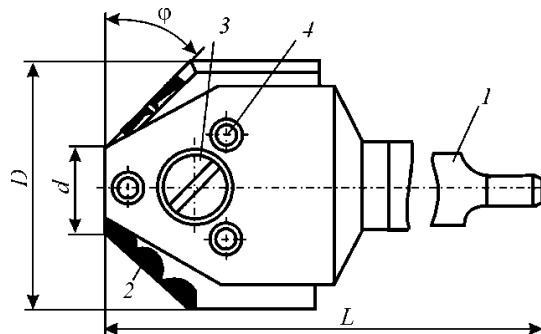
### 5.3. Особливості інструментів з різальними елементами із НТМ

Розроблено комбінований інструмент для оброблення отворів (рис. 5.18) з механічним кріпленням змінних багатограних ножів з різальними елементами із НТМ: свердло-зенківка та свердло-свердло.

Конструктивні розміри інструменту визначаються параметрами отворів, що обробляються.



**Рис. 5.15. Свердла, оснащені НТМ, з механічним кріпленням різальних елементів (а); з прямими (б) і спіральними (в) канавками та впаєними різальними елементами: 1 – корпус; 2, 3 – змінні ножі (їх встановлюють у свердла та кріплять гвинтами 4 до корпусу через фасонні отвори)**



**Рис. 5.16. Зенкер, оснащений різальними елементами НТМ: 1 – корпус, 2 – змінні багатокристалльні ножі, з'єднані між собою штифтами 4 та притиснуті до корпусу гвинтом 3; φ – головний кут у плані**

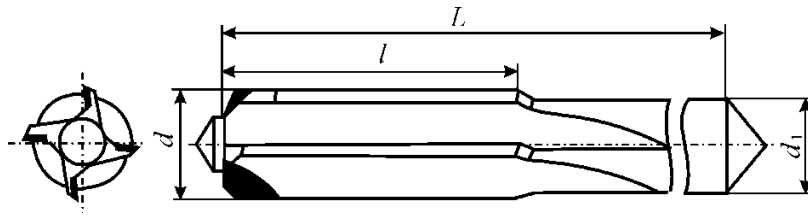


Рис. 5.17. Разгортка, оснащена різальними елементами із НТМ

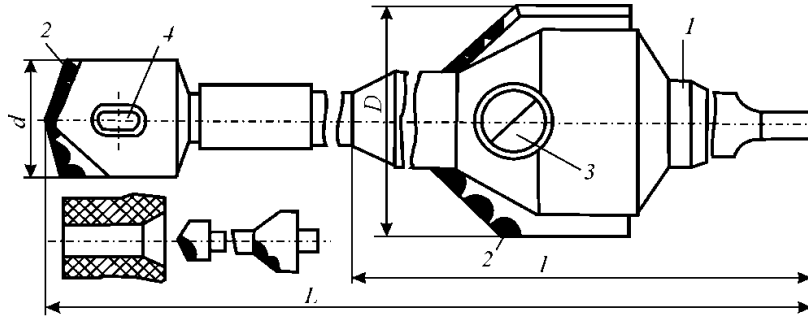


Рис. 5.18. Комбінований інструмент свердло-зенкер, оснащений різальними елементами із НТМ: 1 – корпус, 2 – різальні елементи, 3, 4 – установочно-кріпильні елементи

Для оснащення розглянутого вище осьового інструменту випускають спеціальні двохшарові, такі як Syndite-макро, і цілісні, такі як ПНТМ марки «кіборит», полікристалічні матеріали, для виготовлення сверدل діаметром до 16 мм і двохшарові, такі як Syndite-мікро, для виготовлення свердлів, що використовуються в електротехнічній промисловості при свердлінні отворів у друкованих платах.

### 5.3.1. Інструменти з різальними елементами із монокристалів природного алмазу

Геометричні параметри алмазного інструменту багато в чому визначаються специфічними властивостями кристалів природного алмазу. Кристали алмазу мають яскраво виражену анізотропію і високу крихкість, проте різальні кромки інструментів повинні мати підвищену міцність. З метою зміцнення різальної кромки алмазного інструменту його кут загострення має бути максимально допустимим з погляду процесу різання (не менше  $90^\circ$ ). При меншому куті загострення отримати різальну кромку необхідної якості і достатньої міцності дуже складно.

Геометричні параметри алмазного інструменту при точенні кольорових металів та сплавів, полімерних композицій наведено у табл. 5.2. При цьому слід мати на увазі, що більше значення заднього кута приймається для більш м'якого оброблюваного матеріалу. Розмір переднього кута має забезпечувати величину кута загострення близько  $90^\circ$ . Кут у плані інструмента, що працює на врізання, визначається конфігурацією оброблюваної деталі.

Залежно від вимог, що пред'являються до оброблених поверхонь, конфігурації та розмірів деталей застосовують оброблення на врізання чи прохід.

Вплив виду оброблення на геометричні параметри інструменту відображено в табл. 5.3. При цьому необхідно враховувати, що при роботі на врізання задній кут виконується на фасці шириною 0,1...0,4 мм, а від'ємний передній кут – на фасці шириною до 0,6 мм.

**Табл. 5.2. Геометричні параметри алмазних різців**

Оброблюваний матеріал	Передній кут $\gamma$ , град	Задній кут $\alpha$ , град	Радіус при вершині $R$ , мм
Алюмінієві сплави	0...5	8...15	0,5...1,0
Латунь	0...5	6...10	0,5...0,8
Бронза	0...(-5)	6...10	0,2...0,5
Титан	0...(-2)	8...10	0,5...0,8
Текстоліт	0...5	10...15	0,5...1,0
Ебоніт	0...5	8...12	0,3...0,8

**Табл. 5.3. Геометричні параметри алмазних інструментів для різних видів оброблення**

Геометричні параметри	Оброблення	
	на врізання	на прохід
Передній кут $\gamma$ , град	(-8)...(-15)	0...(-5)
Задній кут $\alpha$ , град	2...4	6...15
Головний кут в плані $\phi$ , град	30...90	
Допоміжний кут в плані $\phi_1$ , град	2...45	
Радіус при вершині $R$ , мм	0,2...1,0	

Для забезпечення чистоти обробленої поверхні до  $Ra$  0,1 при роботі на врізання різальна кромка інструменту не повинна мати сколів. Одержання такої кромки можливе в тому випадку, або передня і задня поверхня інструмента оброблені до шорсткості  $Ra$  0,01 ... 0,015.

Кут загострення інструменту з природних алмазів приймається залежно від оброблюваного матеріалу (табл. 5.4).

**Табл. 5.4. Кути загострення алмазних різців**

Кут загострення $\beta$ , град	Оброблюваний матеріал
90	Тверда латунь, бронза, цинк, антрацит, графіт, пластик з абразивними наповнювачами
84	Поршневі Al-Si сплави, алюмінієві ливарні сплави, Mg-Al сплави, мідь, латунь, свинцева бронза, платина, мельхіор, попередньо спечені тверді сплави, терморективні пластмаси
78	Електролітична мідь, чистий алюміній, золото, срібло, термопласти

На формування обробленої поверхні при точенні на прохід основну роль грає вершина інструменту в плані – її радіус, кути в плані та величина подачі. При обробленні на врізання більше значення має стан різальної кромки інструменту – радіус округлення, наявність дефектів тощо.

Дослідження коефіцієнта тертя алмазу за різними матеріалами показали, що він має різні значення в залежності від напрямку ковзання, пов'язані з анізотропією властивостей по кристалографічним напрямкам. Значення коефіцієнтів тертя деяких матеріалів наведені в табл. 5.5.

**Табл. 5.5. Коефіцієнти тертя інструментальних матеріалів**

Матеріал контртіла	Коефіцієнт тертя	
	природний алмаз	ПНТМ
Мідь	0,05...0,07	0,10...0,22
Латунь	0,05...0,07	0,10...0,24
Дуралюмін	0,06...0,07	0,10...0,25
Магнієвий сплав	0,06...0,08	0,12...0,26
Сталь	0,08...0,10	0,11...0,30
Титановий сплав	0,40	–

Як видно, значення коефіцієнта тертя для природних алмазів значно нижче, ніж для синтетичних полікристалів і твердих сплавів. Як відомо, коефіцієнт тертя залежить від природи контактуючих матеріалів. Для більш активних металів, таких як титан, адгезійні зв'язки за однаковий час встигають виникнути на більшій площі контактної поверхні, що обумовлює збільшення сили тертя, сприяє зростанню загальмованого шару і, як результат, виникненню внутрішнього тертя на контактних поверхнях, з характерним для нього високим значенням коефіцієнта тертя.

При обробленні кольорових металів інструментами з алмазів коефіцієнт тертя має низькі значення і практично залишається незмінним при збільшенні швидкості різання більше 33,0 м/с. Винятки становлять Ti, Zr і деякі інші метали, в контакт з якими поверхня алмазу покривається і міцно утримується плівкою металу, що труться, що виключає зовнішнє тертя. З цієї причини при обробленні титану на контактних ділянках інструменту реалізується внутрішнє тертя, а питома робота тертя становить до 74% від усієї роботи різання.

### 5.3.2. Інструменти з різальними елементами із ПНТВ на основі синтетичного алмазу

Коефіцієнт тертя синтетичних полікристалічних алмазів з металами дещо вище, ніж природних. Це пояснюється наявністю пор на поверхні полікристалу, спричинених випаданням частинок кристалітів, а також наявністю частинок металевої фази або зв'язуючого. Однак величина коефіцієнта тертя синтетичних алмазів за багатьма металами менше 0,2. Це говорить про превалювання в контактній взаємодії зовнішнього тертя, що є особливістю контактних процесів синтетичних алмазів з більшістю металів. Так само як і для природного алмазу, виключення становлять титан, цирконій та інші матеріали, в контакт з якими поверхня різального елемента покривається міцно утриманою плівкою трущогося матеріалу.

Інструмент із робочою частиною з полікристалів синтетичних алмазів має свої особливості, що відрізняють його від інструменту з природного алмазу. Зносостійкість різців, оснащених ПНТМ на основі синтетичних алмазів, значно перевищує зносостійкість інструменту з природних алмазів. Експериментально показано, що при обробленні силумінів середня стійкість полікристалічного різця в 3 рази вище середньої стійкості монокристалічного алмазного різця.

Порівняння причин відмов монокристалічних і полікристалічних алмазних різців показало, що полікристалічні різці, відрізняючись більш високою міцністю і в'язкістю, ніж монокристалічні, мають більшу кількість і частку різців з нормальним зношуванням і незначним фарбуванням. Така ж картина спостерігається і при розточуванні великих підшипників ковзання, що виготовляються з кольорових сплавів.

Переваги інструменту з різальною частиною ПКА виявляються внаслідок довільної орієнтації кристалів в алмазному шарі пластин, що забезпечує високу однорідність твердості і стійкості до стирання в усіх напрямках. Монокристал алмазу, як зазначалося раніше, має кілька твердих і м'яких кристалографічних площин і для досягнення мінімального зносу різального інструменту з природного алмазу необхідно забезпечити правильну кристалографічну орієнтацію монокристалу алмазу.

Іншою перевагою ПНТМ є підвищена стійкість до ударних навантажень. Взаємне скріплення дрібних кристалів алмазу в полікристалічному шарі зводить до мінімуму можливість утворення великих сколів під впливом ударних навантажень. Крім того, міцна твердосплавна основа служить хорошою опорою для алмазного шару і сприяє збільшенню міцності на удар.

При проектуванні різального інструменту з ПНТМ, розробці технологічного процесу та виборі металорізального обладнання для здійснення процесу необхідно враховувати вплив жорсткості технологічної системи на працездатність різального інструменту, оснащеного ПНТМ. Як зазначалося, велика зносостійкість різців із синтетичних алмазів у порівнянні з різцями з природних алмазів пояснюється відмінністю їх структур. У природного алмазу в результаті втомно-механічного впливу з'являються тріщини на різальній кромці, які можуть досягати значних розмірів.

У синтетичного алмазу, що представляє собою полікристал, тріщини, що з'являються, гальмуються і зупиняються межами кристалітів, що і визначає вищу, в середньому в 1,5 ... 2,5 рази, зносостійкість синтетичного алмазу.

На відміну від інструменту з твердого сплаву, де передня поверхня після 20 хв різання виявляється хімічно полірованою, на передній поверхні різця з різальною частиною ПНТМ при обробленні матеріалів третьої групи спостерігається «зубчастий знос», тобто. поверхня має ділянки з більш високою швидкістю зношування та ділянки, на яких практично немає слідів зношування. Тому припускають, що на різних ділянках передньої поверхні умови контакту в процесі різання неоднакові.

Останнім часом з'явилися пластини ПНТМ діаметром понад 50 мм. Це дало можливість виготовляти інструмент з різальними кромками великої довжини, що дозволило спростити виготовлення профільного фрезерного інструменту. За час експлуатації такого інструменту різальну кромку можна переточувати 16 разів. Вартість однієї переточки становить 7...11% вартості нового інструменту.

### 5.3.3. Інструменти з різальними елементами з ПНТМ на основі щільних модифікацій нітриду бору

Оптимальні геометричні параметри інструменту, оснащеного ПНТМ на основі cBN і wBN, визначаються умовами різання та властивостями оброблюваного матеріалу. При цьому потрібно відзначити, що, як і для інструменту на основі алмазних ПНТМ, вибір геометричних параметрів перетікає, тобто. паяного інструменту відрізняється від вибору геометрії інструменту, оснащеного непереточуваними різальними пластинами.

Якщо в першому випадку шляхом заточування можливе завдання практично будь-якого поєднання геометричних параметрів різальної частини інструменту, то в другому є обмеження, пов'язане з тим, що основні форми, розміри і геометричні параметри

різальних елементів регламентуються міжнародним стандартом ISO 1832-2014. І тут додатковим резервом є завдання різних кутів базуючим елементам державки, куди встановлюється різальна пластина.

Насамперед геометрія інструменту з різальною частиною ПНТМ повинна забезпечувати міцність вершини і різальних кромок різця.

Для цього в більшості випадків передньому куту інструмента надається негативне значення, як при обробленні сталей, так і при обробленні чавунів.

У деяких випадках при розточуванні чавунних деталей, точенні в'язких матеріалів, наприклад, Ni-сплавів, використовують різці з переднім кутом  $\gamma = 0^\circ$ , що пов'язано з виникненням вібрацій при різанні інструментом з від'ємним переднім кутом. Для збільшення міцності вершини різця в більшості випадків призначають кути в плані –  $45^\circ$  і  $20^\circ$ . Величина заднього кута інструменту, оснащеного ПНТМ на основі щільних модифікацій нітриду бору, має значний вплив на його працездатність.

Так, при точенні загартованих інструментальних і швидкорізальних сталей збільшення заднього кута від  $4...6^\circ$  до  $20...25^\circ$  підвищує стійкість інструменту в 2...3 рази. Однак надмірне збільшення заднього кута ослабляє різальну кромку. Тому при великому задньому куті ( $20...25^\circ$ ) необхідно збільшувати передній кут до  $15...20^\circ$ .

Кут нахилу різальної кромки під час оброблення без удару приймається рівним  $3...6^\circ$ . Під час оброблення з ударом кут зменшується для забезпечення міцності.

Поєднання між головною і допоміжною різальними кромками можуть виконуватися з радіусом  $0,1...0,6$  мм або у вигляді прямолінійної кромки довжиною  $0,3...0,8$  мм, розташованої паралельно оброблюваної поверхні (кут у плані  $\phi_0 = 0^\circ$ ). При обробленні торцевих поверхонь перехідна кромка виконується довше (до 1,5 мм), що дозволяє збільшити подачу порівняно з поздовжнім обробленням.

При точінні науглерожених термооброблених сталей в умовах різання без удару та з ударними навантаженнями рекомендується виконувати на інструменті зміцнюючу фаску шириною до 0,2 мм з негативним переднім кутом.

Для випадку оброблення з ударом на задній поверхні інструменту рекомендується виконувати фаску  $0,1...0,2$  мм перпендикулярно основній площині, що знижує напруження, що діють на задній поверхні, в результаті цього час роботи інструменту збільшується до 25 разів за рахунок зниження інтенсивності його мікроруйнування.

Слід зазначити, що геометричні параметри інструменту залежать від форми оброблюваного виробу, тобто. від операції, на яку він призначений.

Вибираючи геометричні параметри інструменту, слід пам'ятати, що при використанні різальних пластин, що не переточуються, зміна переднього і заднього кутів інструменту відбувається одночасно за рахунок відповідної переустановки пластини в державці. У цьому випадку доцільно вказувати зміну кута різання.

Поєднання високих фізико-механічних властивостей і хімічних характеристик ПНТМ на основі сфалеритного cBN і вюртцитного wBN обумовлює значно менші значення сил різання, ніж при обробленні інструментами з швидкорізальних сталей і твердих сплавів. Це знаходиться відповідно до зниження коефіцієнта тертя і зростанням температури в зоні різання, при якій послаблюються міцнісні характеристики оброблюваного матеріалу, і знижується робота пластичної деформації.

#### **5.4. Інструменти для зварювання (наплавлення) тертям з перемішуванням**

Поряд з використанням у різальному інструменті полікристалічні надтверді матеріали на основі cBN ефективно використовуються і в інструментах (пінах) для

процесу зварювання тертям з перемішуванням при виготовленні виробів зі спеціальних сталей, жароміцних та нержавіючих сплавів, елементів техніки, виготовлених з використанням нікель-мідних композицій та інших матеріалів, традиційне зварювання яких пов'язане з певними труднощами.

Враховуючи конструктивні розміри пінів, вимоги щодо міцності, твердості, теплопровідності матеріалу, для цієї мети використовуються композити марки «Кіборит-2» (рис. 5.19).



**Рис. 5.19. Піни з PсVN (а) і фрагмент інструмента для зварювання тертям з перемішуванням**

### 5.5. Інструменти для вигладжування та накатування

Найбільше поширення з методів оброблення холодним поверхневим пластичним деформуванням отримали вигладжування, засноване на взаємодії інструменту з оброблюваною поверхнею за схемою ковзання, і накочування, де інструмент взаємодіє з оброблюваною деталлю за схемою кочення. При вигладжуванні інструмент (вигладжувач) притискається до поверхні деталі фіксованою силою і переміщається по ній зі ковзанням. При накочуванні робочий елемент накатника (як правило, ролик або кулька) переміщається по поверхні, що обробляється, здійснюючи обертання навколо своєї осі.

Інструменти для таких процесів піддаються високим контактним навантаженням та температурам. Тому їх матеріали повинні мати велику твердість, здатність чинити опір стирання, високу границю міцності на стиск, низький коефіцієнт тертя і низьку схильність до схоплювання з оброблюваним матеріалом по металу, велику термостійкість.

Для виготовлення вигладжувачів широко застосовуються полікристалічні композиційні матеріали на основі синтетичних надтвердих матеріалів (рис. 5.20).

Розроблено композиційний термостійкий матеріал (АКТМ) на основі алмазу та карбиду кремнію, який, на відміну від монокристалічного алмазу, вільний від такого недоліку, як анізотропія властивостей.

За своїми фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками алмазний композит істотно перевершує синтетичні полікристалічні алмази: – термостійкість композиту АКТМ зберігається незмінною практично до температури 1200 °С у той час, як термостійкість аналогів – полікристалів типу АСПК і природного алмазу  $\leq 700$  °С; – границя міцності при стисканні композиту АКТМ перевищує міцність полікристалу-аналогу на 30%.

Деякі фізико-механічні характеристики матеріалу АКТМ представлені в табл. 5.6.

Зазначені властивості дозволяють ефективно застосовувати даний композит як матеріал робочої частини вигладжувачів. Вставки  $\varnothing 4 \times 5$  мм із АКТМ після металізації міддю запаюють у сталевий корпус.

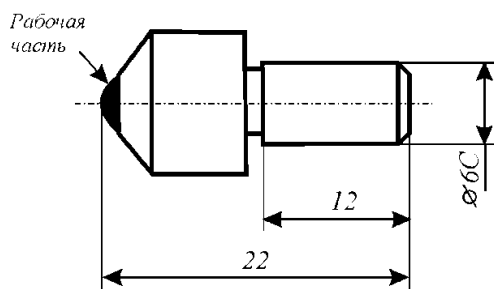
Заточування робочої частини вигладжувача виконують на заточувальному верстаті в пристосуванні, що забезпечує отримання на вершині сфери з шорсткістю  $Ra\ 0,044 \dots 0,048$ .

Алмазними вигладжувачами можуть оброблятися як кольорові метали і незагартовані сталі, так і сталі, загартовані до високої твердості. Оброблення виробів з титанових сплавів доцільно виконувати накочуванням кулями, тобто методом, у якому тертя ковзання зведено до мінімуму, а переважає тертя кочення.

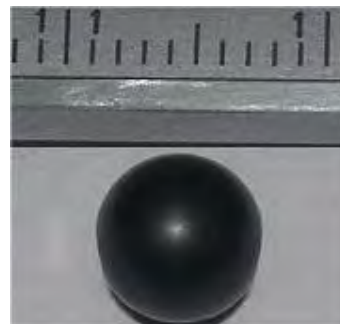
Розроблено технологію виготовлення робочих елементів накатників з АКТМ (рис. 5.21), після механічного оброблення шорсткість поверхні кулі –  $Ra\ 0,16$ .

**Табл. 5.6. Фізико-механічні характеристики композита АКТМ**

Параметр	Величина
Щільність, г/см <sup>3</sup>	3,45
Твердість по Кнупу, ГПа	50...55
Тріщиностійкість, МПа·м <sup>1/2</sup>	10...12
Границя стиску, ГПа	2,2...3,1
Модуль Юнга, ГПа	970
Теплопровідність, Вт/(м·К)	250...300
Зносостійкість при правці корундового круга, мг/кг	~4,4
Термостабільність, К	~1500



**Рис. 5.20. Загальний вид алмазного вигладжувача**



**Рис. 5.21. Куля з АКТМ**

Застосування накатників з робочим елементом з АКТМ дозволяє істотно розширити технологічні можливості процесу накочування і знизити ймовірність появи браку.

Полікристалічні матеріали на основі НТМ знайшли широке застосування в інструментах для протягування дроту (5.22).

У процесах оброблення внутрішніх поверхонь можуть ефективно використовуватися інструменти, оснащені робочими елементами з полікристалічних матеріалів на основі алмазу – так зване алмазно-електрохімічне оброблення полікристалічними катодами (АЕОПК).

Полікристалічні катоди (ПК) можуть бути виконані у формі кіл прямого профіля, чашок, брусків, стрижнів тощо. (рис. 5.23).

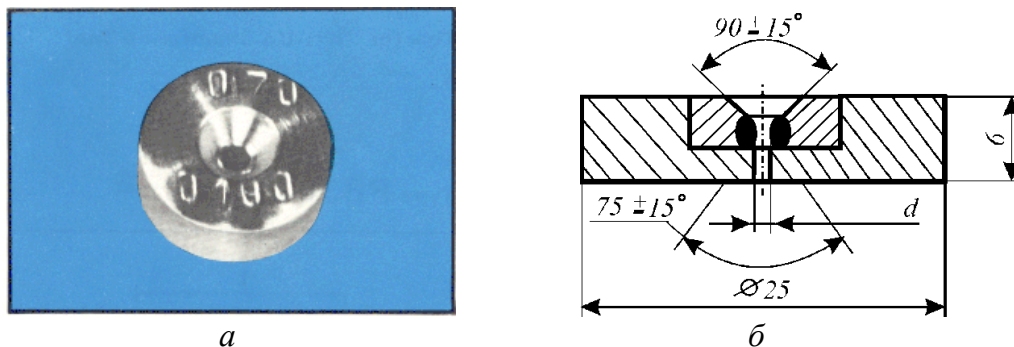


Рис. 5.22. Загальний вид (а) і схема (б) волокни з ПНТМ

### 5.6. Інструменти для алмазно-електрохімічного оброблення

Полікристалічні катоди являють собою металевий корпус заданої форми, в який впаяні або вклеєні полікристалічні елементи (ПЕ) – окремі полікристали надтвердих матеріалів, призматичні бруски або пластини.

У більшості випадків корпус ПК виготовляють із сталі 40Х або їй подібній. Можливе застосування й інших сталей, у тому числі конструкційних. При необхідності впаювання полікристалів у корпус з використанням недефіцитних фосфорних припоїв, корпус виготовляють з латуні ЛС59.

Корпус ПК складається з робочої частини, в якій закріплюють полікристалічні елементи, і хвостовика з базовою посадковою поверхнею. Деякі ПК, замість хвостовика, мають базовий отвір для закріплення інструменту в шпинделі верстата.

Для розміщення полікристалічних елементів в корпусах катодів у них фрезерують пази або свердлять отвори необхідних форми та розмірів.

У деяких випадках, наприклад, при закріпленні ПЕ фасонної форми, отвори (пази) прошивають електро-ерозійним способом (за загальноприйнятою технологією).

Робоча поверхня полікристалів виступає над катодною поверхнею корпусу на 0,2...0,3 мм. Завдяки цьому в процесі АЕОПК між нею та оброблюваною поверхнею утворюється міжелектродний зазор висотою, що дорівнює цій величині. Через такий зазор при обробленні протікає електроліт і створюються тим самим умови для електрохімічного розчинення оброблюваного матеріалу.

Полікристалічні елементи різноманітні – він можуть бути виготовлені з струмо- і нетокопровідних композитів, алмазно-твердосплавних пластин, відпрацьованих алмазних волок, полікристалів, отриманих з порошків алмазу, кубічного нітриду бору (сBN) у чистому вигляді або з активуючими добавками в умовах високих статичних тисків.

За формою ПЕ можуть бути у вигляді стовпчиків, кілець, дисків, пластин, напівсфер, брусків, фігурних сегментів, усічених конусів, трубок, а по структурі – з рівномірним або променистим розподілом зерен усередині полікристалу.

Основними характеристиками ПНТМ для ПК є їх зносостійкість, струмопровідність і зеренна структура, що визначають відповідно експлуатаційну стійкість інструментів, можливість виключення або проходження технологічного струму через ПНТМ, а також отримання обробленої поверхні з низькою шорсткістю.



**Рис. 5.23. Полікристалічні катоди для АЕОПК:** 1 – круг прямого профіля; 2 – чашкове коло; 3 – головка катода для оброблення круглих зовнішніх поверхонь; 4 – хонінгувальна головка; 5 – ПК для оброблення трьох зон каналу волок; 6 – притир для ручного оброблення каналу волок з кутовим профілем; 7 – ПК для оброблення каналу редукуючих холодновисадкових матриць; 8 – трепан; 9 – ПК із сегментними полікристалічними елементами; 10 – ПК для оброблення деформуючої та калібруючої зон каналу волок з поверхневим закріпленням стовпчиків ПНТМ; 11 – катод з рядно-розподіленим розташуванням полікристалів; 12 – ПК з подовженим корпусом для оброблення внутрішніх поверхонь; 13 – конічний ПК з рядним розташуванням полікристалів для оброблення конічної зони каналу волок

Полікристали, придатні для ПК, мають зазвичайний електричний опір 0,5...1,0 кОм і вище. Можливе застосування ПНТМ і з меншим опором. Залежить це від варіанта здійснення АЕОПК.

У більшості випадків ПНТМ повинні мати високий електричний опір, що дозволяє практично виключити проходження струму через полікристали, що контактують в процесі АЕОПК з оброблюваною поверхнею при напрузі на електродах в кілька вольт, і виконують в цьому випадку свою основну роль – зносостійких електроізоляційних прокладок між корпусом ПК та виробом.

У струмопровідних полікристалах виконання такої вимоги може бути забезпечене їх електроізоляційним покриттям, наприклад, з епоксидного клею.

В цьому випадку електричний опір самих полікристалів втрачає своє значення.

Полікристалам може бути додана різна форма шляхом їх алмазного шліфування, електроерозійного оброблення (для струмопровідних ПНТМ), оброблення вільним абразивом, струменем рідини або лазерним променем [8]. Для шліфування полікристали зазвичай розміщують в оправці і скріплюють стіракрилом. Іноді їх скріплюють бабітом. Це дозволяє здійснювати шліфування полікристалів партіями в 150–200 шт. і більше, а не поодиноці, і прискорювати цим оброблення ПЕ. Таким способом можна отримувати пластини та сегменти, зменшувати габаритні розміри заготовок ПНТМ тощо.

Полікристалічні бруски (ПБ) становлять особливу групу ПЕ. Можуть бути два типи ПБ: цілісні та складові. Брусок першого типу являє собою призматичний стрижень, одержуваний з циліндричних або дискових заготовок ПНТМ шляхом їх розрізання на окремі частини алмазним відрізним кругом, за допомогою лазера або електроерозійним способом (профільним або непрофільованим електродами).

Струмопровідні полікристали обробляють електроерозійним способом, полікристали з великим електричним опором – за допомогою алмазного круга або лазера.

Полікристалічний брусок другого типу – складовий, являє собою металеву жолобчасту оправу, зігнуту з жерсті товщиною 0,1...0,2 мм або мідну такої ж товщини. Усередині оправу укладені в певному порядку і скріплені між собою, а також з нею адгезійно-активною металевою зв'язкою сегменти, робочі елементи із ПНТМ.

У полікристалічних брусках такого типу відкрита, робоча поверхня полікристалів прошліфована з метою забезпечення однакового розміру граней бруска по його висоті.

У них доцільне використання неструмопровідних алмазів.

Неструмопровідні бруски, отримані з круглих заготовок неструмопровідних ПНТМ алмазним шліфуванням за загальноприйнятою технологією, припадають до корпусів ПК срібним припоєм. Пайці піддаються тільки металізовані полікристали.

Найбільш міцною є вакуумна металізація з адгезійно-активними компонентами припою. Прийнятним, з погляду простоти, зручності та вартісних показників, можна вважати також нікелеве покриття ПНТМ, особливо при невеликих партіях ПБ.

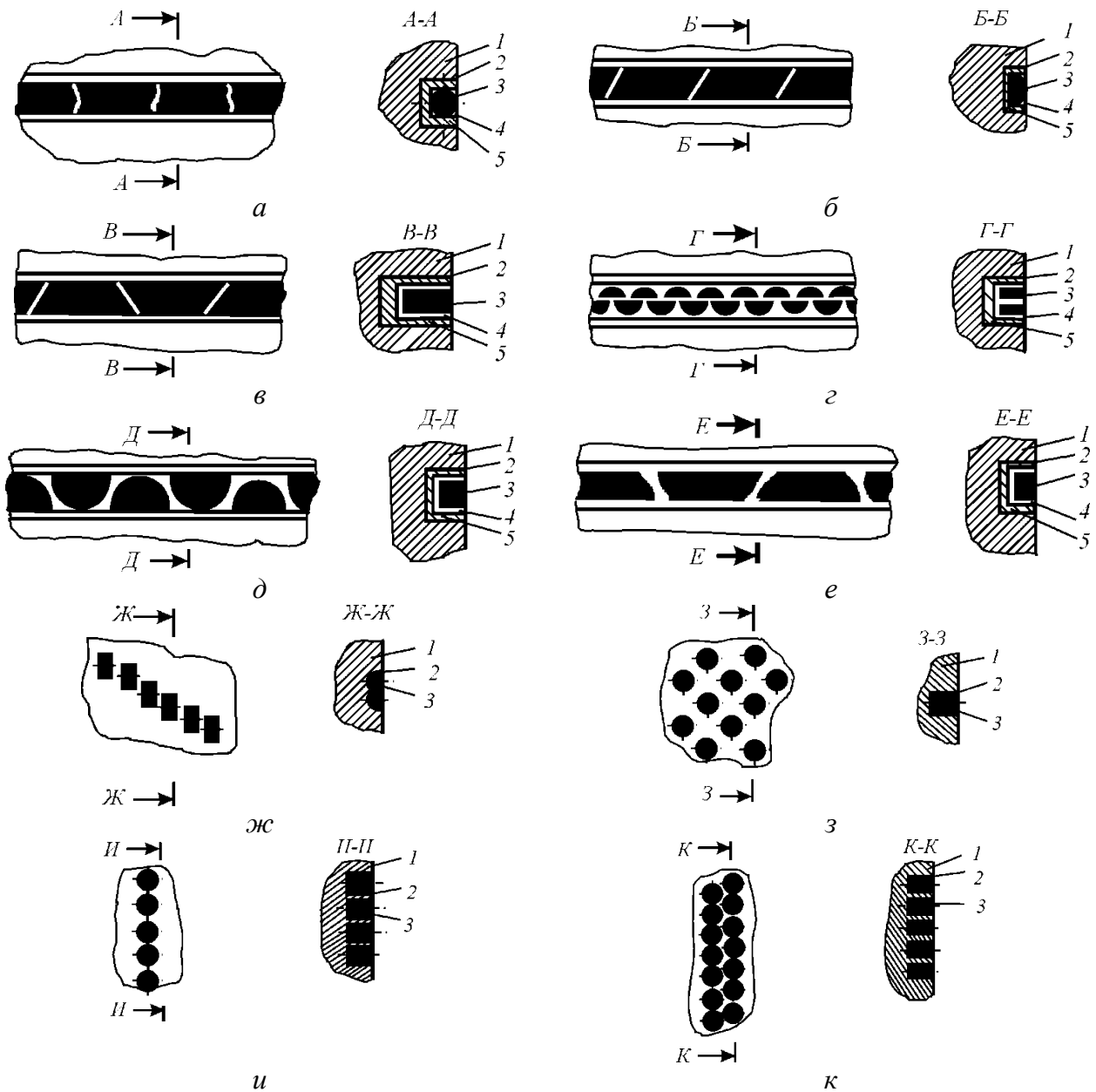
Полікристалічні бруски з клейовим з'єднанням ПНТМ є рядом скріплених круглих заготовок, пластин або сегментів ПНТМ як і в попередньому випадку, але без оправу. Такі бруски отримують шляхом заливання ПНТМ, покладених у тонкостінну оправу з фольги (зазвичай мідної) товщиною 0,05...0,10 мм, епоксидним клеєм з подальшим вилученням з неї полікристалів, що склеїлися у формі бруска. Для більш міцного закріплення полікристалів у клейовій масі їх попередньо металізують гальванічним способом, завдяки чому вони набувають розвиненої поверхні.

Полікристалічні бруски комбінованого типу являють собою оправу, до донної поверхні яких припаяні ПНТМ, а простір між полікристалами і бічними стінками оправу заповнено клеєм або якимось іншим неструмокопровідним ущільнювачем.

Основними видами розташування ПНТМ у корпусах ПК є (рис. 5.24) рядне (*a-e*), розподілене (*ж, з*), рядно-розподілене (*і, к*). Розподілене розташування ПНТМ може бути гвинтоподібним (*ж*), в шаховому порядку (*з*), довільним. Заготовки ПНТМ розміщують в корпусі ПК так, щоб у процесі оброблення при обертанні та поступальному русі інструменту забезпечувалася зачистка ними всіх ділянок оброблюваної поверхні від продуктів електрохімічних реакцій.

Для ПК, що використовуються при АЭОПК каналу твердосплавних волок прийняті чотири форми їхньої робочої частини: конічна, конусно-циліндрична, комбінована і бочкоподібна (з двосторонніми конічними поверхнями) (рис. 5.25).

Конічні ПК призначені для оброблення деформуючої або вихідної зон каналу волоки, конусно-циліндричні – для оброблення деформуючої та калібруючої зон, у тому числі округленого переходу між зонами, комбіновані та бочкоподібні – для оброблення деформуючої, калібруючої та вихідний зон каналу.

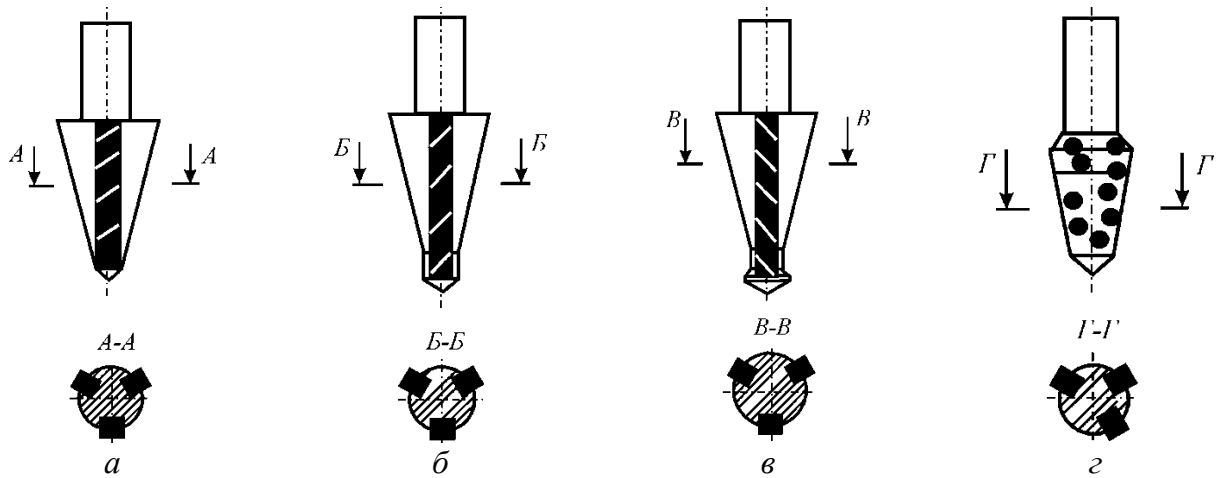


**Рис. 5.24. Варіант розміщення ПНТМ в корпусах ПК і оправах ПБ:**  
1 – корпус; 2 – клеєвий шов; 3 – полікристал; 4 – зв'язка-припій; 5 – оправа

Особливу групу ПК становлять інструменти з кільцями полікристалів, нанизаними пірамідально на осьовий стрижень катода та спаяних у такому положенні. Такі ПК використовуються для оброблення волок з каналом малого діаметра ( $d_k = 2-3$  мм), коли звичайні конічні катоди із закріпленням на їх кінцях ПЕ без гострих вершин і ребер виготовити практично неможливо через малі розміри конуса інструменту.

Полікристалічні кільця отримують з дискових або циліндричних заготовок ПНТМ за допомогою лазера та подальшої ультразвукової доробки. Якщо ПЕ складаються з

струмопровідних полікристалів, то отвори в цілісних заготовках прошивають електроерозійним способом.



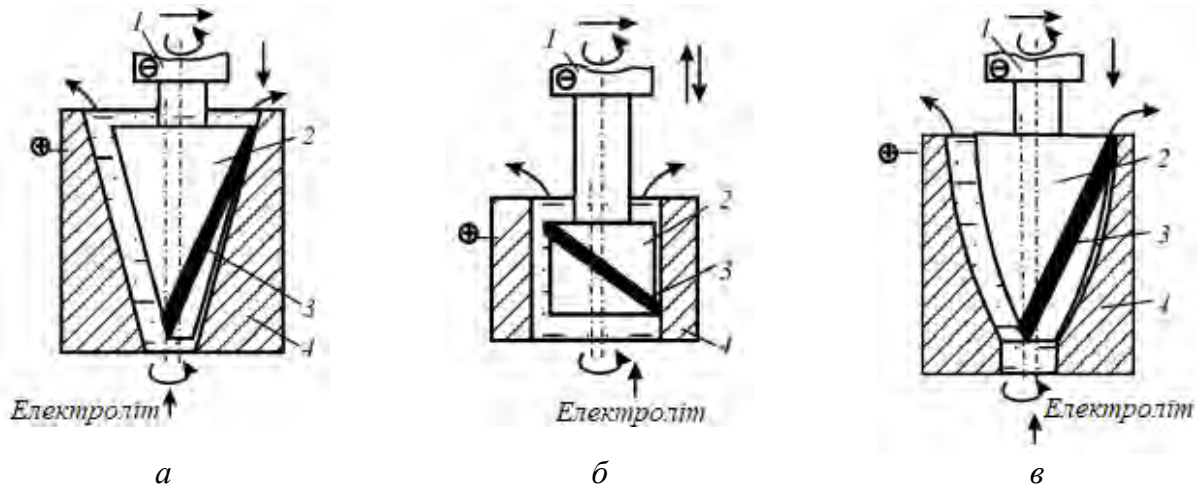
**Рис. 5.25.** Схеми конструкції полікристалічних катодів для АЕОПК твердосплавних волок: конічного (а), конусно-циліндричного (б), комбінованого (в) та бочкоподібного (г)

Для того, щоб у процесі АЕОПК на оброблюваній поверхні не залишалися сліди від стиків суміжно з'єднуються ПЕ, їх розташовують похило по відношенню до осі обертання інструменту. На бічній поверхні полікристалічної частини такого ПК паралельно утворює конічної поверхні або під кутом  $1...2^\circ$  до них виконують алмазним шліфуванням 1...3 і більше лисок. До поверхні лисок приклеюють смужки фольги товщиною 0,1...0,2 мм з міді, латуні або нержавіючої сталі. У процесі оброблення вони грають роль катодних елементів, через які до електроліту підходить технологічний струм.

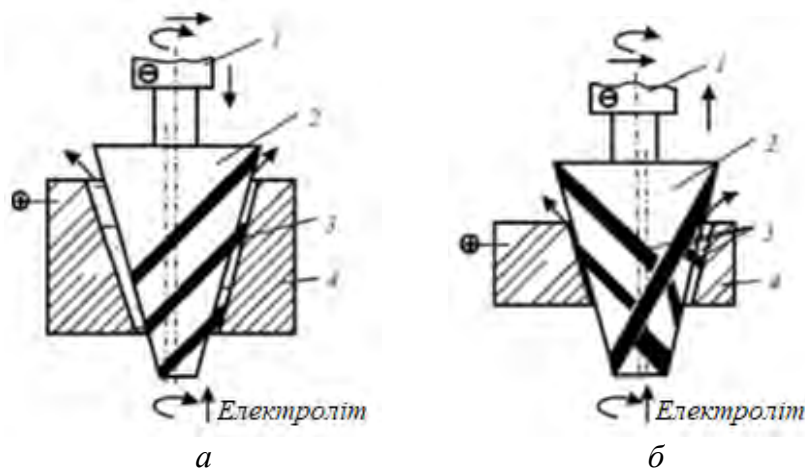
Якщо ПК використовуються струмопровідні ПНТМ, припаяні до корпусу катода, то роль катодних елементів виконують поверхні самих лисок. Необхідно підкреслити, що електричний опір заготовок ПНТМ для таких ПК дорівнює приблизно 5...30 Ом. З метою покращення умов подачі електроліту в зону знімання сплаву корпус ДПК виготовляють трубчастим з бічним одностороннім пазом. В процесі оброблення електроліт подається всередину трубчастого корпусу через центри, що розтягують, і надходить в зону оброблення через бічний паз, що забезпечує рівномірний розподіл електроліту в зоні знімання сплаву.

Еліптичні полікристалічні катоди (ЕПК) – якісно новий різновид ПК: катоди з синусоїдально переміщующоюся при обертанні інструменту та заготовки точкою постійного контакту еліптичного пластинчастого або сегментних елементів ПК з оброблюваною поверхнею.

Вони характеризуються підвищеною експлуатаційною стійкістю за формою, а також покращеною якістю обробленої ними поверхні. У таких ПК зовнішня поверхня полікристалічного елемента являє собою замкнуту криву, що охоплює катодну поверхню корпусу так, що точки цієї кривої, що знаходяться в найбільш віддалених один від одного радіальних перерізах катодної поверхні інструменту лежать по різні боки від осі його обертання. ПЕ може бути виконаний як пластини (рис. 5.26). Крім того, інструмент може бути забезпечений додатковими ПЕ, встановленими паралельно до основного або під кутом до нього (рис. 5.27).



**Рис. 5.26.** Принципіальні схеми АЗОПК катодами з еліптичними олікристалічними пластинами отворів: конічних (а); циліндричних (б); фасоних (в); 1 – інструмент; 2 – корпус катода; 3 – еліптична полікристалічна пластина; 4 – оброблювана заготовка



**Рис. 5.27.** Принципіальні схеми АЗОПК отворів катодами з еліптичними пластинами ПНТМ, розташованими в корпусах паралельно до основної пластини (а) і під кутом до неї (б): 1 – інструмент; 2 – корпус катода; 3 – полікристалічні пластини; 4 - оброблена заготовка

У еліптичних ПК полікристалічний елемент, виконаний у формі пластини, площа контакту якої для склеювання з корпусом дорівнює декільком квадратним міліметрам і більше, забезпечує завдяки цьому достатню міцність їх з'єднання, тільки невеликою своєю ділянкою виходить на торцеву катодну поверхню ПК. Таким чином, навіть у крейдяно-розмірних ПК на всіх його ділянках забезпечується наявність катодної та полікристалічної поверхонь при міцному скріпленні ПЕ з корпусом. Одночасно (завдяки виступу ПЕ з корпусу) виключається виникнення електромеханічного контакту між катодною і оброблюваною поверхнями.

Католи цієї групи складаються з металічного корпусу, в якому під кутом до осі обертання інструменту закріплений ПЕ з виступом над корпусом. Як ПЕ використовуються пластини карбоніту, кібориту, АТП, СВ або їм подібні.

Зважаючи на те, що випущені промисловістю полікристали обмежені в розмірах, а ПК доцільно в деяких випадках виготовляти довгими або великими в діаметрі, то ПЕ можуть бути утворені також з'єднанням кількох ПНТМ з наданням ПЕ алмазним шліфуванням потрібної форми.

Для оброблення еліптичними ПК хід осьової осциляції вибирають таким, при якому найбільш віддалені один від одного ділянки ПЕ не заходили б за торцеві кромки всередину отвору. Якщо довжина отвору менше довжини катода, то можливі контакти його корпусу між полікристалічними елементами з оброблюваною поверхнею, виникнення електричних розрядів між ними, псування катода і поверхні отвору. Відбувається це внаслідок «провалювання» пружно притиснутої до ПК заготовки, що обертається в місцях між протилежними ділянками полікристалічного елемента, що виступає на 0,2...0,3 мм з корпусу катода.

Щоб уникнути «провалювання», в катоді під кутом до основного або паралельно йому, закріплюють додаткові ПЕ, завдяки чому з'являються опорні полікристалічні ділянки катода. Те саме стосується оброблення конічних і фасонних отворів або порожнин.

Для оброблення отворів малого діаметра в ПК є можливим розміщувати ПЕ на ділянках корпусу з діаметром, наприклад, 3...4 мм, забезпечуючи при цьому інші умови, необхідні для реалізації процесу. У цьому випадку пластинчастий ПЕ може мати товщину 1...2 мм, що практично можливо за допомогою електроерозійного та алмазного оброблення циліндричних заготовок або пластин ПНТМ. В наслідок цього умов забезпечуються умови міцного з'єднання ПЕ з корпусом катода.

### **Контрольні запитання**

1. Види лезових інструментів.
2. Методи кріплення робочих елементів із надтвердих матеріалів в інструментах.
3. Інструменти із монокристалічним алмазом.
4. Різальні вставки і пластини.
5. Паяні інструменти та інструменти із механічним кріпленням робочих елементів із надтвердих матеріалів.
6. Фрези із надтвердими матеріалами.
7. Осеві інструменти із надтвердими матеріалами.
8. Області використання інструментів із надтвердими матеріалами.
9. Інструменти для зварювання тертям з переміщенням.
10. Деформіручі інструменти.
11. Інструменти для комбінованого оброблення.

## РОЗДІЛ 6 АЛМАЗНО-АБРАЗИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ

### 6.1. Фізичні основи процесу

Із синтетичних алмазів виготовляють майже 90% алмазно-абразивного інструменту зі зв'язаним абразивом і паст, практично весь алмазно-абразивний інструмент на органічній та керамічній зв'язках, усі шкірки та стрічки, 95% інструменту на гальванічному та майже 90% на металевих зв'язках [1–3, 5].

Висока конкурентоспроможність та ефективність абразивних інструментів із НТМ передбачає їх реалізацію у високих технологіях механічного оброблення. Останнім часом розроблено низку технологій, які знайшли широке використання в машино- та приладобудуванні.

Серед них слід відзначити:

- високопродуктивне алмазно-абразивне оброблення різальних інструментів із твердих сплавів, інструментальних сталей та керамік;
- отримання зносостійких поверхонь деталей машин шляхом алмазного хонінгування з одночасним легуванням оброблюваної поверхні;
- алмазне оброблення плоских та асферичних деталей оптики;
- прецизійне алмазно-абразивне оброблення деталей типу «куля» із конструкційних керамік;
- різання композиційних матеріалів дисковим алмазним інструментом зі структурно-орієнтованим робочим шаром;
- формоутворення та профілювання алмазно-абразивного інструменту електрофізичними методами.

Створено технологічні пристрої для глибокого, вібраційного, електрохімічного та електроімпульсного шліфування, для підведення технологічної рідини в зону оброблення, спеціалізоване обладнання для цих процесів. Досвід використання таких технологій показав, що алмазно-абразивні інструменти, які використовуються в них, дозволяють:

- здійснювати групове оброблення;
- досягати стабілізації певних параметрів оброблення, що задаються, а саме: температури на поверхні деталі, шорсткості, точності розмірів, продуктивності, зносу; в одному інструменті можна комбінувати функціональні можливості кількох інструментів для узгоджених операцій.

Використання абразивних інструментів із НТМ дозволяє:

- вести оброблення незалежно від структурного та фазового стану оброблюваних матеріалів: «тверді» та «м'які» матеріали однаково ефективно піддаються обробленню;
- виключити термічний вплив на структуру оброблюваних матеріалів за рахунок застосування теплонапружених процесів із температурою менше 600 °С;
- збільшити продуктивність оброблення у два-три рази на напівчистових та фінішних операціях;
- збільшити стійкість інструменту не менше ніж у два рази;
- застосовувати шліфувальні інструменти із НТМ: великогабаритні форм 1A1 та 6A2 діаметром від 400 до 900 мм; дрібнорозмірні форми 1A1, 1V1, 12R4 діаметром від 30 до 100 мм; з переривчастим та двошаровим робочим шаром.

Абразивні інструменти із НТМ відрізняються високими продуктивністю, зносостійкістю та надійністю, а також особливими тепло- та електрофізичними

властивостями. Їх застосування значною мірою визначає якість виготовлення і високі технічні параметри відповідальних деталей багатьох машин і приладів, виробів електроніки, підвищує продуктивність буріння свердловин для видобутку нафти і газу, забезпечує ефективне оброблення будівельних виробів.

Використання абразивних інструментів із НТМ сприяє технічному прогресу при формоутворенні деталей на основі нових матеріалів та використанні енергозберігаючих технологічних автоматизованих процесів машино- та приладобудування.

Великі резерви закладені у використанні можливостей НТМ як у абразивному інструменті, так і у процесах оброблення. Одним з основних резервів є забезпечення оптимальної стійкості та міцності закріплення зерен НТМ у робочому шарі залежно від характеристики інструментів та умов оброблення.

Особливо важливе значення мають склад і властивості зв'язки інструмента, що є не тільки засобом утримання зерен НТМ, але й самостійним фактором взаємодії з матеріалом, який істотно впливає на процес різання.

## 6.2. Шліфування

### 6.2.1. Оброблення деталей з інструментальних та швидкорізальних сталей

Використання кругів з cBN дозволяє значно підвищити якість виробів з швидкорізальних сталей, а також знизити знос абразивних кругів.

Технологічні процеси шліфування та заточування швидкорізального інструменту кругами з CBN, залежно від наявності або відсутності охолодження, мають певні особливості.

Найбільш ефективними є круги наступних типорозмірів: 12A2-45 (150×10×5×32) мм, 12A2-20° (150×10×2×32) мм, 12A2-20 (125×10×2×32) мм, 9A3 (150×10×3×32) мм.

Для заточування найбільш прийнятними є інструменти, робоча частина яких містить зерна cBN – кубоніт марки КР (допускається КВ), для доведення можливе застосування марок КР або КВ.

При обробленні без охолодження будь-яке покриття на зернах кубоніту негативно впливає на працездатність інструменту: при наявності покриття зростають зусилля різання, температури в зоні оброблення і підвищується шорсткість обробленої поверхні. У цьому випадку доцільним є використання полімерних зв'язок типу В2-08. Для кругів, де необхідно враховувати підвищену кромкостійкість, наприклад форми 12R4, доцільно використання зв'язки типу В2-01-1.

При необхідності знімання великих припусків (значне затушення переточуваного різального інструменту) необхідно використовувати кубоніт зернистістю 160/125, у стандартних умовах заточування – 125/100, для доведення – 63/50.

З підвищенням відносної концентрації зерен кубоніту в різальному шарі круга від 25 до 100% висотні параметри шорсткості поверхні знижуються і після 100% дещо стабілізуються. З підвищенням концентрації понад 100% зв'язка стає більш твердою і жорсткою, ймовірність втискання зерен у зв'язку знижується і сліди від одиничних зерен стають глибшими. У зв'язку із зазначеним і для заточування, і для доведення відносну концентрацію кубоніту в кругах доцільно витримувати однаково – 100 %.

Окружна швидкість кругів із кубоніту повинна бути в межах 15...20 м/с. Підвищення швидкості до 30 м/с недоцільне, оскільки за відсутності охолодження це призведе до підвищення контактної температури як при заточуванні, так і при доведенні,

що може викликати появу припиків або сколів оброблюваного інструменту. Глибина шліфування – 0,01...0,05 мм. Поздовжня подача – 0,5...2,0 м/хв.

Процес шліфування з охолодженням має свої особливості. Перехід до оброблення з охолодженням дозволяє підвищити продуктивність оброблення як мінімум у два рази, знизити знос кругів із НТМ, також як мінімум у два рази, при гарантованому підвищенні стійкості різального інструменту – в 1,3 рази.

Це забезпечується тим, що стає можливим використання кругів cBN на більш зносостійких і більш високопродуктивних металополімерних і металевих зв'язках, створюється можливість підвищення швидкості обертання круга до 30 м/с і формування умов отримання більш зносостійкої обробленої поверхні інструменту. Стає можливим використання спеціальних багатошарових кругів, які дозволяють дві операції – заточування та доведення – поєднати в одну та на цій одній операції одразу отримати високоякісну поверхню.

Найбільш перспективні для використання типорозміри: 12A2-45 (150×10×5×32) мм, 12A2-20 (150×10×2×32) мм, 12A2-20 (125×10×2×32) мм, 9A3 (150×10×3×32) мм.

Для заточування найбільш прийнятні круги з cBN марки кубоніт КР (допускається КВ), для доведення можливе застосування марок КР або КВ.

Можливе використання металізованого склопокриття зерен кубоніту, хоча більш прийнятним є використання кругів без покриття зерен.

Великі припуски знімають, як і у попередньому випадку, використовуючи кубоніт зернистістю 160/125, у стандартних умовах заточування – 125/100 для доведення – 63/50. Можливе використання металополімерних зв'язок типу В1-13, для кругів з підвищеною кромкостійкістю, наприклад форми 12R4, доцільним є застосування зв'язок типу М1-10.

Окружна швидкість кругів з кубоніту повинна перебувати в межах 20...30 м/с з тенденцією у бік більшої швидкості.

Глибина шліфування – 0,050...0,025 мм. Поздовжня подача – 0,5...1,0 м/хв.

### 6.2.2. Оброблення інструментів з вольфрамівмісних та безвольфрамових твердих сплавів

Основними характеристиками, що визначають якість і оброблюваність твердих сплавів, є щільність, твердість, границя міцності при згинанні, коерцитивна сила, розмір зерна карбідної фази і товщина кобальтового прошарку. Для твердих сплавів характерною є наявність залишкових напружень у складових фазах, викликане неоднорідністю їх теплофізичних властивостей і неоднорідністю властивостей поверхневого шару та глибинних шарів – у вихідному твердому сплаві карбідна фаза знаходиться під впливом напружень стиску, а кобальтова – напружень розтягу. Так, середні залишкові термонапруження у фазах твердих сплавів WC-Co знаходяться в діапазонах для кобальтової фази (напруження стиску) у ВК6 – 2200 МПа, ВК15 – 870 МПа, а ВК25 – 530 МПа; для карбідної фази (напруження розтягу) у ВК6 – 100 МПа, ВК15 – 220, а ВК25 – 260 МПа.

Це необхідно враховувати у процесах їх алмазного шліфування.

Серед гами твердих сплавів є такі, оброблення яких значно укладнене.

До них відносяться сплави, леговані карбідами танталу і ванадію, – група ТТК (ТТ20К9, ТТ8К6, ТТ10К8Б тощо) та сплави типу ОМ (ВК6 ОМ, ВК10 ОМ, ВК10 ХОМ).

Позначення ОМ означає, що твердий сплав додатково легований карбідами VC та TiC, а ХОМ – що твердий сплав типу ЗМ ще додатково легований Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>.

Позначення ХТМ означає, що твердий сплав типу ЗМ ще додатково легований карбідами,  $Cr_3C_2$ ,  $TiC$  і  $MoC$ .

Додаткове легування карбідами ванадію та титану сприяє формуванню тонкозернистих твердих сплавів, в яких розмір зерен не перевищує 1 мкм.

При цьому підвищується опір пластичного деформування металу, але погіршується їх оброблюваність.

Легування значно підвищує знос алмазних кругів та шорсткість обробленої поверхні.

Важливим фактором оцінки особливостей оброблення твердих сплавів є вплив їх властивостей на оброблюваність.

Так, існує ряд кореляційних залежностей, що відображають характер тенденцій впливу властивостей твердих сплавів на зношування (відносна витрата алмазу  $q_p$ ) кругів при шліфуванні: – зі зростанням, відповідно, щільності  $\rho$ , твердості  $H_{mc}$  та міцності при згині  $R_{bm}$  сплавів витрата алмазу знижується:

$$q_p = 5,1 - 35,5 \rho, q_p = 68,69 - 0,73 H_{mc}, q_p = 1,049 + 2117,24 / R_{bm}; \quad (6.1)$$

– зі зростанням коерцитивної сили ( $K_c$ ) витрата алмазу збільшується:

$$q_p = 4,323 - 24,26 / K_c; \quad (6.2)$$

– збільшення величини зерен карбідної фази ( $Z_{к.ф.}$ ) призводить до зниження витрати алмазу в крузі:

$$q_p = -0,371 + 3,33 / Z_{к.ф.} \quad (6.3)$$

Слід звернути увагу, що в алмазних кругах, одержуваних за стандартною технологією спікання і пресування, існує певне орієнтування зерен алмазу, які «розвалені» у робочому шарі під кутом  $\pm 45^\circ$ , тобто присутня певна структурна орієнтація.

Важливість врахування структурної організації робочого шару шліфувальних кругів з НТМ прослідковується на прикладі вибору характеристик кругів при шліфуванні кромкою круга і прагнення у виборі його характеристик до зниження зернистості порошків алмазу та їх відносної концентрації, на відміну від рекомендацій при шліфуванні периферією або торцем круга окремо.

Так при шліфуванні кромкою круга виникають зовсім інші умови роботи зерен, не характерні для звичайного шліфування торцем або периферією круга. Це видно на прикладі визначення працездатності алмазних кругів форми 1А1 (150×6×5×32) мм різних характеристик при шліфуванні пазів по задніх поверхнях пластин з твердого сплаву Т5К10.

Режими шліфування: швидкість обертання круга – 27 м/с, поздовжня подача – 5 м/хв, глибина шліфування – 0,025 мм/дв.х. при обробленні без охолодження найкращі результати отримано для металополімерної зв'язки типу В1-13.

Зменшення зернистості порошку алмазу з 125/100 до 80/63 без втрати продуктивності дозволяє майже вдвічі знизити знос круга. Аналогічно і зниження відносної концентрації порошку алмазу зі 150 до 100%, або зі 100 до 75% (на іншій зернистості) дозволяє зменшити зношування кругів, що особливо яскраво проявляється якраз на менших зернистості і менших концентраціях. За наявності склопокриття на зернах алмазу має місце та ж сама тенденція. Однак покриття зерен алмазу склом (С22) погіршує кромкостійкість кругів.

Застосування більш міцних порошків алмазу марки АС6 замість марки АС4 дозволяє підвищити зносостійкість кругів, а ось подальше підвищення міцності зерен до міцності зерен марки АС15 ефекту не дає. Порівняння зносостійкості алмазних кругів на

металополімерних зв'язках В1-13 і ВС-Е показує, що більш металонасичені та електропровідні зв'язки типу ВС-Е в кругах мають і менший знос, оскільки краще відводять тепло із зони оброблення.

Як вже зазначалося, за стандартних умов спікання кругів розвал зерен НТМ відбувається під кутами  $\pm 45^\circ$  у робочому шарі відносно напрямку зусилля пресування. У свою чергу, зерна НТМ, які розміщені на кромці і працюють на ній, знаходяться зовсім в інших умовах, оскільки мають нахил щодо складових зусилля різання вже не в  $45^\circ$  і  $135^\circ$ , а в  $90^\circ$  і  $180^\circ$ .

Тим самим створюється інша ситуація в роботі зерен НТМ на кромці, що вимагає необхідності використовувати зовсім інші підходи, ніж це є характерним для шліфування торцем круга. Однак нині користувачі часто не враховують структурну орієнтацію зерен і не звертають уваги на важливість тези щодо регулювання коефіцієнта абразивного різання:  $f_a = P_z / P_y$ .

Таким чином, слід враховувати, що має місце вплив реальної орієнтації зерен на показник коефіцієнта  $f_a$ . Для зниження напружень на границі «зерно – зв'язка» і, відповідно, зносу кругів з підвищенням їхньої кромкостійкості стосовно умов невеликого різання кромкою круга та врахування орієнтування зерен у цьому випадку в  $90^\circ$  і  $180^\circ$  необхідно прагнути в процесі шліфування не до підвищення, а до зниження величини коефіцієнта абразивного різання. При цьому бажано підвищувати складову  $P_y$  або стримувати її від зниження, а складову  $P_z$  необхідно знижувати. Цього можна досягти шляхом зниження зернистості і відносної концентрації порошку алмазу в робочому шарі круга.

Поряд із реальними значеннями складових зусилля різання більшу увагу слід також приділяти особливостям зміни величини коефіцієнта абразивного різання  $f_a$ .

Дослідження показали, що найменші зусилля шліфування виникають при обробленні сплаву Т5К10, а найбільші – при обробленні металу ВРК15.

Величина  $f_a$  змінюється слабко й знаходиться у діапазоні 0,30...0,35.

Для твердих сплавів встановлено, що у діапазоні концентрацій порошків алмазу у круга від 50 до 125 % коефіцієнт  $f_a$  зростає. Аналогічно він поводить себе і зі зростанням зернистості від 40/28 до 125/100. Тим самим встановлено, що зі зростанням зернистості та концентрації НТМ коефіцієнт  $f_a$  підвищується. Однак зі зростанням швидкості обертання круга та глибини шліфування  $f_a$  знижується.

Вивчено зв'язок зношування інструменту з коефіцієнтом  $f_a$  при шліфуванні твердого сплаву ВК60М навколо АС4 63/50ма – В1-11П 125 % при продуктивності  $174 \text{ мм}^3/\text{хв}$ .

Встановлено, що зі зростанням  $f_a$  знос круга знижується:

$$q_p = 149,58 - 467,16f_a. \quad (6.4)$$

При шліфуванні безвольфрамкових твердих сплавів (БВТС) також встановлено зв'язок зносу круга з коефіцієнтом  $f_a$ . І в цьому випадку зі зростанням величини  $f_a$  знос алмазних кругів знижується.

Математична залежність цього з похибкою 15,1% має вигляд:

$$q_p = 3,054 - 6,916f_a. \quad (6.5)$$

Це підтверджує положення про те, що для зниження зношування кругів необхідно підвищувати величину коефіцієнта  $f_a$ .

На температуру в зоні оброблення  $T$  впливають усі параметри режимів шліфування, що визначають продуктивність процесу  $Q$ , у тому числі поздовжня подача, оскільки від неї залежить товщина шару матеріалу, що знімається за оберт круга.

Зазвичай з підвищенням  $Q$  спостерігається зростання температури шліфування.

У досить широкому діапазоні значень  $Q$  температура в зоні оброблення змінюється за квадратичною залежністю, яку можна умовно поділити на дві частини. Спочатку підвищення температури дещо стримується тим, що з підвищенням продуктивності зростає площа контакту пластини твердого сплаву з алмазними зернами, які одночасно є ефективними теплоносіями. Далі стає значнішим контакт зв'язки круга з матеріалом, що призводить до виділення додаткової кількості тепла, не пов'язаного безпосередньо з роботою різання.

Для умов шліфування твердих сплавів груп МС, ВК та ТК кругами на полімерних зв'язках залежність температури від продуктивності оброблення має вигляд:

$$T = 108k_m + 2,53 \cdot 1,004076^Q, \quad (6.6)$$

де  $k_m$  – коефіцієнт теплової характеристики твердих сплавів, що характеризує зсув кривої «продуктивність – температура» вздовж осі ординат.

Встановлено статистичний зв'язок між коефіцієнтом  $k_m$  та властивостями твердих сплавів.

Так, рівень температур шліфування та  $k_m$ :

зростає:

– з підвищенням щільності сплавів:

$$k_m = -10,33 / (-25,7 + \rho), \quad (6.7)$$

зі збільшенням міцності при згинанні:

$$k_m = -623,9 / (-2118,46 + R_{bm}); \quad (6.8)$$

знижується:

– з підвищенням твердості сплавів:

$$k_m = 7,4636 - 7,412 \cdot 10^{-2} H_{TC}, \quad (6.9)$$

– зі зростанням коерцитивної сили:

$$k_m = K_c / (1,93K_c - 16,989). \quad (6.10)$$

Рівень температур поверхні твердих сплавів при продуктивності шліфування з охолодженням  $725 \text{ мм}^3/\text{хв}$  становить  $104 \dots 211 \text{ }^\circ\text{C}$ .

У разі шліфування без охолодження температура збільшується у  $5 \dots 7$  разів. Так, при шліфуванні сплаву ВК10ХОМ із охолодженням температура становила  $157 \text{ }^\circ\text{C}$ , а без охолодження –  $794 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Таке різке підвищення температури призводить до тріщин і сколів у поверхневому шарі виробу, а також до окислення його поверхні.

Тому при шліфуванні твердосплавних виробів необхідно прагнути максимального зниження температури, а для цього потрібно:

– виконувати шліфування тільки з охолодженням;

– застосовувати метод глибинного алмазного шліфування, оскільки таке оброблення супроводжується меншою температурою. Наприклад, при шліфуванні твердого сплаву ВК10ХОМ температура становила  $157 \text{ }^\circ\text{C}$ , а при багатопрхідному –  $226 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

– використовувати полімерні зв'язки, а не металеві, якщо це не обумовлюється спеціальними вимогами. Так, при шліфуванні твердого сплаву ВК10ХОМ встановлюється рівень температур, приведений у табл.6.1.

– застосовувати максимальну, для конкретних умов, ширину алмазовмісного шару.

Так, при однаковій продуктивності шліфування ( $725 \text{ мм}^3/\text{хв}$ ) твердого сплаву ВК10ХОМ кругом на зв'язці М1-04 із шириною шару  $10 \text{ мм}$  температура становить  $272 \text{ }^\circ\text{C}$ , а з шириною  $2 \text{ мм}$  –  $318 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Табл. 6.1. Температура шліфування твердого сплаву

Зв'язка	Металічна		Полімерна
Основа	Cu – Al – Zn		Cu – Sn – Sb
Марка	M1-04	MO20-2	B1-13
Температура шліфування, °C	272	280	157

Розглянуто зв'язок між коефіцієнтом абразивного різання ( $f_a$ ) та температурою шліфування при однаковій продуктивності оброблення.

Виявлено, що для твердих сплавів така кореляційна залежність має вигляд:

$$T = 109,29 + 129,78 f_a, \quad (6.11)$$

і, таким чином, із зростанням  $f_a$  температура підвищується в зоні оброблення.

Це слід мати на увазі, оскільки для підвищення зносостійкості кругів необхідно прагнути до збільшення значення  $f_a$ .

Виявлено залежність відносних витрат алмазу при шліфуванні твердих сплавів від температури в зоні оброблення, що має з похибкою 10,8 % вид:

$$Q = -27,29 + 5,965 \ln T. \quad (6.12)$$

Звідси видно, що чим більша температура, тим більший і знос круга, проте зі зростанням температури приріст зносу знижується, ймовірно, за рахунок «полегшення» процесу різання при вищих температурах.

Шорсткість шліфованої поверхні твердих сплавів має певний кореляційний зв'язок з їх фізичними властивостями.

Так, зі збільшенням щільності та коерцитивної сили твердих сплавів шорсткість підвищується:

$$Ra = 1/(2,204 + 5,87 \cdot 10^5 e^{-\rho}), Ra = 0,208 + 1,068 \cdot 10^{-2} K_c \quad (6.13)$$

Зі збільшенням твердості, міцності при згині та величини зерен карбідної фази твердого сплаву шорсткість знижується:

$$Ra = 3,72 - 3,74 \cdot 10^{-2} H_{TC}, Ra = 0,4004 - 1,96 \cdot 10^{-5} R_{bm}, Ra = 0,555 - 0,146 \cdot Z_{TC}. \quad (6.14)$$

Безвольфрамкові тверді сплави (БВТС) шліфуються значно гірше за тверді сплави, оскільки значно зростає питома витрата алмазу в кругах внаслідок того, що сили різання в кілька разів вище твердих сплавів груп ВК і ТК, що виникають при шліфуванні.

Пояснюється це тим, що карбід титану має у 1,5 рази, а карбонітрид титану у 2,0 рази більшу твердість, ніж карбід вольфраму.

Оброблюваність БВТС КНТ16 майже в 5 разів гірша, ніж сплав ТН20. Однією з причин є взаємодія сполучного БВТС – нікелю з алмазом у зоні шліфування.

Така взаємодія пов'язана з тим, що зерно алмазу в процесі різання проходить через широкий інтервал температур від кімнатної до близької до плавлення оброблюваного металу. За наявності плівки заліза або нікелю на контактній поверхні алмазу його графітизація починається раніше, ніж досягається температура, при якій можлива відчутна дифузія вуглецю в оброблюваний метал.

Подальше підвищення контактної температури у процесі одиничного акту різання активізує графітизацію. Нікель та залізо є каталізаторами, що знижують температуру графітизації алмазу. Тонка плівка нікелю (400...600) Å викликає поверхневу графітизацію алмазу вже за температури 400 °C.

Графітизацією пояснюється і експериментальне зниження коефіцієнта тертя зі збільшенням швидкості ковзання алмазу по сталі. Таким чином, інтенсивне зношування алмазів при різанні заліза і нікелю обумовлено графітизацією алмазу, а не дифузією

вуглецю в оброблюваний матеріал. При мікрорізанні титану формується товстіша і щільніша плівка металу на алмазі, що пояснюється високою спорідненістю титану до вуглецю. Відповідно, при мікрорізанні існують умови для хімічної взаємодії вуглецю у вигляді алмазу та титану.

Відомо, що в процесі шліфування в оброблюваному твердому сплаві має місце втрата карбідів, що може негативно позначитися на міцностних і триботехнічних характеристиках виробів.

Дослідження силових закономірностей процесу шліфування БВТС ( $v_{кр} = 15$  м/с,  $S_{пр} = 0,5$  м/мин,  $S_{п} = 0,25$  мм/дв.х,  $Q = 660$  мм<sup>3</sup>/мин, круг АС4 100/80ма – В1-11П 100 %) показали, що оброблення БВТС у порівнянні з вольфрамовими сплавами характеризується більшою складовою  $P_y$  та, відповідно, меншим значенням коефіцієнта  $f_a = 0,18...0,26$ . Використання металевих зв'язок замість полімерних призводить до підвищення зусиль різання. Для коефіцієнта  $f_a$  принципової різниці не виявлено.

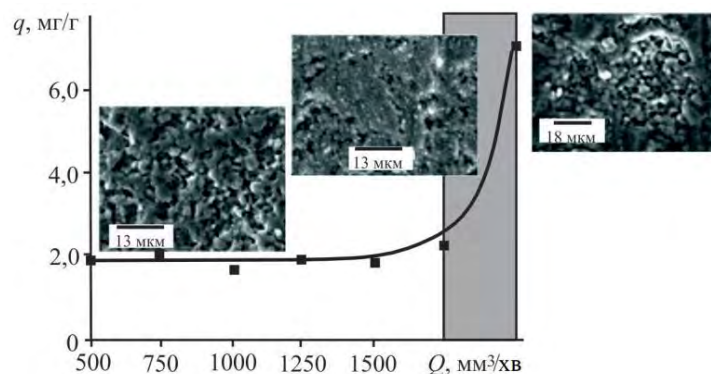
Зі зростанням міцності порошку алмазу зростає і зусилля різання. При цьому коефіцієнт  $f_a$  змінюється мало. Він лише трохи вищий у зерен алмазу марки АС2.

Покриття на зернах призводить як до зростання зусилля різання, і підвищення коефіцієнта  $f_a$ .

### 6.2.3. Оброблення інструментальної кераміки

Інструментальна кераміка є переважно крихким матеріалом, якому незначно притаманні властивості пластичності, проте пластична складова при аналізі оброблюваності і структури кераміки безумовно присутня.

Слід врахувати положення про критичну продуктивність оброблення, що базується на обліку формозміни різальної поверхні круга в процесі шліфування. Як тільки різальна поверхня з підвищенням продуктивності шліфування вичерпує резерви свого збільшення за рахунок формозміни, круг досягає значення критичної продуктивності та переходить у зону катастрофічного зносу (рис. 6.1).



**Рис. 6.1. Залежність відносних витрат алмазу в крузі від продуктивності шліфування кераміки ВОК60 ( $v_{кр} = 15$  м/с,  $S_{пр} = 0,5$  м/хв,  $S_n = 0,25$  мм/дв.х) та стан поверхні кераміки у трьох зонах (сірий прямокутник – зона відсутності резерву різальної поверхні круга; початок зони відповідає критичній продуктивності шліфування)**

Забезпечення продуктивності оброблення в межах критичної гарантує стабільну зносостійкість круга. У різних зонах роботи круга формуватиметься характерна для цієї

зони оброблювана поверхня: для початкового етапу, коли продуктивність оброблення невелика і становить до  $500 \text{ мм}^3/\text{хв}$ , характерно крихке руйнування і не спостерігається проявів пластичного впливу; для критичного етапу, коли продуктивність оброблення дорівнює критичній і становить  $1750 \text{ мм}^3/\text{хв}$ , на оброблюваній поверхні фіксуються прояви пластичного впливу і найкраще це спостерігається саме в межах критичної продуктивності; на етапі катастрофічного зносу, коли продуктивність досягає  $2000 \text{ мм}^3/\text{хв}$ , у цій зоні поряд із пластичними областями характерною є крихка руйнація.

Зона крихкого руйнування формується під зерном в лунці переміщення зерна, а пластичні зони спостерігаються в навалах по межах лунки і там, де немає процесу різання зернами, що виступають над рівнем зв'язки, а є загладжування цих пластичних навалів зернами, які недостатньо для процесу різання виступають над зв'язкою або нахилені не назустріч процесу різання, коли відбувається їх пружне втискання в зв'язку.

Таким чином, для областей критичної та закритичної продуктивностей оброблення характерною є переважна наявність на оброблюваній поверхні пластичних зон. Оскільки в лунках руху зерен переважно відбувається крихка руйнація, то важливо, щоб це не призводило до формування тріщин. Для крихких матеріалів довжина тріщин залежить до певної міри від висотних показників шорсткості оброблюваної поверхні, тому, навіть якщо ми потрапляємо в зону закритичної продуктивності, то основна увага – забезпечити низьку шорсткість оброблюваної поверхні.

Поверхні керамік, що утворюються при невеликій продуктивності їх оброблення та з переважним крихким формуванням їх поверхонь, є більш зносостійкими, ніж з подвійним механізмом їх формування. Порівняння даних за двома варіантами оброблення, що досить відрізняються за продуктивністю, в критичній і закритичній областях показує їх збіг.

Це означає, що навіть дворазове підвищення продуктивності, за відсутності сколів та дотримання однакової висоти нерівностей, ніяк не знижує зносостійкість керамік. Зазначене може бути основою розробки умов бездефектного, так званого в'язкого, шліфування керамік, коли оброблення переводиться відразу в зону наявності пластичності.

Як наслідок, це дозволяє вести оброблення з більш високою продуктивністю без істотної втрати якості виробів. Теоретичною основою цього може бути аналіз формули розрахунку величини критичної продуктивності, що показує, що з використанням алмазних кругів саме зниженням швидкості обертання круга можна перевести оброблення в зону пластичності. Однак при цьому для збереження значення величини критичної продуктивності необхідно знижувати зернистість зерен алмазу в крузі та збільшувати їх міцність з урахуванням одночасного підвищення утримання у зв'язці шляхом зміни зв'язки круга з полімерної на металеву.

Слід звернути увагу також на те, що при шліфуванні керамік шорсткість обробленої поверхні  $Ra$  зростає зі збільшенням зернистості порошку алмазу, поздовжньої та поперечної подачі і знижується з підвищенням швидкості круга. Тому в разі переведення оброблення в зону пластичності необхідно вжити заходів до зниження висотних параметрів шорсткості – наприклад, знизити ту ж саму зернистість або вибрати інший метод оброблення тощо.

В умовах пружного шліфування досліджено працездатність алмазних кругів на металевій (M1-10), полімерних (B2-01, B2-08) та металополімерній (B1-13) зв'язках.

При шліфуванні найбільш важкооброблюваної оксидної кераміки економічнішим є використання металевої або металополімерної зв'язки. Остання є більш прийнятною для умов прецизійного шліфування, оскільки має більшу зносостійкість, ніж полімерні, і

менш жорстка, ніж металеві. Порівняння оброблюваності керамік проводили при використанні алмазних кругів на зв'язці В1-13 з характеристикою 12А2-45 (150×10×3×32) мм – АС4 100/80ма 100 %.

З результатів, наведених у табл. 6.2, випливає, що при шліфуванні шаруватих керамік продуктивність шліфування нижче, а зношування кругів вище, ніж при обробленню оксидно-карбідних керамік.

Для умов шліфування оксидної кераміки на верстатах WBM 300/21 та Agathon-250 PL/CNC більш прийнятні круги на зв'язці В1-13, на верстаті МШ289 – круги на металевих зв'язках.

Необхідно відзначити, що тиск 2,0 МПа забезпечує досягнення високої продуктивності шліфування для шаруватих керамік з різальним шаром на основі оксидно-карбідних керамік, але є і певні особливості, характерні для них.

**Табл. 6.2. Порівняльні дані щодо оброблюваності керамік в умовах пружного шліфування**

Марка кераміки	Показник шліфування		
	продуктивність, мм <sup>3</sup> /хв	відносні витрати алмазу, мг/г	питома собівартість, грн/см <sup>3</sup>
Оксидна кераміка			
SPK (Німеччина)	88	1,37	58,14
ВО13	376	0,49	14,06
ЦМ332	994	1,64	6,35
Оксидно-карбідна кераміка			
ВОК71	3490	9,54	11,44
ВОК60	3197	4,50	6,28
Багатошарова кераміка			
ВОК95М	2503	12,27	15,73

Примітка: тиск притискання – 2,0 МПа; частота осциляції – 100 дв.х/хв.

Це пов'язано з тим, що при тиску більше 2,0 МПа спостерігаються відколи на краях пластин, тому ці кераміки бажано шліфувати при тиску не більше ніж 1,6 МПа, де якраз і спостерігається перегин у відносних витратах алмазів у кругах на відміну від оксидних керамік, де цей перегин спостерігається при вищому тиску.

Кераміка, на відміну від сталей, є структурно-нечутливим матеріалом, тому реальний контроль якості оброблення здійснюється за наявності сколів на кромках та шорсткості поверхні оброблення.

Поряд із працездатністю кругів важливим фактором є шорсткість поверхні після оброблення такими кругами. При цьому для кожного методу та верстата використовували алмазні круги з характеристикою, найбільш прийнятною за зносостійкістю круга та продуктивністю оброблення.

В цілому всі методи забезпечують, за рахунок оптимальної для кожного з них характеристики круга, приблизно однакову шорсткість. Виняток – пружне шліфування на верстатах МШ289 та WAM200, де оброблення проводиться без осциляції. При цьому менші значення кроку та висоти нерівностей забезпечує врізне шліфування, а більшу заповненість профілю нерівностей – пружне шліфування.

Проведеними дослідженнями встановлено, що з підвищенням тиску в зоні контакту при пружному шліфуванні кераміки існують умови досягнення мінімальної собівартості оброблення. При цьому підвищенням тиску продуктивність шліфування зростає, але оптимальна величина тиску обмежується собівартістю процесу шліфування. Для умов пружного шліфування оксидної кераміки найкращими є алмазні круга на металевій (M1-10) та металополімерній (B1-13) зв'язках, а для оксидно-карбідної кераміки – круги на металополімерній (B1-13) зв'язці. Для умов пружного шліфування собівартість оброблення зростає в наступному ряду керамік: оксидно-карбідна багат шарова оксидна.

Найменшу температуру в зоні оброблення забезпечують круги на полімерних зв'язках, більш високу – на керамічних та металевих. За рахунок вибору сполучного температуру можна знизити в 3-5 разів. Кераміку на оксидній основі можна обробляти кругами на металевих зв'язках, не побоюючись перегріву її поверхні.

Пошук шляхів вирішення питання забезпечення гарантованої зносостійкості кругів для шліфування керамік слід проводити на основі положення про критичну продуктивність оброблення. Що стосується процесів шліфування інструментальних керамік, які переважно обробляються комбінованим пружно-врізним способом, залежність для розрахунку критичної продуктивності має вигляд:

$$Q = k_F k_H k_{cp} [B(D-B)H_P v_K] / (56,25 k_C D Z H_M) \quad (6.15)$$

де  $k_F$  – коефіцієнт, що враховує формозміну різальної поверхні круга;  $k_H$  – коефіцієнт, що враховує положення зерен НТМ у різальному шарі круга;  $k_{cp}$  – коефіцієнт, що враховує зміну площі зрізу зерном НТМ, викликане реальним становищем зерен;  $B$  – ширина різальної поверхні круга;  $D$  – зовнішній діаметр круга;  $H_P$  – міцність (руйнівне навантаження зерен НТМ);  $v_K$  – окружна швидкість обертання круга;  $k_C$  – коефіцієнт, що враховує стиснення зерен НТМ;  $Z$  – зернистість НТМ;  $H_M$  – твердість оброблюваного матеріалу.

Аналіз залежності показує, що зі зростанням твердості оброблюваного матеріалу значення критичної продуктивності має тенденцію до зниження, що призводить до підвищення зносу круга.

З підвищенням твердості керамік процес різання утруднюється – знос кругів і потужність шліфування зростають – у наведеній формулі оброблюваний матеріал представлений твердістю за Віккерсом НМ-10<sup>6</sup> МПа і для керамічних матеріалів, твердість яких оцінюється за шкалою HRA, формула перерахунку має вигляд:

$$H_M = -14582,93 + 249,83 \text{ HRA}. \quad (6.16)$$

Пружно-врізне шліфування реалізовано при обробленні опорних поверхонь керамічних різальних пластин на верстаті моделі WBM 300/21 в умовах двостороннього шліфування кругами 503D – (500 × 40 × 4 × 380) мм – D151–B75B28 (виробництва фірми 6A2 (500×40×4×380) мм – AC4 100/80 (160/125) – B1-13 100 %.

Режими шліфування:  $v_{кр} = 18$  м/с, швидкість врізування – 2...3 мм/хв, осциляція – 29 дв.х/хв.

Круги із зернистістю порошоків алмазу 125/100 і 160/125 на зв'язці B1-13 забезпечують більш високу продуктивність шліфування (в 1,2 рази) у порівнянні з кругами фірми «Wendt» та кругами на зв'язці марки B2-01 (табл. 6.3).

Алмазні круги із зернистістю порошоків алмазу 100/80 та 125/100 забезпечують і більш високу зносостійкість кругів (до 2,0 разів) у порівнянні з кругами фірми «Wendt».

Крім того, встановлено, що значення максимальної висоти нерівностей оброблюваної поверхні ( $R_{max}$ ) керамічних пластин при шліфуванні кругами фірми Wendt вище в 1,18 рази, ніж при шліфуванні запропонованими кругами.

Це означає, що ймовірність виникнення тріщин і сколів у першому випадку вища. Зношування алмазних кругів при шліфуванні керамік переважно визначається впливом шламу на зв'язку круга.

Дослідження процесу доведення кераміки на основі карбіду бору показали, що чим більша зернистість частинок алмазу в пасті, тим вищою має бути величина концентрації алмазів. Це викликано тим, що знімання припуску при доведенні відбувається в результаті мікродрапання окремими зернами і кількість зерен більш впливає на процес оброблення, ніж їх розмір.

При доведенні куль у кільцевих канавках цей ефект не проявляється внаслідок оброблення при більш високих притискних тисках і низьких швидкостях просковзування, що призводить до інтенсивного дроблення зерен алмазів в процесі оброблення. Використання порошків алмазу зернистістю менше 7/5 не призводить до суттєвого поліпшення точності оброблення та зменшення шорсткості обробленої поверхні.

**Табл. 6.3. Продуктивність алмазних кругів 6A2 500 при шліфуванні кераміки ВOK60**

Характеристика круга	Кількість пластин, оброблених кругом за період стійкості, тис. шт.	Продуктивність шліфування, мм <sup>3</sup> /хв	Відносні витрати алмазу, мг/г
D151 – D28D75 («Wendt»)	8...10	6856	11,91
AC4 100/80ма – B2-01 100 %	1,2...3,0	6850	16,48
AC4 100/80ма – B1-13 100%	8...10	6856	5,94
AC4 125/100ма – B1-13 100%	4...6	7940	8,65
AC4 160/125ма – B1-13 100%	4...6	7940	11,92

Порівняльні дослідження шорсткості поверхні керамічних куль після доведення, проведені з використанням профілактографа Talysurf 5M-1120 фірми Rank Taylor Hobson (Англія), показали, що в залежності від матеріалу куль (сталь ШХ15, кераміка ZrO<sub>2</sub>, В<sub>4</sub>С, SiC) ці показники виробників можуть відрізнятися і досить значно.

Встановлені закономірності, і навіть вивчення працездатності алмазних кругів під час шліфування різальної кераміки дозволили розробити ефективні технологічні процеси шліфування. Вони дають можливість порівняно з базовою технологією підвищити продуктивність оброблення в 1,3 рази, знизити витрату алмазу на цих операціях в 1,5...2,5 рази та підвищити на 5 % вихід придатних виробів, досягти шорсткості поверхні за параметром *Ra* в межах 0 08...016 мкм.

#### 6.2.4. Оброблення магнітотвердих сплавів

При досить високій продуктивності (1380 мм<sup>3</sup>/хв) процесу шліфування магнітів з найбільш складного сплаву типу ЮНДК саме алмазне шліфування з охолодженням забезпечує відсутність сколів і тріщин на обробленій поверхні магнітів. У той самий час

у цьому випадку необхідно застосовувати алмазні круги, які забезпечують за інших рівних умов найменші сили у зоні різання.

Магнітотверді сплави є крихкими і схильні до сколів при обробленні, тому визначення характеристик алмазних кругів і режимів шліфування, що забезпечують за інших рівних умов найменші сили різання, дуже актуальне.

На першому етапі дослідження визначали силові показники процесу шліфування алмазними кругами на різних зв'язках. При обробленні магнітних сплавів за критерієм найменшої сили різання ефективна полімерна зв'язка В1-11П.

Круги на керамічній зв'язці СК6 також забезпечують малі сили різання, але питома інтенсивність шліфування ними невисока, а питома робота при їх застосуванні більша, ніж в кругів інших зв'язках. Неприйнятним є і використання інструменту на металоолімерних зв'язках через підвищену силу різання, малу питому інтенсивність шліфування та утворення сколів по кромках виробів. Поряд із зв'язкою кругів, на силові показники при шліфуванні магнітних сплавів істотно впливає покриття на зернах алмазу.

У разі оброблення сплавів типу ЮНДК кругами на зв'язці В1-11П з різними покриттями на зернах алмазу найкращі показники забезпечують круги зі склопокриття або без покриття. Застосування алмазного інструменту з металопокриттям допустиме, проте при цьому можливе виникнення сколів по краях оброблюваного виробу.

Це видно з отриманих при тих самих режимах даних табл.6.4.

**Табл. 6.4. Ефективність оброблення магнітотвердих сплавів**

Покриття	Сила різання, Н	Питома потужність шліфування, (Вт·хв)/мм <sup>3</sup>	Питома інтенсивність шліфування $Q_{уд}$ , мм <sup>3</sup> /(хв·Н)	$f_a$
Без покриття	308,8	1,06	7,7	0,23
Металізоване агреговане (МАН)	343,5	0,99	3,4	0,14
Нікелеве (М)	249,6	0,91	5,0	0,22
Склопокриття (С)	233,3	0,97	10,4	0,26.

Зі зростанням швидкості круга сила різання та величина  $f_a$  знижуються.

На основі результатів досліджень можна зробити висновок, що для забезпечення найменшого силового навантаження в зоні шліфування магнітотвердих сплавів необхідно застосовувати круги з порошками алмазу на полімерній зв'язці В1-11П без покриття (або зі склопокриттям).

Це означає, що для ефективного оброблення магнітотвердих сплавів необхідно прагнути до того, щоб забезпечити, в першу чергу високу різальну здатність кругів, що обумовлюється хорошим виступом зерен із зв'язки.

Крім основних показників дефектності, таких як сколи, припали та мікротріщини, важливо враховувати також і формування відповідної шорсткості обробленої поверхні магнітів.

Виявлено, що зниження швидкості круга з 30 до 15 м/с мало впливає на шорсткість обробленої поверхні. Необхідно враховувати також, що шліфування магнітів кругами на

металевих зв'язках призводить до підвищення шорсткості в 14...18 рази в порівнянні з кругами на полімерних зв'язках.

Для оброблення магнітотвердих сплавів типу ЮНДК, а також інших відомих крихких матеріалів характерні показники ефективності табл. 6.5.

### 6.3. Прецизійне правлення абразивних інструментів

Технологічні методи правлення абразивних кругів правлячими інструментами різних конструкцій і типів поділяються на механічні та спеціальні.

**Табл. 6.5. Порівняння ефективності оброблення різних класів матеріалів**

Оброблюваний матеріал	Питома потужність шліфування, (Вт·хв)/мм <sup>3</sup>	$fa$
Магнітні сплави типу ЮНДК	1,03...2,25	0,18...0,33
Тверді сплави	0,84...1,01	0,30...0,37
Оксидно-карбідна кераміка	0,55...0,76	0,23...0,32.

Механічні методи правлення кругів включають точіння та шліфування і можуть проводитися з поздовжньої, поперечної і тангенціальної подачами.

До шліфування відноситься і правлення кругів із застосуванням вільного абразиву. Механічні методи включають також правку, засновану на поверхневому деформуванні робочої поверхні круга (РПК) (накочування або обкатування), в результаті з РПК видаляється затуплений і засмальцьований шар абразиву.

*Правлення методом точіння* виконують однокристалними (різці, голки, алмази в оправках, пластини) або багатокристалними (гребінки, олівці, бруски) інструментами.

Головний рух виконує шліфувальний круг, що поддається правленню, а рух подачі – правлячий інструмент або круг (залежно від кінематичних особливостей верстата).

Правлення точінням полягає в тому, що правлячий інструмент із відносно високою швидкістю проводить руйнування та видалення з РПК затуплених та металізованих абразивних зерен, зв'язки, а також металевої стружки та шламу, накопичених в порах та міжзеренному просторі круга.

Режими правлення методом точіння алмазними різцями, олівцями, гребінками та алмазами в оправках при їх роботі в автоматичному та неавтоматичному циклі наведені в табл. 6.6.

Як видно, збільшення подач при правленні для всіх розглянутих видів шліфування підвищує шорсткість оброблених поверхонь.

Правлення алмазними правлячими брусками здійснюється зазвичай на плоскошліфувальних верстатах. Брусок з профілем, який відповідає профілю шліфуємої деталі, закріплюється на столі верстата або в спеціальному пристосуванні. Шліфувальний круг при кожному поздовжньому ході стола та подачі на глибину входить в контакт з бруском, який за рахунок тангенціальної подачі постійно відновлює робочий профіль та різальні властивості абразивного інструменту. Такий метод правлення, що виключає втрати часу виконання цієї операції, сприяє істотному підвищенню продуктивності оброблення.

Більше того, застосування правлячих брусків дозволяє підвищити продуктивність правлення в 3...4 рази порівняно з алмазними олівцями. При цьому значно підвищується точність правлення профілю, не гірше 1 мкм.

**Табл.6.6. Режими правлення абразивних кругів алмазними різцями, олівцями, гребінками і алмазами в оправках**

Вид шліфування	Шорсткість шліфуваних поверхонь $Ra$ , мкм	Режим правки	
		поздовжня подача, м/хв	поперечна подача, мм/дв. хід
<b>Автоматичний цикл</b>			
Кругле зовнішнє врізне	0,8	0,20...0,30	0,02...0,03
	0,4	0,10...0,15	0,02...0,03
	0,2	0,05...0,08	0,01...0,02
Бесцентрове на прохід	0,4	0,10...0,15	0,02...0,03
	0,2	0,08...0,10	0,02...0,03
	0,1	0,05...0,08	0,01...0,02
Бесцентрове врізне	0,4	0,07...0,15	0,02...0,03
	0,2	0,05...0,08	0,01...0,02
Внутрішнє	0,8	2,00...3,00	0,02...0,03
	0,4	1,00...2,00	0,02...0,03
Плоске торцем круга	0,4	0,15...0,20	0,02...0,03
Різьбошліфування	0,8	0,08...0,15	0,01...0,02
	0,4	0,05...0,08	0,01...0,02
Шліцешліфування	0,8	0,50...0,70	0,02...0,03
	0,4	0,30...0,50	0,02...0,03
Профільне	0,8	0,20...0,30	0,02...0,03
	0,4	0,10...0,15	0,01...0,02
	0,2	0,08...0,10	0,01...0,02
<b>Неавтоматичний цикл</b>			
Кругле зовнішнє на прохід	0,8	0,30...0,40	0,010
	0,4	0,40...0,30	0,010
	0,2	0,10...0,20	0,010
	0,1	0,05...0,10	0,005
Кругле зовнішнє врізне	0,8	0,15...0,25	0,010
	0,4	0,08...0,15	0,010
	0,2	0,05...0,08	0,005
Внутрішнє	0,8	2,00...3,00	0,100
	0,4	1,00...2,00	0,005
Плоске	0,8	0,60...0,80	0,010
	0,4	0,40...0,60	0,010
	0,2	0,20...0,40	0,005

Примітка. При неавтоматичному циклі правлення поперечна подача вказана для тонкої правки, для грубої правлення вона становить 0,02...0,03 мм/дв.хід.

Розроблено правлячі бруски фасонного профілю, виготовлені методом гальванопластики, призначені для застосування, наприклад, у дрібносерійному виробництві деревообробних твердосплавних фрез.

Така ресурсозберігаюча альтернатива алмазним роликам виглядає особливо перспективною для таких галузей промисловості, як турбіно-, двигуно- та авіабудування.

Економічність використання брусків обумовлена значно меншою їх вартістю та відсутністю необхідності використання спеціального дорогих верстатів для глибокого шліфування. Технологічні причини полягають у тому, що, при забезпеченні тієї ж якості та продуктивності оброблення, для операцій правленняправлячими брусками можна застосовувати плоско- і круглошліфувальні верстати.

Схема правлення допускає значні варіації і виключає надання додаткового обертання інструменту, як у випадку з АР, і, як наслідок, додаткового биття інструменту, що викликається як ексцентриситетом шпинделя, так і, нехай досить точно, – за класом точності G1 або ISO 1940/1, – але не ідеальним балансуваннямправлячого пристосування.

Для правки сегментних кругів розроблені алмазні бруски, оснащені великими алмазами масою 0,05–0,10 карата. Рекомендується наступний режим правлення такими брусками: поперечна подача 0,04 мм/хід, поздовжня – 0,75 м/хв.

Зазначені умови оброблення забезпечують отримання шорсткості шліфованої деталі  $Ra$  0,63, а точність оброблення – 0,015...0,020 мм.

*Правлення методом шліфування* полягає в тому, що видалення з РПК дефектного шару проводиться за рахунок зрізання, дроблення та сколювання затуплених абразивних зеренправлячим інструментом, якому надається примусове обертання з окружною швидкістю меншою, ніж окружна швидкість круга, що піддається правці.

Напрями обертанняправлячого та абразивного інструменту можуть збігатися або бути зустрічними. У першому випадку нижче питома витрата алмазів, у другому – кінцева шорсткість шліфованої поверхні виробу. Якправлячий інструмент для правки методом шліфування використовуються АР і круги з карбиду кремнію зернистістю 50...160, твердістю Т–ЧТ, діаметром 60...150 мм.

Результати досліджень вказують на існування нової ефективної області режимів правлення АР (супутнє різання зі ставленням окружних швидкостей заправляюваних круга і ролика  $q = 0,6$ ), що забезпечує істотне (до 60%) зниження питомих витрат алмазів при підвищенні продуктивності оброблення.

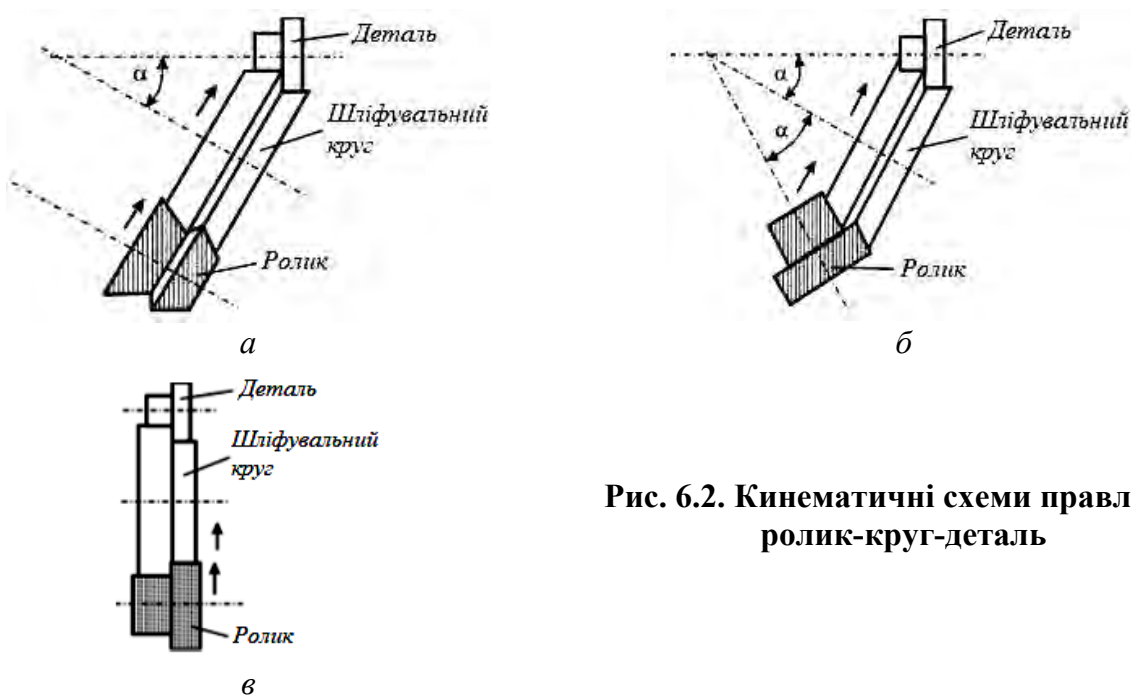
У цьому випадку має бути забезпечене примусове обертання АР зі швидкістю більшою, ніж окружна швидкість оброблюваного круга. У сучасному великосерійному та масовому виробництві особливо широко використовують АР, за допомогою яких реалізують такі кінематичні способи правлення шліфуванням:

- правлення кругів прямого профілю роликом, який також має прямий профіль – осі круга та ролика паралельні;
- поздовжнє правлення круга по копіру роликом прямого профілю – осі круга ролика розташовані в різних площинах і перпендикулярні один одному;
- профільне правлення круга по копіру фасонним роликом – осі круга і ролика лежать в одній площині і можуть бути паралельні або розташовуватися під кутом (залежно від геометричної форми оброблюваної деталі);
- профільне правлення круга методом врізання – осі круга та ролика лежать в одній площині та паралельні один одному;
- профільне правлення круга методом врізання – осі круга та ролика лежать в одній площині під кутом один до одного;
- профільне правлення круга методом врізання – осі круга і ролика лежать в одній площині, паралельні один одному, але розташовані під кутом до осі деталі, що шліфується;
- профільне правлення круга блоком роликів – осі круга та роликів лежать в одній площині та паралельні один одному;

- профільне правлення круга роликом з тангенціальною подачею по дузі круга – осі круга та ролика лежать в одній миттєвій площині та паралельні один одному;
- профільне правлення круга роликом з тангенціальною подачею, спрямованою по дотичній до периферії круга – осі круга та ролика лежать в одній миттєвій площині та паралельні один одному;
- профільне правлення круга роликом з тангенціальною подачею – осі круга та ролика лежать у перпендикулярних площинах.

На рис. 6.2, *a-в* схематично представлені три основні кінематичні схеми правлення ролик-круг-деталь, що застосовуються на практиці.

Як видно з рисунка, форма ролика змінюється лише зі схеми на рис. 6.2, *a*, у той час, як для двох інших схем у нього та ж сама форма, що відповідає формі оброблюваної деталі. З використанням схем, представлених на рис. 6.2, *a* і *б*, шліфувальний круг працює краще на торцях деталі, уникаючи при цьому припалів, які з'являються, якщо застосовується схема на рис. 6.2 *в*.



**Рис. 6.2. Кінематичні схеми правлення ролик-круг-деталь**

Кут  $\alpha$  для схеми на рис. 6.2, *a* може змінюватись у певних межах і, як наслідок, змінювати форму ролика.

У разі показаному на рис. 6.2, *б* кути повинні бути рівні між собою; величина  $26^{\circ}34'$  зустрічається досить часто, оскільки тангенс цього кута дорівнює 0,5. Як це можна помітити, напрямок переміщення ролик-круг відбувається завжди за вектором, перпендикулярним осі обертання круга.

Правлення методом обкатування є процес дроблення та сколювання абразивних зерен на РПК правлячим інструментом, що отримує обертання від контакту зі шліфувальним кругом. Як правлячі інструменти застосовуються круги з карбиду кремнію з характеристикою 54С80-ПВТ-ЧТ7К5, твердосплавні монолітні ролики, а також крупнозернисті ролики на металевій зв'язці.

Цим способом правлення може проводитися, коли осі круга і правлячого інструменту лежать в одній площині або розташовуються в перетинаючихся площинах.

Метод із застосуванням безалмазних правлячих інструментів використовується для виконання попереднього правлення великогабаритних недостатньо збалансованих кругів, коли існує необхідність знімати з РПК відносно великий шар абразивного матеріалу.

*Правлення методом накочування* є процесом дроблення абразивних зерен і зв'язки при повільному обертанні круга та правлячого інструменту, в якості якого застосовуються сталеві накатні ролики.

Цей метод використовується тільки для правлення профільних шліфувальних кругів. Накочування виконується при окружній швидкості 0,5...1,5 м/с із поперечною подачею 0,01...0,05 мм/хв. Обертання надається кругу або ролику (залежно від конструкції шліфувального верстату).

Профільювання накатними роликами характеризується високою різальною здатністю виправленого круга та простотою оснастки. Для виготовлення накатних роликів застосовуються сталі марок 45 і 40Х (30...32 HRC), а також У8А, У10А, ХГ (60...64 HRC).

Діаметр ролика  $d_p$  вибирається із співвідношення  $d_p = (0,2...0,25)D$ , де  $D$  – діаметр шліфувального колу.

Метод пластичного деформування застосовується для утворення робочого профілю на алмазних черв'ячних та багатониткових кругах, що використовують для різьбо- та зубошліфування, і полягає в тому, що профіль круга накочується – деформується накатним роликом, що є кільцевою рейкою.

Здійснення методу можливе в тому випадку, коли для алмазних кругів застосовується високопластична зв'язка, що витримує без руйнування осад при стисканні до 40...60 %. Дослідження показали, що метод пластичного деформування профілю алмазних кругів перспективний при обробленні тврдосплавних різьбоутворювальних та дрібномодульних зубообробних інструментів.

Важливим технологічним та економічним завданням є встановлення мінімального припуску, що знімається з круга при правленні, оскільки на правлення витрачається від 40 до 80% (а в деяких випадках до 90...95%) корисного об'єму шліфувального інструменту.

Стійкість правлених кругів залежить від величини знятої при правленні шару абразиву. Залежність ця не монотонна – зі збільшенням товщини знятого шару до певної межі стійкість кругів зростає, це свідчить про те, що відбувається інтенсивне відновлення різальних властивостей інструменту. При подальшому зростанні товщини знятого шару стійкість кругів не змінюється.

Так, наприклад, для відновлення різальних властивостей електрокорундового круга зернистістю 40 достатньо зняти шар завтовшки 0,05...0,07 мм, а круга зернистістю 16 – 0,03...0,04 мм. Видалення шару більшої товщини призводить до невиправданих витрат часу та коштів.

Стійкість профілю інструменту між правками залежно від умов оброблення та шліфованого матеріалу може становити десятки і тисячі виготовлених виробів.

Використання в процесі шліфування профільних інструментів із НТМ (алмазних кругів, правлячих роликів, гребінок, брусків тощо) забезпечує високопродуктивне виготовлення у масовому виробництві найбільш трудомістких і точних деталей, наприклад, замків лопаток турбін, кулькових гвинтових пар, шестерень, деталей підшипників, плунжерів, клапанів, валів-роторів електродвигунів, розподільчих та колінчастих валів та інших трудомістких деталей машин та приладів.

Оброблення складнопрофільних поверхонь з прецизійною точністю здійснюється на стандартному шліфувальному обладнанні шляхом переміщення фасонного інструменту в

радіальному напрямку, що забезпечує стабільність розмірів та якість оброблених виробів. Шліфування деталей здійснюється одночасно по всьому контуру, можлива одночасне оброблення координатно-пов'язаних між собою поверхонь при використанні блоків кругів, при цьому продуктивність зростає у 8...10 разів.

#### 6.4. Комбінована оброблення

Перспективними варіантами комбінованого оброблення є методи оброблення, в яких механічна дія при абразивному різанні алмазними інструментами об'єднана з електроерозійним, електроіскровим або електрохімічним впливом в контактній зоні.

У комбінованих методах механічного оброблення ролі складових процесу суміщеного знімання оброблюваного матеріалу розподіляються наступним чином: переважно абразивно-механічне знімання інструментом з НТМ і додаткове знімання, пов'язане з впливом електричного струму в різних варіантах. Якість обробленої поверхні в таких процесах визначається насамперед алмазним шліфуванням.

Сутність *електрохімічного шліфування* кругами із НТМ полягає у поєднанні електрохімічного розчинення оброблюваного матеріалу з механічним впливом на нього зерен надтвердих матеріалів. Алмазні зерна-діелектрики забезпечують зазор між кругом і виробом 0,015...0,025 мм, а низька напруга джерела струму (5...10 В) сприяє протіканню електрохімічних процесів. Як технологічне середовище використовують водні розчини насичених електролітів ( $\text{NaNO}_3$  (100 г/л) +  $\text{NaCl}$  (50–100 г/л) тощо).

Практика показала, що електрохімічні процеси ефективні за невисокої продуктивності знімання матеріалу алмазними зернами (до  $100 \text{ мм}^3/\text{хв}$ ). З її підвищенням різко зростає інтенсивність електроконтактних процесів, що викликано наявністю великої кількості стружки в зазорі між оброблюваною поверхнею і поверхнею круга. Ефективність електрохімічних процесів при цьому знижується майже нуля. Крім того, суттєвим недоліком електрохімічного шліфування є проблема утилізації насичених електролітів.

Оскільки в реальних процесах шліфування матеріалів кругами з НТМ продуктивність оброблення знаходиться в межах від 500 до  $2000 \text{ мм}^3/\text{хв}$ , то найбільшого поширення у виробництві набув такий різновид електрохімічного шліфування, як електроалмазне шліфування або електрошліфування (ЕШ).

Сутність останнього полягає в тому, що електрохімічні процеси розглядаються не як засіб для знімання матеріалу, а виключно як процеси, що регулюють різальну здатність шліфувальних кругів із НТМ, яка, у свою чергу, забезпечується електроконтактними процесами замикання зазора стружкою. В цьому випадку як електроліт можна використовувати ненасичені склади:  $\text{NaNO}_3$  (10...30 г/л) +  $\text{NaNO}_2$  (2 г/л) з добавкою інших солей (1...2 г/л).

Електрошліфування має такі переваги порівняно із звичайним шліфуванням:

- продуктивність оброблення підвищується у 1,5...2,0 рази;
- зносостійкість алмазних кругів зростає у 2...4 рази;
- відсутні негативні зміни у структурі поверхневого шару оброблюваного матеріалу;
- можна вести високопродуктивне оброблення важкооброблюваних матеріалів.

Сутність електроерозійного шліфування кругами із НТМ полягає в тому, що в зоні шліфування в міжелектродному проміжку збуджуються електророзряди джерела імпульсного технологічного струму. Як такі джерела використовують генератори, які викликають у робочій зоні розряди частотою в декілька кГц, тривалістю від одиниці до

декількох десятків мікросекунд при амплітудному значенні напруги від 60 до 150 В і забезпечують прямий пробій проміжку між кругом і оброблюваним виробом.

Спеціально для електроерозійного шліфування створені низькочастотні генератори типу ІТТ з частотою 50 Гц і амплітудною напругою 5...10 В.

Характерним для процесів електроерозійного шліфування (ЕЕШ) є те, що для впливу розряду на зв'язку круга підключають позитивний полюс джерела струму до круга, а негативний до оброблюваного виробу. Міжелектродний проміжок у цьому випадку може заповнюватись будь-якою технологічною рідиною, переважно на водній основі. Основна роль електророзрядів полягає у підтримці високої різальної здатності кругів. Переваги електроерозійного шліфування порівняно із звичайним шліфуванням кругами із НТМ:

- підвищення (від 3 до 7 разів) продуктивності оброблення;
- можна працювати кругами на будь-яких електропровідних зв'язках;
- менші витрати потужності на процес оброблення.

Потрібно мати на увазі, що процес ЕЕШ характеризується інтенсифікацією зносу кругів із НТМ. Так, хоча при шліфуванні швидкорізальної сталі кругами з сВН продуктивність і збільшується в 2 рази, проте до 4 разів підвищується знос круга, а собівартість оброблення майже в 3 рази ніж при пружному електрошліфуванні.

Іншим недоліком ЕЕШ є те, що при впливі електричних розрядів на оброблювану поверхню таких матеріалів, як тверді безвольфрамові сплави, магнітотверді сплави, оксидно-карбідна кераміка, можуть виникати тріщини і сколи. Крім того, після цього процесу шорсткість обробленої поверхні вища, ніж при звичайному шліфуванні кругами із НТМ або при електрошліфуванні.

Врахування електроконтактних процесів при зносі кругів дозволило одержати для умов електрошліфування залежність розрахунку відносних витрат  $q_p$  НТМ у міліграмах на грам в кругах:

$$q_p = \frac{\alpha_3 I_k^2 R_k + \beta_3 I_k U}{0,568 \alpha_3 K^{-1} \gamma_{св} \gamma_m k_{зз} k_k k_3 R_k Q [c(T_{пл} - T_{св}) + L](1 - K/400)}, \quad (6.17)$$

де  $\alpha_3$  – коефіцієнт, що відображає частку електричної енергії, яка витрачається на нагрівання та розплавлення контактуючих матеріалів у місці їх безпосереднього контакту;  $I_k$  – сила струму, А;  $R_k$  – електричний опір круга, Ом;  $\beta_3$  – коефіцієнт, що відображає частку електричної енергії, яка витрачається на нагрівання та розплавлення матеріалів від електричної дуги при розриві контакту;  $U$  – напруга, що подається на електроди;  $K$  – відносна концентрація НТМ у різальному шарі круга, %;  $\gamma_m$  – щільність оброблюваного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_{св}$  – щільність зв'язки, кг/м<sup>3</sup>;  $k_k$  – коефіцієнт, який відображає частку різальної поверхні круга, що у контакті з матеріалом під час оброблення і знімає припуск на оброблення;  $k_3$  – коефіцієнт вмісту за масою електропровідних компонентів у зв'язці;  $k_{зз}$  – коефіцієнт, що відображає частку руйнування зв'язки круга за рахунок електроерозії;  $Q$  – продуктивність шліфування, м<sup>3</sup>/с;  $c$  – питома теплоємність зв'язки круга, Дж/(кг·К);  $L$  – прихована теплота плавлення матеріалу зв'язки, Дж/кг;  $T_{пл}$  – температура плавлення зв'язки, К;  $T_{св}$  – середнє значення температури зв'язки, що встановилася при електрошліфуванні, К.

За знос кругів відповідальні параметри, пов'язані з їх електрофізичними ( $k_k$ ,  $k_3$ ,  $k_{зз}$  – коефіцієнти, що враховують відповідно частину різальної поверхні круга, відповідальну за знімання припуску, вміст електропровідних компонентів у зв'язці та частку електроерозійного руйнування зв'язки;  $R_k$  – електричний опір круга) та теплофізичними

( $c$  і  $L$  – питома масова теплоємність та прихована теплота плавлення матеріалу зв'язки;  $T_{пл}$  – температура плавлення зв'язки) характеристиками.

Для досягнення ефективного оброблення кругами з НТМ інструментальних матеріалів, що особливо містять карбіди металів  $IVb-Vb$  підгруп, необхідно реалізувати процес електрошліфування, в якому виключено негативну дію як інтенсивних електрохімічних, так і інтенсивних електрофізичних процесів.

Оскільки інколи інтенсивності електрохімічних електродних процесів в умовах електрошліфування кругами з НТМ недостатньо для досягнення відчутних показників анодного розчинення, але цілком достатньо для поляризації поверхонь анода і катода, формування на них плівок та зміни, тим самим, умов електрофізичного контактування електродів, висунута концепція поділу спрямованості механічних, електрохімічних та електрофізичних процесів при електрошліфуванні різних матеріалів таким чином, щоб механічні процеси різання зернами були спрямовані виключно на знімання оброблюваного матеріалу, ерозійні – виключно на підтримку високої різальної здатності круга, а електрохімічні – як процеси електродної поляризації, тобто як регулюючі.

Тим самим, для зазначеної вище групи матеріалів максимально усувається негативна дія електроерозійних процесів на оброблювану поверхню, а позитивна дія спрямована на усунення контакту зв'язки і оброблюваного матеріалу в зоні оброблення.

В цих умовах забезпечується підвищення продуктивності оброблення без погіршення якості обробленої поверхні.

Режими електрошліфування деталей з вольфрамових та безвольфрамових твердих сплавів, швидкорізальних сталей, окисно-карбідної кераміки, магнітотвердих сплавів – швидкість обертання круга – 25...30 м/с, глибина шліфування – 0,5 мм, поздовжня подача – 0,3...1,0 м/хв.

Технологічні рідини – для електрошліфування твердих сплавів – азотнокислий натрій (5,0 мас. %) і азотистокислий (0,2 %), нікель азотнокислий (0,5 %); для електрошліфування безвольфрамових твердих сплавів – азотнокислий натрій (4,0 мас. %) і азотистокислий (0,2 %), бромистий амоній (0,2 %) і гліцерин (0,5 %).

Продуктивність оброблення 1500...2500 мм<sup>3</sup>/хв, відносні витрати НТМ 1...3 мг/г, шорсткість обробленої поверхні  $Ra$  0,32...0,64. Режими електроерозійного шліфування деталей з твердих вольфрамових сплавів і швидкорізальних сталей: – швидкість обертання круга – 25...30 м/с, глибина шліфування – 0,5 мм, поздовжня подача – 0,3...1,0 м/хв. Технологічні рідини – азотнокислий натрій (1,0 мас. %) і азотистокислий (0,2%).

Продуктивність оброблення 2000...3500 мм<sup>3</sup>/хв, відносні витрати НТМ 3...7 мг/г, шорсткість обробленої поверхні  $Ra$  0,50...0,90.

## 6.5. Фінішні методи оброблення

### 6.5.1. Суперфінішування

Суперфінішування – це процес оздоблювального оброблення поверхонь деталей дрібнозернистими алмазними або  $cBN$ -брусками на металічній, керамічній і органічній зв'язках.

Процес суперфінішування заснований на принципі обертального руху оброблюваної деталі, поступального руху інструменту (бруска) вздовж виробу з накладанням коливального руху з частотою 500...3000 подвійних ходів за 1 хв та амплітудою 2...5 мм. Контакт інструменту та деталі відбувається по поверхні. Особливістю суперфінішування є зменшення інтенсивності знімання матеріалу після зняття гребінців вихідної

шорсткості деталі. Тому величина знімання припуску обмежена і, як правило, не перевищує 0,005...0,010 мм на діаметр.

Суперфінішування дозволяє значно знизити шорсткість поверхні (до 0,01 мкм). Крім того, можна зменшити хвилястість (з 1...3 до 0,05...0,20 мкм) та огранювання (з 3...5 до 0,2...1,0 мкм).

Суперфінішування застосовують для покращення експлуатаційних властивостей деталей, що працюють в умовах тертя, ковзання та кочення, оскільки з його допомогою можна отримати шорсткість поверхні в межах  $Ra$  0,05...1,00 практично без хвилястості, з мінімальним огранюванням (0,5 мкм); видалити дефектний поверхневий шар металу, що утворився при шліфуванні, і досягти його зміцнення без будь-яких структурних змін.

Деталі суперфінішують після шліфування, а ті з них, які не піддавалися термообробленню – після чистового та тонкого точення на спеціальних суперфінішних верстатах або на універсальних токарних та шліфувальних верстатах із встановленими на них головками вібраторів.

Прийнято розрізняти два основні різновиди процесу: суперфінішування з пружним притиском і розмірне суперфінішування (мікрофінішування).

При суперфінішуванні з пружним притиском  $P$  використовується пружина, пневмоциліндр або гідроциліндр. У цьому випадку інструмент самовстановлюється на поверхні деталі і такі похибки форми, як овальність, конусність, бочкоподібність і сідлоподібність не виправляються.

При розмірному суперфінішуванні брусок притискається до деталі безпосередньо гідроциліндром або через жорсткі проміжні ланки (наприклад, клиноважільний механізм). Шляхом підбору відповідної характеристики та регулювання режимів у процесі оброблення забезпечують безперервність знімання в часі і тим самим видаляють необхідний припуск (до 0,03...0,05 мм на діаметр). При цьому повністю або частково знімається дефектний шар, що залишився від попереднього оброблення, а також зменшується некруглість на 20...80% (залежно від виду похибки).

Хвилястість практично повністю ліквідується (до 0,05...0,20 мкм), огранювання зменшується до 0,2...0,7 мкм, овальність виправляється меншою мірою. Конусність, бочкоподібність та сідлоподібність зберігаються. Внаслідок зниження шорсткості та видалення хвилястості несуча поверхня зростає до 95 %.

У всіх випадках використання суперфінішних брусків точність деталей у поздовжньому перерізі (конусність, бочкоподібність та сідлоподібність) повинна бути забезпечена на попередніх операціях. При цьому необхідно враховувати технологічні можливості обраного різновиду процесу суперфінішування, схеми оброблення та характеристики брусків. При обробленню деталей врізанням алмазними брусками на металевій зв'язці різномірність діаметрів заготовок не повинна перевищувати 0,03 мм.

В іншому випадку вони погано приробляються з кожної наступної деталі.

При безцентровому суперфінішному обробленні на прохід розкид діаметра заготовок не повинен перевищувати 75% величини припуску, що знімається, інакше деталі менших діаметрів будуть лише частково суперфінішовані, а на деталях великих діаметрів утворюються завали кромки.

Припуск на суперфінішування має бути більшим за висоту вихідної шорсткості та хвилястості. Величину його на діаметр встановлюють із співвідношення  $\Delta = 5Rz$ , де  $\Delta$  – припуск на діаметр мкм.

При суперфінішуванні сталевих загартованих деталей з  $Ra$  0,2...0,5 припуск зазвичай знаходиться в межах допуску на розмір. При цьому припуск на

суперфінішування не залишають. Точність діаметра, отримана шліфуванням, після суперфінішування, як правило, зберігається.

При обробленні деталей з вихідною шорсткістю  $Ra$  0,5...1,0, а також при необхідності видалити дефектний шар після шліфування, слід передбачати припуск на суперфінішування.

На сучасних суперфінішних верстатах швидкість коливального руху становить 8...15 м/хв (частота коливань бруска дорівнює 1500...2500 дв.хід/хв) при амплітуді  $A = 2...3$  мм.

Для визначення швидкості коливального руху  $v_{\text{кол}}$  бруска користуються наступною формулою:

$$v_{\text{кол}} = \frac{2An_{\text{к}}}{1000}, \quad (6.18)$$

де  $n_{\text{к}}$  – частота коливань бруска, дв. хід/хв;  $A$  – амплітуда коливань бруска, мм.

Швидкість обертання деталі  $v_{\text{вр}}$  вибирають, виходячи із забезпечення необхідного кута сітки  $\alpha$ , що визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{v_{\text{вр}}}{v_{\text{кол}}}. \quad (6.19)$$

Інтенсивність знімання металу максимальна і найбільше самозагострення алмазно-абразивних брусків відбувається при  $\alpha = 40...50^\circ$  (при  $v_{\text{вр}} = (8...15) V_{\text{кол}}$ , м/хв). Цей режим оброблення рекомендується для зняття брусками необхідного припуску та отримання шорсткості поверхні  $Ra$  0,08...0,16 мкм.

Для забезпечення нижчої шорсткості поверхні суперфінішування ведуть при кутах сітки  $\alpha = 60...88^\circ$ , для чого швидкість обертання деталі збільшують у 2...10 разів і більше (80...120 м/хв). При цьому бруски полірують поверхню, що обробляється, практично не знімаючи металу. Щоб уникнути засолювання брусків, рекомендується працювати при  $v_{\text{вр}}$  не більше 30...40 м/хв. Швидкість поздовжнього зворотно-поступального руху бруска або деталі – 0,3...2 м/хв.

Значення тисків притиску при суперфінішуванні алмазними брусками на зв'язці M2-01 має перевищувати 0,78...0,98 МПа, а на зв'язці M2-08 – 1,47 МПа.

### 6.5.2 Хонінгування

Хонінгування – процес остаточного оброблення внутрішніх циліндричних та конічних поверхонь, який дає можливість виправляти геометричну форму, підвищувати точність розмірів та зменшувати шорсткість оброблюваних поверхонь. Хонінгування виконують алмазно-абразивними брусками, рухомо закріпленими в пазах хонінгувальної головки.

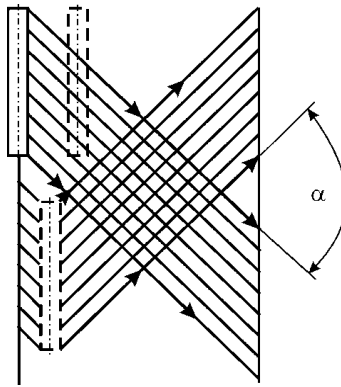
Хонінгувальні бруски в процесі хонінгування обертаються щодо осі хонінгувального інструменту, здійснюють поздовжній рух та поперечну подачу, що викликається дією радіальних сил, які розтискають алмазно-абразивні бруски.

Сукупність цих трьох рухів створює умови для зрізання мікронерівності, що залишилися після попередньої операції. Для найбільш продуктивного хонінгування необхідно, щоб сліди траєкторій різальних кромок взаємно перетиналися під значним кутом, так як при цьому зменшується ковзання різальних зерен по старих канавках і створюються кращі умови для зрізання мікроступів.

Виникаючий між напрямками рисок кут повинен становити приблизно  $45^\circ$ , тобто величини обертальної та зворотно-поступальної швидкостей повинні бути приблизно рівними. Однак практика показує, що при схрещуванні рисок під прямим кутом

підвищується знос брусків. Це пояснюється змінним характером навантаження на різальні зерна у процесі перетину ними западин і напливів мікрорельєфу. Найбільш економічний кут сітки, при якому досягають найменші питомі витрати алмазів –  $60...80^\circ$  (рис. 6.3).

При хонінгуванні швидкість різання зазвичай становить  $50...100$  м/хв, тобто. у  $20...40$  разів менше, ніж при шліфуванні. За такої малої швидкості температура в зоні хонінгування підвищується лише до  $50...100$  °С, вихідна твердість і структура поверхні зберігаються.



**Рис. 6.3. Сліди траєкторій різальних зерен при алмазному хонінгуванні у вигляді сітки**

У процесі хонінгування інструмент і деталь самовстановлюються, що забезпечує високу точність оброблених отворів. При цьому також відпадає необхідність правки інструменту, а припуски можуть бути зведені до мінімуму. Однак у деяких випадках різальна здатність брусків з плином часу в результаті засолювання (налипаня продуктів оброблення) різко знижується, і відбувається задирання оброблювальних поверхонь.

Щоб швидко відновити різальну здатність, рекомендується періодично змінювати напрямок обертання хонінгальної головки (реверсування). Періодичність цієї операції встановлюють експериментально в залежності від ступеня затуплення брусків.

Залежно від виду хонінгування виходять різні мікропрофілі поверхонь і, відповідно, досягаються різні експлуатаційні показники виробів.

Прогресивним кроком у розвитку алмазного хонінгування гільз циліндрів двигунів внутрішнього згорання стала технологія плосковершинного хонінгування (ПВХ), що забезпечує формування на обробленій поверхні мікропрофілю, що складається з плоских виступів, що чергуються, і заглиблень для розміщення мастила. Створення маслоємного профілю, що має велику опорну площу контакту, дозволяє істотно скоротити період припрацювання, зменшити витрату масла, а також значно збільшити ресурс двигуна за рахунок підвищення зносостійкості гільз циліндрів. Мікропрофіль поверхні, обробленої ПВХ, має такі параметри: відносна опорна довжина профілю  $50...60\%$  на рівні  $1...2$  мкм, глибина масляних кишень  $2,5...10$  мкм, ширина  $15...30$  мкм.

Формування нерівностей профілю відбувається на операції попереднього хонінгування алмазними брусками зернистістю  $125/100...250/200$  на металевій зв'язці. На другому етапі оброблення мікрорельєф обробленої поверхні притуплюється брусками меншої зернистості на еластичній зв'язці каучуковмісної Р11, що мають так звану локальну еластичність, що забезпечує пружне віджимання алмазних зерен під дією сил мікрорізання. Встановлено, що зносостійкість плосковершинної поверхні з

оптимальним мікропрофілем в 10 і більше разів вище, ніж поверхні з однорідною шорсткістю  $Ra$  0,16...0,32 а період припрацювання скорочується в 2 рази.

Розвитком алмазного плосковершинного хонінгування у вказаному напрямку став метод плосковершинного антифрикційного хонінгування (ПВАХ), сутність якого полягає в наступному.

До нанесення твердозмашувального покриття (ТСП) поверхня гільзи циліндра обробляється методом ПВХ. Отримуваний в результаті послідовних операцій чорного хонінгування крупнозернистими (125/100...160/125) брусками і чистового хонінгування дрібнозернистими брусками (14/10...20/14) на металевій зв'язці М5-04 мікрорельєф являє собою чергування глибоких рисок збільшують необхідну відносну опорну довжину профілю. Далі проводять нанесення фрикційним методом припрацювального ТСП встановленими в хонінгувальній головці брусками, що складаються з композиційного матеріалу конструкційного характеру, одержуваного шляхом спікання. В склад матеріалу входять мідь, цинк, графіт, дисульфід молібдену та інші компоненти.

Оптимальний мікропрофіль плосковершинної поверхні, за рекомендаціями провідних машинобудівних підприємств та зарубіжних фірм, визначається такими параметрами:

– ширина западин, мкм	10...100
– глибина западин, мкм	3,0...7,0
– шорсткість гільз циліндрів у зоні верхньої мертвої точки $Ra$ , мкм	0,6...1,0
– шорсткість гільз циліндріву зоні нижньої мертвої точки $Ra$ , мкм	0,5...0,7
– кут нахилу рисок до твірної гільзи, град	55...65
– відносна опорна довжина профілю лише на рівні, що дорівнює 1 мкм, %	50...80.

Рекомендований плосковершинний мікрорельєф робочої поверхні гільз формується за рахунок розробленої технології алмазного хонінгування з нанесенням антифрикційного покриття, яка забезпечує повне відновлення працездатності гільз циліндрів при ремонті, виключає припали поршневих кілець, задираки, покращує припрацювання циліндро-поршневої групи. .

Процес оброблення прецизійних отворів в деталях паливної апаратури (втулках плунжерних пар паливних насосів діаметром 8...12 мм) здійснюється одно- та двобрусковими хонголівками.

В умовах серійного виробництва на заводах паливної апаратури, як правило, реалізується схема плаваючого кріплення заготовки і жорсткого кріплення хонголівки в шпинделі, що обертається, хонінгувального верстата. Бруски працюють в умовах самозаточування і не вимагають правки.

Співвідношення швидкостей обертального та зворотно-поступального рухів при обробленні сталей вибирається з розрахунку отримання кута перетину рисок на оброблюваній поверхні в межах 65...75°.

Виходячи з цього частота обертання шпинделя – 315...500 об/хв, частота зворотно-поступального руху – 60...100 дв.хід/хв, тиск на бруски –  $(1...4) \cdot 10^{-3}$  МПа (за балансом продуктивності та стійкості) .

Остаточне доведення отворів проводиться у дві-три операції притирами з пастою КТ на основі карбиду титану зернистістю 5/3...10/7.

Застосування алмазних паст не рекомендується через інтенсивне шаржування поверхні, що обробляється, і високого зносу готових деталей в процесі експлуатації.

Після остаточного доведення відхилення геометричної форми отвору вбирається у 0,5 мкм на діаметр і шорсткість поверхні становить  $Ra$  0,02...0,04 мкм.

Ефективність алмазного хонінгування значною мірою пов'язана з властивостями мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ (МОТС). Це гасово-олійні фракції продуктів нафтопереробки або МОТС на водній основі.

Найбільш перспективні для процесів алмазного хонінгування чавунів, сталей та сплавів є напівсинтетичні та синтетичні МОТС на водній основі. МОТС на водній основі забезпечують зниження пожежонебезпечності виробництва, мають високі змочуючувальні, охолоджуючі, антикорозійні, миючі властивості, активно впливають на якісні показники поверхні деталі, що формується (шорсткість, зносостійкість, задиристійкість).

Миюча, диспергуюча та адсорбційна здатність МОТС визначається кінетикою, механізмами перетворення та деструкції їх компонентів в умовах високих температур та навантажень, транспортування продуктів деструкції, фізико-хімічними процесами взаємодії плазми, що виникає в зоні оброблення, з поверхнями, що контактують у процесі оброблення.

Правильний підбір МОТС для процесу хонінгування дозволяє підвищити задиристійкість та зносостійкість оброблених деталей до 2,5 разів.

### 6.5.3. Оброблення стрічками із НТМ та інструментами на їх основі

Інструменти на еластичних зв'язках мають велику працездатність за рахунок високих різальних властивостей зерен з НТМ і можливості управління кількістю зерен, що беруть активну участь у процесі різання, здатністю знижувати вібрації і великим терміном служби при експлуатації.

Залежно від призначень алмазних стрічок, вихідної та необхідної шорсткості обробленої поверхні експлуатувати інструменти необхідно із застосуванням МОТС, що запобігає розм'якшенню каучукових зв'язок, що мають деяку термопластичність. Еластичні зв'язки, що застосовуються, є міцними і досить стійкими до дії МОТС. Як МОТС застосовують водний розчин кальцинованої соди та нітриду натрію, а також розчин індустріальної олії та гасу. Правильний вибір МОТС при шліфуванні стрічками дозволяє не тільки відвести тепло із зони оброблення та видалити стружку, але й підвищити продуктивність оброблення, стійкість інструменту та значно покращити якість обробленої поверхні.

Шліфування профільних та циліндричних деталей із загартованих та легованих сталей стрічками АЛШБ з характеристиками АС2 63/50 В3-06 дозволяє отримати поверхню з шорсткістю  $Ra$  0,32...0,63. Оброблення виконується з продуктивністю ( $Q$ ) 150–200 мм<sup>3</sup>/хв, питома витрата алмазу ( $q$ ) – 9...12 мг/г.

Застосування при поліруванні стрічок з характеристиками АСМ 40/28 В3-06 забезпечує шорсткість обробленої поверхні  $Ra$  0,08...0,16 за  $Q = 30...60$  мм<sup>3</sup>/хв,  $q = 3...10$  мг/г. Після віброконтактного полірування АЛП при оптимальних режимах забезпечується шорсткість обробленої поверхні  $Ra$  0,04...0,08 при  $Q = 100...180$  мм<sup>3</sup>/хв,  $q = 16...25$  мг/г. При обробленні АТЛП зберігається геометрична точність профілю деталі, шорсткості обробленої поверхні становить  $Ra$  0,07...0,14, значно покращуються умови праці у зв'язку з відсутністю абразивного пилу та газів, що виділяються від підгоряння основи абразивних стрічок.

Оброблення алмазними стрічками на еластичних зв'язках проводиться на універсальних, спеціалізованих та спеціальних верстатах. У ряді випадків для оброблення

використовуються токарні, шліфувальні та верстати інших груп, модернізовані спеціальними швидкознімними пристроями, головками та іншими пристроями.

У масовому та великосерійному виробництві доцільно застосовувати спеціалізовані напівавтомати та автомати, що дозволяють отримувати значний економічний ефект за рахунок суміщення процесів, наприклад полірування та точення, автоматизації процесу та покращення якості оброблення.

За своїми технологічними можливостями оброблення інструменту зі стрічок типу АБШЕ та АБШЛ займає область між традиційним поліруванням алмазними еластичними стрічками та тонким шліфуванням. Обробляються вироби практично з будь-яких матеріалів, що застосовуються у машинобудуванні та ремонтному виробництві, включаючи наплавлені та напилені покриття високої твердості.

Зі стрічок АЛШЕ та АЛШЛ виготовляються спеціальні еластичні круга – стрічки наклеюється на цільний або збірний корпус круга клеєм на основі епоксидних смол.

При стрічковому шліфуванні та поліруванні характеристики стрічок та режими оброблення мають великий вплив на стан поверхневого шару оброблених виробів. Застосування стрічок різної зернистості на різних за еластичністю зв'язках дозволяє ефективно керувати параметрами шорсткості обробленої поверхні, забезпечуючи зниження висотних та збільшення структурних параметрів, зокрема її опорних характеристик.

У табл. 6.7 представлені технологічні можливості кругів, виготовлених з використанням стрічок АЛШЕ та АЛШЛ, щодо забезпечення шорсткості обробленої поверхні.

**Табл.6.7. Шорсткість оброблюваної поверхні від характеристики алмазних порошків**

Характеристика інструменту			Шорсткість поверхні $Ra$ , мкм	
Марка алмазу	Зернистість алмазу	Відносна концентрація алмазу	до оброблення	після оброблення
АСМ	40/28, 5/3	50	0,32...0,63	0,08...0,32
АС2, АС4	80/63, 63/50	100	0,63...1,25	0,32...0,63
АС6	100/80, 80/63	100	12,5...25,0	0,63...1,00
АС15	200/160, 125/100	100, 50	25,0...50,0	1,00...1,60

Особливо перспективно застосування кругів зі стрічок АКШ при шліфуванні газотермічних покриттів з твердих сплавів – при використанні стрічок з алмазом АС2 зернистістю 80/63 забезпечується шорсткість обробленої поверхні  $Ra$  0,25, стрічок з алмазом АСМ зернистістю 40/28.

На відміну від алмазних нескінченних і кінцевих стрічок, інструментом на основі стрічок АЛШЕ і АЛШЛ можна проводити розмірне оброблення циліндричних і плоских деталей – продуктивність оброблення досягає  $600 \text{ мм}^3/\text{хв}$ .

На фінішних операціях шліфування відносна витрата алмазу в інструменті становить 3,5...5,0 мг/г, а за шліфування без попередньої оброблення – 15...20 мг/г.

#### 6.5.4. Оброблення пелюстковими кругами

Пелюсточні круги знаходять застосування у різних галузях промисловості. Для зачистних, полірувальних та шліфувальних робіт використовують круги, які виготовляють із шліфувальної шкірки з карбіду кремнію, корунду, синтетичних алмазів та cBN.

Найбільш продуктивними є процеси оброблення деталей пелюстковими кругами форми 1A1 розміром 250×76×15 зі стрічок на каучукових зв'язках В3-10 та В3-06 з алмазами марок АС2 та АСМ зернистістю 50/40...40/28 100 %-ної концентрації.

Круги з кутами нахилу пелюсток від 15 до 90° дозволяють знизити шорсткість обробленої поверхні до  $Ra$  0,08...0,10. При цьому відносна витрата алмазу в інструменті знижується на 20...30% порівняно з обробленням інструментом з радіальним кріпленням пелюсток.

Залежно від конкретних умов оброблення застосування пелюсткових кругів дозволяє в широких межах варіювати такими показниками процесу, як знімання матеріалу, стійкість різального елемента, шорсткість поверхні, точність оброблення тощо. З цієї точки зору пелюсткові круги з регульованим нахилом абразивних елементів є «керованішими», так як конструктивні параметри, що легко змінюються, їх дають можливість змінювати працездатність інструменту в потрібному напрямку.

Знімання матеріалу під час полірування пелюстковими кругами проводився в межах дефектного поверхневого шару деталі, що сформувався при попередній операції.

Найбільш інтенсивно знімання матеріалу відбувається в початковий період оброблення ( $\tau < 15...30$  с), при цьому спостерігається значне зниження висоти мікронерівностей на обробленій поверхні. Надалі тривалість полірування не надає шорсткості поверхні деталі істотного впливу.

Особливістю пелюсткового круга і те, що з рахунок еластичності матеріалу пелюсток у процесі роботи мають місце пружні переміщення зерен абразиву. Завдяки цьому амортизується удар при врзанні в оброблювану деталь, у зерен є можливість самовстановлюватися по висоті і більш рівномірно розподіляти між собою навантаження.

Зміна площі контакту пелюсткового круга з виробом дає можливість керувати кількістю різальних елементів у зоні різання, розподілом теплового та силового навантажень та формуванням властивостей поверхневого шару оброблюваних деталей.

Особливо ефективно оброблення пелюстковими кругами деталей з фасонними поверхнями, виготовлених із пруткових та тонкостінних нежорстких заготовок – вали, осі, втулки, труби та інші вироби підприємств приладобудівної промисловості; матриці та пуансони штампів інструментального виробництва; ниткопровідники із зовнішньою робочою поверхнею текстильних машин тощо.

#### 6.5.5. Фінішне оброблення зубчастих коліс кругами із НТМ

Методи фінішного оброблення зубчастих коліс можна умовно поділити на дві основні групи.

Перша група – що забезпечують геометричну точність зубців, друга група – що забезпечують якість поверхні зубців.

Оздоблювальне оброблення зубців застосовується для коліс, що виготовляються за нормами 5-7 ступеня точності з шорсткістю бічних поверхонь не нижче 6 класу. Інструменти з НТМ застосовуються для оброблення термічно оброблених коліс – шліфування, зубохонінгування, полірування.

Хонінгування зубців дозволяє не тільки усувати видимі дефекти поверхні зубців (вибоїни, задирки), але й знизити похибки основного кроку та профілю, зменшити биття, а також підвищити частоту оброблення. При зубохонінгуванні відбувається взаємна обкатка колеса та інструменту із схрещуючимися осями, в результаті якої, за рахунок взаємного ковзання, знімається шар металу.

В результаті зубохонінгування знімається припуск із поверхні зубів (0,02...0,05 мм), час оброблення 0,25...1,00 хв. МОТС – гас, легке машинне масло. Режими оброблення: швидкість поздовжньої подачі  $v_{\text{прод}} = 90$  мм/хв;  $n = 1...2$  дв. хід/хв; сила притиску  $P_{\text{прит.}} = 20...50$  кгс.

Зубчасті колеса після хонінгування робочих поверхонь зубців мають точність в межах 6–7 ступенів і шорсткість поверхні  $Ra$  1,00...0,12, яка залежить від зернистості порошку алмазу в інструменті.

Циліндричні зубчасті колеса хонінгують на спеціальних зубохонінгувальних верстатах та на модернізованих зубошевінгувальних верстатах.

Зубошліфування є єдиним засобом, що забезпечує отримання високоточних зубчастих коліс із загартованими до великої твердості зубцями. При виготовленні точних зубчастих коліс, підданих хіміко-термічній обробленню, зубошліфування широко застосовується для чистового оброблення цементованих і загартованих зубців, що мають поверхневу твердість 58...63 HRC. При виготовленні зубчастих коліс з азотованими зубцями, що мають твердість 63...70 HRC, зубошліфування застосовується з метою усунення крихкої верхньої частини шару зубців та спотворень профілю, що виникають внаслідок збільшення об'єму поверхневих шарів зубців.

Фасонна форма робочих поверхонь круга, що працює методом копіювання, утворюється в процесі правки, причому алмази механізму правки здійснюють відносно круга рух, що відтворює евольвентний профіль зубців оброблюваного колеса. У процесі оброблення є відносний рух круга вздовж осі колеса, що забезпечує профілювання зубців по всій їх довжині. Після оброблення кожного зубця колесо повертається на кут, що відповідає одному або декільком зубцям (ділільний поворот). Цей спосіб зубошліфування в основному застосовується для оброблення циліндричних коліс з прямими зовнішніми зубцями з точністю не вище 6-го ступеня, шорсткість поверхні зуба в межах  $Ra$  1,25...0,32.

Шліфування за методом копіювання знайшло також застосування при виготовленні точних коліс.

Найбільш продуктивним способом зубошліфування метод обкату є шліфування методом безперервної обкатки черв'яком (верстати «Reishauer»). Шліфування зубців черв'яком дозволяє отримувати зубчасті колеса 5...6 ступеня точності з шорсткістю обробленої поверхні в межах  $Ra$  1,0...0,2.

Шліфування зубів методом обкатки з періодичним розподілом здійснюється одним конусним (верстати «Niles»), одним плоским кругом або двома тарілчастими кругами (верстати «MAAG»).

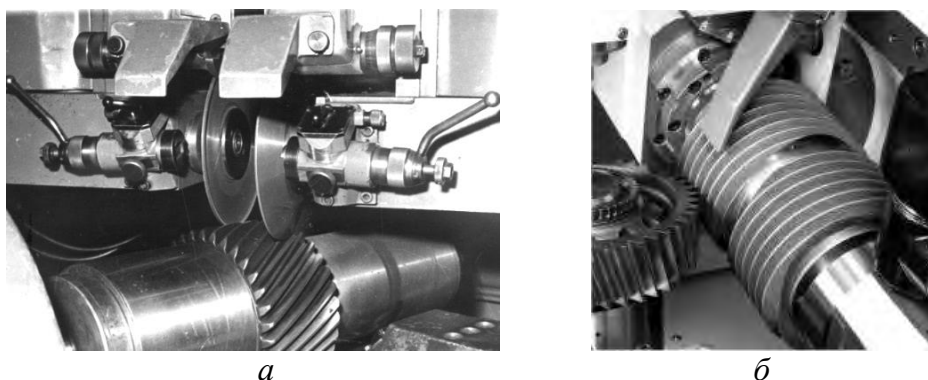
Точність зубчастих коліс, оброблених одним конусним кругом, знаходиться в межах 5-6 ступеня, а шорсткість поверхні – не більше  $Ra$  1,0...0,2. Оброблення плоским кругом дозволяє забезпечувати точність коліс у межах 3-4 ступеня точності та шорсткість поверхні  $Ra$  1,0...0,2. Зубошліфування двома тарілчастими кругами дозволяє отримувати зубчасті колеса 4-5 ступеня точності з шорсткістю поверхні  $Ra$  1,0...0,3. Режими зубошліфування коліс із загартованої сталі конічними кругами з cBN: окружна швидкість круга – 25...30 м/с; швидкість обкатки на чорнових проходах – 186...370 мм/хв, на чистових проходах – 76...150 мм/хв; число подвійних ходів штоселя за хвилину –

50...140; глибина шліфування на чорнових проходах – 0,05...0,15 мм; на чистових проходах – 0,01...0,015 мм.

Правку алмазного круга слід здійснювати кругом карбіду кремнію зеленого на керамічній зв'язці без охолодження за допомогою спеціальних пристроїв. Зернистістьправлячого круга має бути в два рази більше зернистості алмазного круга.

Режими зубошліфування коліс із загартованої сталі тарілчастими кругами з cBN окружна швидкість круга на чорнових та чистових проходах становить 25...35 м/с; поздовжня подача – 0,5...1,0 м / хв; глибина шліфування на чорнових проходах – 0,02...0,03 мм; на чистових проходах – 0,0025...0,005 мм; кількість циклів виходжування на чорнових проходах – 1...2, чистових проходах – 2...3.

На рис. 6.4, *а* показана зона шліфування при обробленні зубчастого колеса двома тарілчастими кругами, а на рис. 6.4, *б* показано шліфування зубчастих коліс профільними кругами фірми «Карр».



**Рис.6.4. Зона шліфування при обробленні зубчастого колеса двома тарілчастими кругами (*а*); шліфування зубчастих коліс профільними кругами фірми «Карр» (*б*)**

Тарілчасті круги з CBN забезпечують продуктивність оброблення в 1,5...2,0 рази вище в порівнянні зі шліфуванням абразивними кругами, відсутність "припалів" на поверхні зуба і можливість отримання зубчастих коліс 4-5-го ступеня точності з відключеними механізмами компенсації зносу кругів.

Потужність шліфування при використанні кругів із cBN менша на 20...30 %.

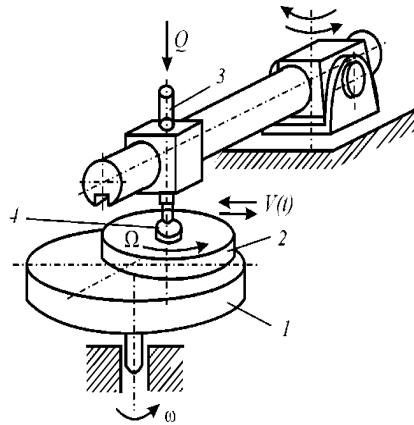
## 6.6. Доведення та полірування

### 6.6.1. Устаткування для доведення плоских поверхонь

Актуальною проблемою є вдосконалення методів алмазно-абразивного доведення та полірування прецизійних плоских поверхонь із конструкційних матеріалів [9]. Як правило, фінішне оброблення плоских прецизійних поверхонь подібних деталей виконують за методом вільного притирання при силовому замиканні кінематичної пари «інструмент-заготовка» та дотику її ланок по поверхні. Так, на полірувально-довідкових верстатах типу ПД або ШП, що мають повідковий виконавчий механізм (рис. 6.5), провідна нижня ланка 1 (заготовка) обертається, а верхня ведуча 2 (інструмент) здійснює разом з поводком 3 зворотно-поступальний рух подачі щодо нижнього, а також вільний обертальний рух, обумовлений тертям в контактні ланок 1 і 2.

Самоустановка верхньої ланки на нижній під дією сили  $Q$  здійснюється завдяки кульовому шарніру 4, що не перешкоджає вільному переміщенню верхньої ланки.

Управління процесом формоутворення засноване на уявленні про лінійну залежність швидкості знімання матеріалу від навантаження на кожній ділянці заготовки та від відносної швидкості ланок 1 і 2 на цій же ділянці.



**Рис. 6.5. Схема оброблення плоскої поверхні методом вільного притира:**

1 – заготовка; 2 – інструмент; 3 – поводок; 4 – кульовий шарнір

Багатофункціональність зв'язків між технологічними факторами процесу обумовлює безперервну зміну форми заготовки та інструменту в процесі їх взаємного притирання, тобто має місце не еквідистантне знімання припуску. Тому формоутворення прецизійної плоскої поверхні вимагає періодичного контролю її форми та відповідного коригування налаштувальних параметрів.

#### 6.6.2. Оброблення пастами та суспензіями

Для фінішного оброблення деталей зі сталей, сплавів та неметалічних матеріалів широко застосовуються пасти та суспензії із НТМ. Вони є складними багатокомпонентними структурованими системами, що складаються з порошків природного та синтетичного алмазу, СВН та основи – композиційної зв'язки.

Швидкість знімання матеріалу (зі зразків кремнієвих пластин) при поліруванні пастами із субмікропорошків природного та синтетичного алмазу наведено в табл. 6.8.

При контролі шорсткості поверхні матеріалів, обробленої пастами із НТМ, зразки повинні були мати якість поверхні нижче на один розряд у порівнянні з нормативною для даної зернистості пасти.

До основних факторів, що впливають на ефективність використання алмазних паст та суспензій для оброблення різних поверхонь, відносяться фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу, складу та властивості алмазних паст, суспензій, МОТС, матеріал та форма притирів, режими оброблення. Органічна основа (несуче робоче середовище) пасти або суспензії може бути моно- або полікомпонентною, що є в'язкопластичною середовищем або ньютонівською рідиною.

Оброблення різних поверхонь пастами та суспензіями із синтетичного алмазу – складний фізико- та хіміко-механічний процес.

Особливість взаємодії системи оброблювана деталь–паста (суспензія)–притир полягає в тому, що оброблювана поверхня, і поверхня притира контактують через

складну багатокомпонентну систему – пасту (суспензію), яка складається з твердих крихких частинок алмазу і в'язкої пластичної основи.

**Табл.6.8. Швидкість знімання матеріалу при поліруванні пастами з субмікропорошків алмазу**

Зернистість, мкм	Масова доля алмазу, %	Швидкість знімання матеріалу, мкм/хв не менше, пастами з субмікропорошків алмазу марок	
		АМ, АСМ1	АМ5, АСМ5
0,7/0,3	2	0,60	0,45
	5	0,70	0,50
	10	0,80	0,60
0,5/0,1	2	0,40	0,35
	5	0,45	0,40
	10	0,50	0,45
0,3/0	2	0,30	0,25
	5	0,35	0,30
	10	0,40	0,35
0,1/0	2	0,10	0,05
	5	0,12	0,07
	10	0,15	0,10

При обробленні зона контакту збагачується також дрібними частинками продуктів оброблення, що впливають на якість поверхні.

У процесі оброблення хімічні речовини основи паст та МОТС сприяють рівномірному розподілу алмазних зерен у зоні оброблення, виходу із зони осколків відпрацьованих зерен та стружки, а також регулюють температурний режим процесу.

Істотний вплив на процес оброблення має зернистість порошоків НТМ та їх масова частка в пасті, суспензії. Зі збільшенням зернистості знімання оброблюваного матеріалу збільшується, але шорсткість поверхні, як правило, зростає і навпаки, чим менше зернистість, тим вище якість поверхні, що обробляється.

Щоб скоротити час на доведення (притирання), алмазні паста застосовують лише після ретельного попереднього оброблення та очищення виробу.

Тверді і крихкі матеріали попередньо обробляють під доведення шліфувальними алмазними кругами відповідної зернистості. У тих випадках, коли форма оброблюваної поверхні не дозволяє застосувати плоске, кругле зовнішнє, внутрішнє і фасонне шліфування, користуються алмазними притирами. У решті випадків використовують той метод оброблення, який забезпечує отримання найкращої поверхні під доведення.

Шорсткість оброблюваної поверхні залежить в основному від зернистості паст, оброблюваного матеріалу та його твердості, матеріалу притиру. Тому зернистість алмазної паст та її витрати підбирають орієнтовно в залежності від необхідної шорсткості оброблюваної поверхні (табл. 6.9, 6.10).

Як матеріал притиру використовують чавун, сталь, латунь, мідь, фібру, деревину, шкіру, повсть, фетр тощо. Вибір притиру залежить від оброблюваного матеріалу, його твердості та необхідної шорсткості поверхні. Для здійснення доведення необхідно, щоб поверхня притира була шаржована абразивними зернами.

При виборі матеріалу притира керуються наступним (табл. 6.11) – чим глибші риски на поверхні від попереднього оброблення, тим більший припуск знімають при доведенні і

тим більше повинна бути зернистість застосовуваної алмазної пасти, твердіше притир. Якщо є алмазні пасти дрібних зернистостей і необхідно отримати високу якість оброблюваної поверхні, застосовують найбільш м'які притири. Використовуючи притири різної твердості, можна отримати різні результати за однієї і тієї ж зернистості.

**Табл.6.9. Норми витрат алмазних паст**

Тип оброблення	Зернистість, мкм	Шорсткість		Норма витрат алмазу, карат/см <sup>2</sup>
		до оброблення	поіля оброблення	
Черна доводка	50/40...125/100	1,25	1,25	0,050...0,010
Напівчистова доводка	14/10...60/40 10/7...40/28	0,200	0,200	0,030...0,007
Чистова доводка	3/2...14/10 2/1...10/7	0,063	0,063	0,020...0,005
Полірування	0,1/0...2/1 0,1/0...1/0	0,020	0,020	0,010...0,003

**Табл.6.10. Рекомендовані зернистості паст для отримання необхідної шорсткості поверхні**

Зернистість паст, мкм	Область використання	Припуск під оброблення, мм	Отримувана шорсткість поверхні, мкм
З шліфпорошків алмазу зернистістю 50/40...125/100	Чорнова доводка твердосплавних матриць та фільтер, притирання поверхонь	0,0600...0,12000	<i>Ra</i> 0,32...2,50
З мікропорошків алмазу зернистістю 1/0...60/40	Доводка та полірування твердих сплавів, неметалевих, чорних та кольорових металів	0,0005...0,0600	<i>Rz</i> 0,025...1,00
З субмікропорошків алмазу зернистістю 0,1/0...1/0,5	Остаточне полірування неметалічних матеріалів та кольорових металів	0,0001...0,0050	<i>Rz</i> 0,025...0,063

Важливим фактором є режим оброблення пастами і суспензіями з НТМ. При цьому в кожному конкретному випадку необхідно визначати тиск притира на частинки алмазу, швидкість його відносного переміщення, тривалість оброблення.

При раціональному тиску притира на алмазні зерна відбувається їх сколювання, тобто. самозагострення, що сприяє кращому згладжуванню мікронерівностей при обробленню відповідної поверхні. При подальшому підвищенні тиску на притирання зерна алмазу можуть інтенсивніше руйнуватися і втрачати свою працездатність.

Швидкість переміщення притира, полірувальника по відношенню до оброблюваної поверхні і тривалість оброблення встановлюються, як правило, дослідним шляхом з

урахуванням фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу, необхідної якості деталей і продуктивності процесу оброблення.

**Табл. 6.11. Пасти та суспензії, що застосовуються для оброблення різних матеріалів**

Назва	Зернистість, мкм	Оброблювані матеріали	Матеріал притира або полірувальника	Досяжна шорсткість поверхні
1	2	3	4	5
Пасти типу «О», мазеподібні, на органічній основі, що змиваються органічними розчинниками				
O <sub>1</sub>	14/10...5/3	Твердий сплав ВК6, нержавіюча і загатрована сталь	чавун СЧ18-36	<i>Ra</i> 0,04...0,08
O <sub>2</sub>	7/5...3/2	сталь, мідно-нікелеві сплави, латунь	чавун СЧ18-36, алюміній АД1, мідь М1, латунь ЛС59-1	<i>Ra</i> 0,03...0,05
	10/7...3/2	сталі 36НХТЮ	мідь М1, чавун СЧ18-36	
	10/7...5/3	алюмінієві, сплави, бронза БрОЦС5-5-5, вольфрам	чавун СЧ18-36, бронза БрОЦС5-5-5, твердий сплав ВК6	<i>Ra</i> 0,04...0,06
	1/0...0,5/0,1	сплави кольорових металів	пекоканіфольна смола	<i>Ra</i> 0,032...0,05
	14/10...3/2	тверді сплави ВК6, чавун СЧ18-36, загартована сталь, ніобієві сплави	чугун СЧ18-36, алюміній АД1, мідь М1	<i>Ra</i> 0,032...0,063
Пасти типу «ВО» універсальні, мазеподібні, що змиваються органічними розчинниками або водою				
ВО	10/7...3/2	молібден, сапфір	твердий сплав ВК6, мідь М1, бронза БрОФ10-1	<i>Ra</i> 0,032...0,063
ВО <sub>1</sub>	7/5...1/0	топаз, фіаніт	замша технічна, повсть, пекоканіфольна смола	<i>Rz</i> 0,04...0,08
ВО <sub>2</sub>	3/2–0,7/0,3	золото, срібло, платина	повсть технічна, замша технічна, батист, шовк	–
ВО <sub>5</sub>	5/3–1/0	нержавіюча сталь, сплави кольорових металів	чавун СЧ18-36, алюміній АД1, мідь М1	<i>Rz</i> 0,05–0,10

Закінчення табл. 6.11

1	2	3	4	5
Пасти типу «ВО» універсальні, тверді				
ВО	3/2, 2/1	яшма, янтарь, ізмурд	чавун мілкозернистий, капрон, повсть технічна	–
ВО <sub>3</sub>	5/3–2/1	полікорові поверхні, рубін, агат, аметист, корунд та інші камені- самоцвіти		Rz 0,04–0,08
Пасти типу «В», мазеподібні, що змиваються водою				
В <sub>1</sub>	3/2–1/0	напівпровід- никові матеріали	замша технічна, пекоканіфольна смола	Rz 0,032–0,063
	5/3–1/0	азотировані сталі, сплави кольорових металів		Rz 0,03–0,06
Суспензії типу «В», що змиваються водою та блискоутворюючі				
В <sub>13</sub>	3/2–0,3/0	сплави алюмінію	текстоліт Б, алюміній АД1, пекоканіфольна смола	Rz 0,032–0,063
	3/2–0,7/0,3	напівпровід- никові матеріали	замша технічна, пекоканіфольна смола	Rz 0,025–0,040
	2/1–0,7/0,3	мідь, її сплави, сплавів інших кольорових металів	замша технічна, латунь ЛС59-1, пекоканіфольна смола	–

Притир застосовують тільки для однієї зернистості. Для цього його маркують або фарбують у колір, наданий пасті даної зернистості. Доводка проводиться послідовно двома-трьома алмазними пастами з поступовим переходом від більшої до дрібнішої.

## 6.7. Оброблення скла

Залежно від вимог, що пред'являються до деталей зі скла, їх призначення та виду матеріалу, що обробляється (будівельно-архітектурне скло, піноскло, скляні труби, кварцове, світлотехнічне, оптичне і загартоване листове скло, триплекс і гнуте скло, хіміко-лабораторне, термометричне, медичне, електродне і художнє скло, тарне і сортове скло тощо) виконуються різні операції механічного оброблення (різання, свердління, грубе шліфування, тонке шліфування, супертонке шліфування, полірування тощо) за допомогою алмазних інструментів різних конструкцій.

Режими алмазного свердління скла вибираються в залежності від типу, розмірів та характеристики свердла, фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу

(коефіцієнта оброблюваності, мікротвердості) та вимог, що пред'являються до шорсткості обробленої поверхні.

Рекомендовані значення механічної подачі при свердлінні призначаються з урахуванням коефіцієнта оброблюваності і мікротвердості оброблюваного скла в порівнянні зі склом марки К8 ( $K = 1$ ). Частота обертання свердла може бути від 500 до 24000 об/хв, а величина подачі від 10 до 60 мм/хв.

Як МОТС при алмазному свердлінні використовується технічна вода, різні водні розчини емульсолів Е2, Е3, «Емус». Витрата МОТС встановлюється залежно від діаметра свердла і може становити величину від 1 л/хв (для свердл діаметром менше 5 мм) до 15 л/хв (для свердл великого діаметра).

У тих випадках, коли зі шматкового скла виготовляють круглі заготовки лінз або обробляють циліндричні бічні поверхні стрижнів оптичних квантових генераторів (ОКГ), 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 металічній зв'язці.

Кругле внутрішнє шліфування застосовується для оброблення внутрішніх циліндричних поверхонь отворів великих діаметрів після свердління або розточування. При виготовленні оптичних деталей цей процес можна використовувати для масового оброблення отворів лімбів та виробів із досить великими точними отворами. Для внутрішнього шліфування застосовують алмазні круги форми 1А1 невеликих розмірів, а оброблення отворів щодо малих діаметрів (щонайменше 10 мм) – круги форми А8.

Під час оброблення заготовок оптичних деталей плоске шліфування виконується торцем алмазного круга. Для цієї мети використовують алмазні круги на металічній зв'язці стандартних форм.

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

Отримання плоских базових поверхонь у пресованих заготовок зі скла можливе із застосуванням операції шліфування за методом жорстких осей, що забезпечує продуктивне оброблення виробів. При обробленні точних поверхонь оптичних деталей методом притиру використовують збірні алмазні шліфувальні круги. Ефективність роботи інструменту визначається інтенсивністю знімання оброблюваного матеріалу та зносостійкістю алмазозносного шару і може змінюватись в залежності від його характеристики, складу, конструкції, режимів оброблення, якості алмазного порошку та властивостей оброблюваного матеріалу. Для оцінки працездатності алмазного інструменту при обробленні 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 матеріалу, що обробляється) і вимірюється в грамах за хвилину або кубічних сантиметрах за хвилину.

Стійкість алмазного інструменту залежить безпосередньо від зносостійкості алмазозносного шару та властивостей оброблюваного матеріалу та визначається кількістю віддаленого матеріалу, що припадає на одиницю ваги витраченого алмазного порошку. Для практичних цілей при обробленні виробів із різних марок скла зручніше користуватися величиною, зворотньою стійкості – питомою витратою алмазного порошку.

При обробленні оптичного скла питомі витрати алмазного порошку прийнято виражати в каратах на кубічний дециметр знятого матеріалу. Випробування алмазного

інструменту для оброблення оптичного скла, як правило, виконують на зразках або виробках зі скла марки К8. До скла цієї марки відносяться норми питомих витрат алмазного порошку при виконанні різних операцій оброблення. Тому при переході від питомих витрат, віднесених до скла марки К8, до витрат при обробленні скла іншої марки, необхідно враховувати твердість його по зішліфуванню або інший показник оброблюваності щодо скла К8.

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

В залежності від швидкості обертання виробу при постійних значеннях швидкості обертання інструмента та величини осьової подачі можливі наступні варіанти.

При малій швидкості обертання виробу, тобто коли за один його оборот знімається шар порівняно великої товщини, основну роботу руйнування скла виконують зерна, що знаходяться на бічній циліндричній поверхні алмазоносного шару, площа якого досить велика. Алмазні зерна, що працюють по торцевій поверхні виробу, по суті, здійснюють її зачистку. При такому врізанні алмазний інструмент та скло сильно нагріваються, процес часто супроводжується появою іскор. При нагріванні можуть відбуватися згоряння алмазного порошку, розм'якшення скла та розплавлення зв'язки в поверхневих шарах, заповнення цими речовинами проміжків між зернами, працюючими по торцевій поверхні виробу, по суті, здійснюють її зачистку. При такому врізанні алмазний інструмент та скло сильно нагріваються, процес часто супроводжується появою іскор. При нагріванні можуть відбуватися згоряння алмазного порошку, розм'якшення скла та розплавлення зв'язки в поверхневих шарах, заповнення цими речовинами проміжків між зернами, «затуплення» зерен алмазного порошку і, в результаті – «засолювання» інструменту та втрата стабільності процесу диспергування скла.

При середній швидкості обертання виробу контакт між зернами і склом на бічній поверхні інструменту вже значно менший і зерна, розташовані на його торцевій частині, несуть більш значне навантаження, ніж у попередньому випадку. Умови роботи зерен дещо покращуються, але все ще мають місце явища, перелічені вище, хоч і меншій мірі.

При великій швидкості обертання виробу основну роботу диспергування здійснюють алмазні зерна, що знаходяться на торцевій частині інструмента. Між поверхнями скла та зв'язки інструмента утворюється зазор, тому продукти зносу безперешкодно відводяться, інтенсивно охолоджується і змащується зона контакту, зв'язка зношується в основному в результаті абразивного впливу на неї частинок диспергованого скла. Завдяки цьому створюються сприятливі умови самозаточування інструмента, різальні властивості зерен алмазного порошку використовуються найефективніше.

Такий процес можна назвати вільним різанням, тому що безпосередній контакт зі склом мають лише зерна алмазного порошку, які при цьому працюють як маленькі різці.

Оптимальні умови роботи інструменту виникають за режиму вільного різання. Для забезпечення такого режиму потрібно встановити необхідне значення величини глибини різання при роботі інструментів з різним по зернистості і концентрації алмазного порошку алмазоносним шаром. Для цього необхідно знати площу контакту робочої поверхні інструменту, кількість зерен алмазного порошку на площі контакту, величину частин зерен, що виступають, об'єм, займаний ними на площі контакту і об'єм знятого скла в межах площі контакту. Площа контакту алмазоносного шару з виробом залежить від форми та розмірів інструменту. Максимальна величина виступаючих частин зерен

алмазного порошку, відповідно до даних різних авторів, становить середньому 0,3 діаметра.

Загальновідома закономірність будь-якого виду абразивного оброблення, що полягає в тому, що зі збільшенням зернистості вільного або зв'язаного порошку зростає інтенсивність знімання матеріалу та збільшується ступінь шорсткості обробленої поверхні. Зі збільшенням концентрації алмазного порошку внаслідок збільшення кількості працюючих зерен знижуються величина складових сил різання, сила тертя, температура в зоні шліфування та лінійне зношування робочої поверхні інструменту. Зменшення зносу сприяє зниженню питомих витрат алмазного порошку.

Для кругів з алмазного порошку малих і великих зернистостей, а також низьких і високих концентрацій спостерігаються декілька різних закономірностей впливу зміни величини концентрації на продуктивність знімання матеріалу та глибину мікронерівностей обробленої поверхні. При обробленні дрібнозернистими кругами (з розміром алмазних зерен до 50 мкм) будь-якої відносної концентрації, а також кругами з алмазних зерен будь-яких зернистостей при відносній концентрації до 50 зі збільшенням концентрації продуктивність знімання матеріалу зростає і збільшується шорсткість обробленої поверхні.

При зернистості алмазного порошку понад 50 мкм і відносній концентрації понад 50 зі збільшенням концентрації зменшуються продуктивність знімання матеріалу та ступінь шорсткості обробленої поверхні.

Розмірна стійкість інструменту характеризується періодом роботи між правками.

У процесі шліфування поверхня алмазоносного шару інструменту змінює свою спочатку плоску форму, спрацьовується, утворюючи опуклу («горб») або увігнуту («яма») поверхню, що виправляється періодичною правкою його робочої поверхні. Зносостійкість інструменту в таких умовах, доцільно оцінювати за інтенсивністю зносу алмазоносного шару в зоні, величина зносу в якій максимальна, оскільки саме ця максимальна інтенсивність зносу алмазоносного шару визначає кількість необхідних правок за час роботи інструменту і, відповідно, його розмірну стійкість.

Оцінка величини коефіцієнта відносного зносу при алмазному шліфуванні плоских поверхонь оптичних деталей зі скла інструментами з різною конструкцією алмазоносного шару дозволяє зробити висновок про те, що між величиною коефіцієнтів відносного зносу інструментів і їх інтегральних коефіцієнтів заповнення існує зворотно-пропорційна залежність.

Звідси випливає, що інструменти з алмазоносним шаром, виконаним у вигляді логарифмічної спіралі, мають найбільшу продуктивність шліфування при мінімальній величині коефіцієнта відносного зносу.

Експериментально встановлено, що властивості зв'язки алмазного інструменту визначають продуктивність шліфування та стабільність його роботи. Істотною є залежність продуктивності алмазного шліфування оптичних деталей зі скла від тривалості процесу оброблення – продуктивність алмазного шліфування різна для інструментів на різних зв'язках і зменшується зі збільшенням його тривалості. Слід зазначити, що інструменти на металевих зв'язках, маючи значну величину продуктивності шліфування за перший цикл оброблення, досить швидко втрачають свої різальні властивості.

Шорсткість поверхонь оптичних деталей, оброблених інструментами на різних зв'язках оцінюється параметрами мікропрофілю, які у разі використання алмазних порошоків однакової зернистості (20/14) становлять:  $Ra$  0,25...0,28,  $R_{max}$  1,25...1,63.

Залежно від виду деталей зі скла, їх призначення та операції механічного оброблення (різання, свердління, шліфування, полірування тощо) використовується обладнання, яке можна умовно поділити на дві групи:

- металообробні верстати, за допомогою яких виконуються деякі загальні операції попереднього або чорного оброблення заготовок;
- спеціальні верстати, призначені для виконання специфічних операцій технологічного циклу виготовлення деталей зі скла.

### **6.8. Оброблення гуми, полімерних композиційних та деревних матеріалів**

Деталі з неметалічних композитів після формування піддаються механічному обробленню, що становить 10...50 % загальної трудомісткості виготовлення деталей. Найбільш поширені розрізання, шліфування та оброблення отворів.

Механічне оброблення шаруватих матеріалів пов'язана з рядом складнощів і недоліків, зокрема:

- швидке затуплення різального інструменту;
- великий шум та запилення робочого місця;
- можливість порушення структурної цілісності оброблюваної заготовки.

Застосування інструментів із НТМ дозволяє інтенсифікувати процеси розрізання та шліфування виробів із композиційних матеріалів (КМ) порівняно із застосуванням інших інструментальних матеріалів. Суцільна робоча поверхня інструментів забезпечує нижчу шорсткість обробленої поверхні, але спостерігається висока теплонапруженість процесу в зоні контакту інструменту з деталлю. Застосування переривчастої робочої поверхні дозволяє знизити нагрівання, покращити умови видалення шламу, підвищити працездатність інструменту.

Ефективність механічного оброблення різанням КМ алмазно-абразивними інструментами більшою мірою залежить від технологічного обладнання, надійності та зручності його експлуатації.

Модернізовані верстати та ручні пневматичні машини для розрізання КМ повинні мати регульовану частоту обертання шпинделя в діапазоні 3000...6000 хв<sup>-1</sup> та 4000...10000 хв<sup>-1</sup> відповідно, регульовану подачу в діапазоні 0,01...0,20 м/с (0,6...12 м/хв), можливість переміщення столу верстата або шпиндельної бабки по висоті ручним та механічним приводом. Модернізація технологічного обладнання та ручних пневматичних машин для шліфування КМ та стільникових заповнювачів включає можливість регулювання швидкості різання та подачі: частота обертання шпинделя – в діапазоні 2550...5000 хв<sup>-1</sup> та 8000...15000 хв<sup>-1</sup>, швидкість різання – 30...50 м/с, подача – 0,05...0,35 м/с (3...21 м/хв); можливість переміщення столу верстата по висоті ручним та механічним приводом.

Верстати та ручні пневматичні машини, модернізовані для виконання робіт при обробленню КМ алмазними шліфувальними головками, повинні мати регульовану частоту обертання шпинделя в діапазоні 12000...20000 хв<sup>-1</sup>.

Алмазно-абразивні інструменти для розрізання, шліфування та зачистки поверхонь виробів з КМ, зокрема, вугле-, органо-, склопластиків, стільникових заповнювачів та конструкцій з них повинні експлуатуватися за температури навколишнього середовища не вище 40 °С та відносної вологості повітря не більше 80%.

За критерій затуплення алмазно-абразивних інструментів при розрізанні та шліфуванні ПКМ прийнято технологічну ознаку – лінійне радіальне зношування робочих елементів інструменту. Через порівняно малу величину допустимого радіального зносу

алмазних зерен в інструменті і явно не рівномірного в радіальному напрямку зносу зв'язки перед передньою і вздовж бічних поверхонь зерна за термін служби інструменту, а також через «закритість» зони різання критерієм зносу алмазно-абразивного інструменту у виробничих умовах є припали обробленої поверхні, зміна ефективної потужності різання, зміна швидкості подачі, що легко контролюється за часом проходження деталі в зоні оброблення.

Через низьку теплостійкість оброблюваних матеріалів на основі синтетичних полімерних матриць, схильності їх до деструкції, особливо органічних волокнистих наповнювачів, раціональні режими різання слід призначати в наступній послідовності:

– розраховується швидкість різання:  $v = \pi Dn$ , де  $D$  – діаметр інструменту, м;  $n$  – число оборотів,  $\text{с}^{-1}$ ; – вибирається подача, виходячи, головним чином, з умови максимальної продуктивності та виконання технологічних вимог до якості та чистоти обробленої поверхні; – призначається глибина різання (у більшості випадків її слід вибирати такою, щоб весь припуск був знятий за один прохід, якщо це допускається технологічними вимогами чи іншими умовами оброблення).

Досить часто для виконання отворів значного діаметра (понад 5 мм) використовують кільцеві свердла з алмазовмісним шаром. Такі свердла забезпечують достатньо високу якість оброблення, не потребують використання потужних приводів, однак володіють малою продуктивністю. Іншою проблемою є те, що свердла не сприймають значних осьових навантажень, зняття алмазовмісним шаром оброблюваного матеріалу є досить малим і низькопродуктивним, а спроба підвищити продуктивність за рахунок збільшення зусилля подачі веде до перегріву самого свердла і його деформування.

Оброблення кільцевим алмазовмісним свердлом запропоновано здійснювати із циклічною подачею з частотою до 10...25 Гц – це призводить до часткового зменшення дефектного шару, однак із одночасним зменшенням зусилля різання на 35...40%, тобто можна припустити, що циклічне навантаження ініціює появу мікротріщин у тілі заготовки

Однією з трудомістких технологічних операцій абразивного оброблення є різання склопластику, текстоліту, гетинаксу, монолітної гуми та інших гумопластикових композитів. Серед різальних інструментів для виконання цієї операції ефективними є відрізні алмазні круги.

Вони застосовуються як на стаціонарному обладнанні для різання промислових форматів зазначених матеріалів, так і в ручних пневмо-електромашинках для збірних та робіт на монтажних і будівельних майданчиках.

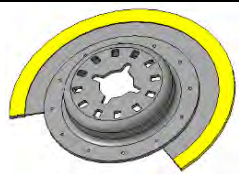



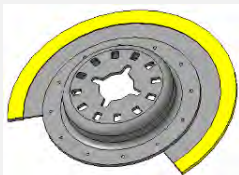



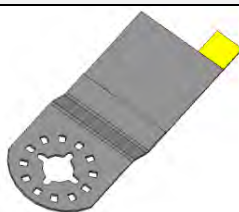

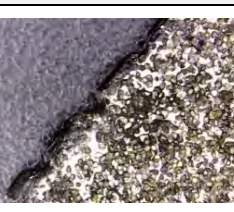
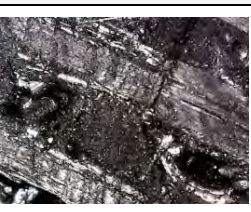



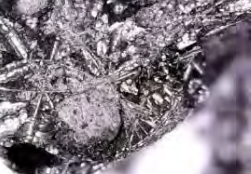
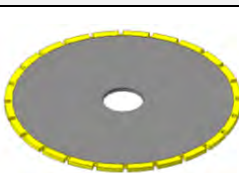



Застосування алмазних відрізнних кругів із переривчастою різальною частиною дозволяє до 40 % знизити теплонапруженість у зоні різання деревно-стружкових плит, склопластиків та текстолітів на підвищених режимах різання.

Застосування алмазних відрізнних кругів забезпечує точність та прямолінійність різку. Вони прості і надійні в експлуатації не потребують заточування та доведення, яке необхідне при роботі лезовим інструментом. Різання полімерних композитів товщиною до 30 мм здійснюється зі швидкістю різання 30...40 м/с і поздовжньою подачею 2...6 м/хв. Алмазні відрізнні круги мають високі різальні властивості та зносостійкість.

Термін служби їх у 20...30 разів вищий у твердосплавного лезового інструмента.

У табл. 6.12 наведено приклади деяких алмазних інструментів для розрізання карбон-карбонových и карбон-полимерных материалов, зміна стану їх робочих поверхонь у процесі експлуатації, отримана якість поверхні виробу.

**Табл. 6.12. Інструменти для розрізання карбон-карбонівих и карбон-полімерних матеріалів, зміна стану їх робочих поверхонь у процесі експлуатації, отримана якість поверхні виробу**

Інструмент	Стан робочої поверхні інструменту		Стан обробленої поверхні, х150
	до оброблення, х40	після оброблення, х40	
1	2	3	4
			
			
			
			
			

### **Контрольні запитання**

1. Особливості процесів оброблення інструментами із надтвердими матеріалами.
2. Процеси шліфування сталей і твердих сплавів.
3. Процеси шліфування керамічних і надтвердих матеріалів.
4. Правлення шліфувальних кругів.
5. Комбіноване шліфування.
6. Особливості фінішних процесів оброблення.
7. Оброблення інструментами зі стричок.
8. Оброблення зубчастих коліс.
9. Доведення та полірування.
10. Особливості оброблення неметалевих матеріалів.

## РОЗДІЛ 7 ОБРОБЛЕННЯ ЛЕЗОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ ТА ІНСТРУМЕНТОМ ДЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ

### 7.1. Оброблення інструментами з монокристалами природного алмазу

Рівень сил різання при алмазному точінні значно нижчий, ніж при обробленні іншими інструментами. При малих перерізах зрізу сила  $P_y$  може бути більше сили  $P_z$ , так як при малих товщинах зрізу процес різання визначається силами задньої поверхні інструменту, тобто. роботою тертя. Це пояснює превалююче зношування інструменту по задній поверхні.

Важливою особливістю алмазного точіння є порівняно мала зміна сил різання при зносі інструменту, що визначається малою зміною величини радіуса округлення різальної кромки при зносі інструмента. У зв'язку з тим, що в процесі роботи ділянка зносу по задній поверхні різця збільшується швидше, ніж сила, питоме навантаження на задній поверхні зі зносом інструменту знижується.

Зі зростанням швидкості різання до 2,5...3,3 м/с відбувається зниження сил різання, пов'язане зі зниженням інтенсивності утворення загальмованого шару металу на передній поверхні інструменту. Надалі зі збільшенням швидкості різання сили різання стабілізуються або незначно змінюються. Крива залежності сил різання від подачі має дві ділянки з точкою перегину в області 0,003...0,0045 мм/об, причому в лівій частині інтенсивність наростання сил різання суттєво вища.

Збільшення глибини різання практично прямолінійно пов'язані з зростанням сил різання. Найменша, у порівнянні з обробленням іншими матеріалами, робота різання при алмазному точінні визначає і менше тепловиділення. Висока теплопровідність алмазу забезпечує малі температури в зоні різання при точінні кольорових металів.

При практично використовуваних швидкостях різання середня температура в зоні різання рідко перевищує 473...523 К. Виняток становлять титанові сплави, при точінні яких температура об'ємі оброблюваного матеріалу досягає 973 К. Найбільший вплив на температуру надає швидкість різання. Як зазначалося раніше, основним джерелом тепла під час алмазної оброблення є тертя на задній поверхні інструменту.

При точінні кольорових металів низьке тепловиділення та малий нагрів деталі та інструменту дозволяють вести оброблення з максимальною точністю. У оброблюваному матеріалі не відбуваються структурно-фазові перетворення.

При точінні титанових сплавів температура нагрівання також не досягає значень, при яких починаються структурно-фазові зміни в обробляваному матеріалі. Для порівняння слід зазначити, що у разі застосування інструменту з твердого сплаву температура на передній і задній поверхнях відповідно на 62 і 34 % вище.

Баланс тепла для випадку точення титанового сплаву інструментом з алмазу та твердого сплаву, відповідно: у різець 71 та 49 %, у стружку 29 та 47 %, у виріб 0,3 та 4,2 %.

Таким чином, при алмазному точінні у виріб надходить значно менше тепла, ніж при точінні твердим сплавом. Це створює основу отримання малих температурних деформацій виробів у процесі оброблення. При цьому велика частка тепла, що відводиться в інструмент, не призводить до зниження точності виробу внаслідок малого лінійного розширення алмазу. Відносно низькі температури, що відповідають процесу оброблення, визначають значний резерв варіювання умов різання.

Застосування мастильно-охолодних технологічних середовищ (МОТС) знижує температуру різання на 25...50 %. Різні склади МОТС по-різному впливають на

температуру зоні різання. Знижуючи температуру оброблення, МОТС розширюють можливий діапазон оброблення алмазним інструментом.

Крім того, МОТС частково або повністю усуває вплив сил адгезії на контактних ділянках інструменту, зменшуючи інтенсивність утворення загальмованого шару та знижуючи силу тертя стружки про передню поверхню алмазного різця. Тому в багатьох випадках більше значення має не охолоджувальна, а змащувальна здатність середовища.

До таких середовищ відносяться олії низької в'язкості. Залежність висоти мікронерівності обробленої поверхні від умов точіння алмазним різцем має екстремальний характер. Збільшення шорсткості поверхні при малих значеннях швидкості різання та подачі пов'язане з інтенсифікацією процесу утворення та зриву наросту, а також вириванням частинок оброблюваного матеріалу з боку задньої поверхні інструменту. Зносостійкість алмазних різців неоднакова при обробленні різних матеріалів. Можна умовно поділити їх на чотири групи. При обробленні матеріалів першої групи (мідь, латунь, магній, дорогоцінні метали, бронза, алюміній, полімерні композиції, що не мають абразивних включень тощо) різці виходять з ладу внаслідок тривалого адгезійного зношування, а також випадкових причин – динамічного впливу вібрацій, ударів, випадкових включень у матеріалі тощо. Найбільш сприятливими властивостями з погляду мінімізації зносу інструменту при обробленні серед матеріалів першої групи мають мідні покриття, отримані гальванічним шляхом.

Друга група (мідні, алюмінієві сплави, полімерні композиційні матеріали, що містять абразивні частинки) обробляються з повільним зносом інструменту, пов'язаним з абразивною та адгезійною взаємодією контактуючих матеріалів.

Зношування інструменту при обробленні матеріалів цієї групи не пов'язане з підвищенням температури в зоні різання. Характерною особливістю зносу алмазних різців при обробленні матеріалів першої та другої груп є слабкий вплив швидкості різання на знос інструменту. Зношування визначається довжиною шляху різання.

Залежність, що зв'язує величину зношування інструменту по задній поверхні  $h_3$  при точінні міді з довжиною шляху різання  $L$  має вигляд:

$$h_3 = 0,00042L^{0,537} \quad (7.1)$$

Слід мати на увазі, що при алмазному точінні міді переважає знос по задній поверхні, а при точінні алюмінію інструмент зношується і по передній поверхні.

До третьої групи матеріалів відносяться титан, цирконій, їх сплави, вольфрам, тверді сплави, оброблення яких пов'язана з виникненням високих температур у зоні різання (873...973 К).

У четверту групу матеріалів входять залізо, нікель, кобальт та інші, що активно взаємодіють з вуглецем метали та метали, в яких вуглець розчиняється. Під час роботи врізанням будь-які зміни різальної кромки алмазного інструменту переносяться на оброблену поверхню в негативному відображенні.

У процесі оброблення дефекти (мікротріщини, сколи тощо) набивається ущільнений метал, який міцно утримується їх нерівностями. Ущільнений матеріал у мікротріщині різальної кромки різця починає деформувати м'якший оброблюваний матеріал і викликає появу кільцевих рисок, ширина яких дорівнює ширині мікродефекту на кромці. Зазвичай сколам на різальній кромці супроводжують мікротріщини, спрямовані в тіло різця.

Руйнування алмазних різців відбувається за наступною схемою: спочатку утворюються мікротріщини на різальній кромці, потім у дефект, що утворився, потрапляють мікрочастинки оброблюваного матеріалу, які, накопичуючись, будуть надавати розклинювальну дію і збільшувати величину мікротріщин, що викличе ще більше накопичення мікрочасток металу.

При досягненні певної величини частина цих частинок сколюється, несучи із собою мікрочастинки алмазу. Незважаючи на високу щільність алмазу, низькі коефіцієнт тертя та адгезійну здатність, високу чистоту робочих поверхонь у процесі різання в інтервалі швидкостей різання від 0,13 до 8,3 м/с утворюється загальмований шар та нарост.

Найбільш інтенсивно вони утворюються за швидкостей різання до 2,7 м/с. Міцність зчеплення загальмованого шару металу дуже висока і видалення його з передньої поверхні алмазного різця можливе лише розчиненням у 15% розчині  $\text{HNO}_3$ . Після видалення загальмованого шару з передньої поверхні різця не вдається виявити жодних слідів зміни поверхні. Це свідчить про те, що загальмований шар металу на алмазній поверхні різця утримується за рахунок сил адгезії.

Періодичні зриви наросту сприяють інтенсифікації зношування інструменту, що пов'язано з різким перерозподілом напружень у поверхневому шарі інструменту в момент зриву наросту та загальмованого шару. Зменшенню інтенсивності утворення загальмованого шару сприяє застосування МОТС – масел низької в'язкості, які зменшують тертя стружки об передню поверхню інструменту та зменшують інтенсивність адгезії між металом та алмазом. Застосування МОТС зменшує інтенсивність утворення загальмованого шару та наросту у 1,25...1,8 раза.

При обробленні з ударом інтенсивність утворення сколів та мікротріщин на різальній кромці різця збільшується в 10 і більше разів. В умовах переважає викришування різальної кромки не за рахунок адгезії, а за рахунок впливу ударного навантаження.

Якщо при обробленні металів першої та другої груп знос інструменту визначається відносно слабкою адгезійною та абразивною взаємодією, появою окремих сколів та мікротріщин на різальній кромці, то при обробленні матеріалів третьої та четвертої груп знос інструменту характеризується інтенсивною адгезійною взаємодією, а також дифузійною вуглецю в оброблюваний матеріал.

Для зносу алмазного інструменту при точінні металів четвертої групи з високими швидкостями різання має значення специфічний вид зносу – евтектичний. У зв'язку з зазначеним, алмазний інструмент застосовується для оброблення матеріалів четвертої групи в окремих випадках.

Наявність в оброблюваному матеріалі абразивних або інших твердих частинок збільшує інтенсивність утворення сколів на різальній кромці інструменту на 30...40% і сприяє округленню його різальної кромки.

Загалом, залежно від оброблюваного матеріалу та умов оброблення алмазний інструмент у процесі різання піддається наступним видам зносу: адгезійному, абразивному, дифузійному, евтектичному, а також комбінованому, коли знос викликаний одночасною дією декількох видів зносу.

Для абразивного зношування характерна наявність на зношеній поверхні рисок, паралельних вектору швидкості різання. Механізм абразивного зносу полягає в тому, що тверді включення в оброблюваному матеріалі, проникаючи в контактні поверхні інструменту, виконують дряпання і проорання інструментального матеріалу.

Враховуючи, що при температурах, що з'являються при обробленні кольорових металів, твердість алмазу змінюється незначно, абразивний знос інструменту мінімальний.

Протилежна картина спостерігається при точінні матеріалів з абразивними твердими включеннями і, особливо, твердих сплавів на основі карбідів. Поверхня алмазного різця, зношена в результаті адгезійної взаємодії, має бугристий вигляд. Видалення інструментального матеріалу з контрольних поверхонь відбувається внаслідок їх зриву та відриву.

Виникненню інтенсивної адгезії при різанні сприяють високі тиски в контакті і безперервний рух ювелільних свіжоутворених поверхонь оброблюваного матеріалу щодо поверхонь інструменту. Мірою адгезійної взаємодії матеріалів є коефіцієнт адгезії, що є відношенням зусилля, необхідного для роз'єднання контактуючих матеріалів, до величини прикладеного навантаження. За адгезійною здатністю до вуглецю всі метали поділяються на дві групи.

У першу групу, що характеризується порівняно низькими температурами початку адгезії  $(0,4 \dots 0,5)T_{пл}$  потрапили всі метали, що взаємодіють з вуглецем, і метали, в яких вуглець розчиняється.

Найменша відносна температура початку адгезійної взаємодії зафіксована для Zr та Mo. Fe, Ni, Co є активними карбідоутворюючими елементами і характеризуються інтенсивною адгезійною взаємодією з алмазом. При цьому взаємодія із Fe протікає найбільш інтенсивно. Для металів групи Ів періодичної таблиці елементів, неактивних до вуглецю, характерні відносні температури початку адгезійної взаємодії порядку  $0,7T_{пл}$ .

Характер руйнування інструментального матеріалу при адгезійній взаємодії пов'язаний з відривом частинок, зрізом та втомними явищами на окремих плямах контакту. При обробленні таких матеріалів, як титан і цирконій на поверхні алмазу, інтенсивно утворюються наліпи оброблюваного матеріалу значної величини. З часом спостерігається безперервне чергування утворення налипів та видалення мікрооб'ємів алмазу, внаслідок чого зростає майданчик зносу інструменту.

Дифузійне зношування проявляється в утворенні гладкої, полірованої площадки зношування алмазного інструменту. Пояснюється це тим, що внаслідок дифузійного розчинення копіюється мікропрофіль поверхні різання або сторони прирізання стружки.

При різанні міді, цинку, алюмінію та їх сплавів, що не розчиняють у собі вуглець, не відбувається дифузійного зношування алмазного інструменту, що підтверджує ефективність використання такого інструменту. При обробленні різанням кольорових металів і сплавів не виникають такі високі температури, внаслідок чого зазначений механізм не реалізується.

Таким чином, знос різального інструменту з монокристалів алмазу при обробленні кольорових металів, їх сплавів та полімерних матеріалів обумовлюється адгезією, абразивною взаємодією, мікроруйнуванням матеріалу внаслідок динамічних навантажень. При обробленні композиційних полімерних матеріалів певне значення має взаємодія вуглецю алмазу з продуктами деструкції оброблюваного матеріалу, макрорадикалами полімерних ланцюжків.

Є дані про інтенсифікацію руйнування алмазу у присутності компонентів полімерних матеріалів. Особливим випадком оброблення алмазними монокристалічними різцями є алмазне мікроточіння (АМТ). Перевагою АМТ перед традиційними способами оброблення (доведенням, поліруванням) є забезпечення надвисокої точності (відхилення форми  $0,1 \dots 0,04$  мкм) у поєднанні з необхідною якістю оброблених поверхонь ( $Rz 0,04$ ) при високій продуктивності і повторюваності результатів у вузькому полі допуску на виготовлення.

Заміна традиційних способів оброблення дзеркальних поверхонь методом АМТ дає значний економічний ефект. Відношення витрат при традиційних методах оброблення до витрат на алмазному мікроточіння зазвичай становить 2:1. При виготовленні асферичних деталей економія часу та зниження вартості оброблення при АМТ можуть досягати 15 разів.

Методом АМТ оброблювали монокристали та полікристали германію, кремнію, деформовані та ливарні алюмінієві сплави, мідь, сплав берилію з міддю, латунь, електролітичний нікель, пластмаси (акрил, полікарбонат тощо).

Крім того, цим методом можна оброблювати оптичне скло при нагріванні його до температури, близької до точки розм'якшення. Для здійснення процесу АМТ необхідні, перш за все, алмазний інструмент з гострим різальним лезом, відповідне навколишнє середовище і спеціальний верстат надвисокої точності. Товщина стружки при АМТ – 0,1...4,0 мкм.

В даний час при вивченні закономірностей АМТ велика увага приділяється особливостям поведінки крихких матеріалів, таких як Si, Ge, а також різних композитів на їх основі в умовах, коли параметри перерізу зрізу мають субміроскопічні значення: за певної критичної величини товщини зрізу спостерігається явище зміни характеру стружкоутворення – крихке руйнування частинок матеріалу, які виносяться стружкою, змінюється пластичною деформацією і утворенням зливної стружки, характерної для оброблювання пластичних матеріалів, таких як кольорові метали.

Дане явище відоме в літературі як a ductile to brittle transition (DBT). Основною причиною переходу крихких матеріалів у пластичний стан є виникнення зони вкрай високих гідростатичних напружень в області, що безпосередньо прилягає до різальної кромки матеріалу, що викликає фазову трансформацію при високих тисках (high pressure phase transformation (HPPT)).

У разі АМТ зазначене має місце при певній глибині різання (SiC – 50...100 нм; монокристал Si – 60...140 нм; полікристал Ge – 80 нм), і пов'язане з наявністю в інструменті великого негативного переднього кута, гострої різальної кромки, що сприяє виникненню пластичної поведінки крихких матеріалів під час різання. Можливо, такій поведінці також сприяють високі швидкості різання, при яких відбувається рекристалізація оброблюваного матеріалу, і високі температури, при яких оброблюваний матеріал розміцнюється.

У разі напівпровідникових матеріалів (кремнію та германію) «пластичний режим» відповідає аномально високій пластичності цих крихких за нормальних умов матеріалів.

Перехід від механізму крихкого знімання матеріалу до механізму пластичного знімання спостерігається при глибинах різання менших критичних, а значення цієї глибини різання залежить від природи матеріалу та умов його оброблення.

На рис. 7.1 показано вид стружки, яка знімається при АМТ кремнію та алюмінію.

Стосовно алмазного мікроточіння різних виробів (зокрема, деталей оптики) зазвичай використовуються технологічні критерії стійкості інструменту.

При цьому величина зношування інструменту може бути відносно невеликою, проте мікроруйнування його різальної кромки призводить до різкого підвищення шорсткості обробленої поверхні, а підвищення тепловиділення в зоні різання призводить до зміни розмірів інструменту і відповідно до спотворення точності обробленої поверхні.

Дзеркальна поверхня, оброблена алмазним монокристалічним інструментом, характеризується параметром шорсткості поверхні  $Rz \sim 40$  нм. Можливість отримання такої висоти мікронерівностей обмежується шириною фаски зношування інструменту  $h_3 < 2,0$  мкм.

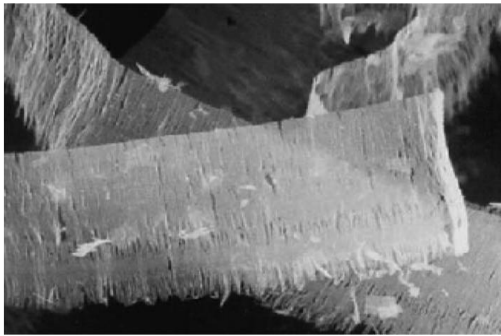
При цьому процес оброблення супроводжується зміною сил різання та напруженого стану різального інструменту.

Встановленій величині зносу інструменту відповідають стискаючі дотичні напруження на передній і розтягуючі напруження малої величини на задній поверхнях.

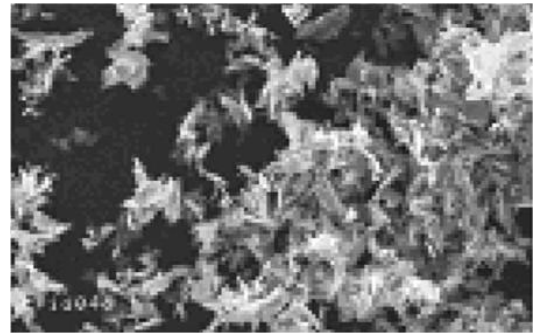
Для забезпечення можливості своєчасної зміни різального інструменту та якості обробленої поверхні виробів із кремнію як критерій стійкості інструменту запропоновано параметр  $P_z/P_y \geq 0,30 \dots 0,32$ .

Коефіцієнт тертя синтетичного полікристалічного алмазу по металах дещо вищий, ніж для природного, що пояснюється наявністю дефектів на поверхні полікристалу,

спричинених випаданням частинок кристалітів, а також наявністю частинок металевої фази або зв'язуючого.



а



б



в

**Рис. 7.1. Стружка при АМТ кремнію (а – зливна; б – сколювання) и алюмінієвого сплаву марки АМГ6 (в)**

## 7.2. Оброблення інструментами, оснащеними ПНТМ на основі алмазу

Коефіцієнт тертя синтетичного алмазу за багатьма металами менше 0,2, що говорить про превалюванні в контактній взаємодії зовнішнього тертя і є особливістю контактних процесів між синтетичним алмазом і більшістю металів. Виняток становлять титан, цирконій та інші матеріали, в контакт з якими поверхня різального елемента покривається міцно утримується плівкою матеріалу, який треться, що повністю виключає зовнішнє тертя і призводить до внутрішнього.

При обробленні інструментом із синтетичного полікристалічного алмазу сили різання дещо вищі, ніж при роботі інструментом із природного алмазу, але значно менші, ніж при роботі інструментом, оснащеним твердим сплавом або мінералокерамікою.

Збільшення перерізу зрізу призводить до підвищення сил різання. Однак необхідно враховувати, що при малих перерізах зрізу сила  $P_y$  може бути більшою від сили  $P_z$ , тому що в цьому випадку процес різання визначається силами різання на задній поверхні. Необхідно відзначити, що при алмазному точінні сили різання при зношуванні різця змінюються менше, ніж при тонкому точінні інструментом із твердого сплаву. Це пов'язано з меншою зміною радіуса округлення різальної кромки алмазного різця при зносі.

В міру зношування різця сили на задній поверхні за своєю абсолютною величиною зростають, але питоме напруження при цьому зменшується, оскільки площа зношування збільшується швидше, ніж сила різання. Температура різання при точінні різцями з полікристалічних НТМ, порівняно з тонким точінням, менша, хоча й трохи вища, ніж при обробленні інструментом з природного алмазу. При різанні кольорових металів і сплавів, а також композиційних полімерних матеріалів вона зазвичай не перевищує 473...523 К, а при обробленні титану, цирконію, нікелю, заліза та інших металів температура різання

досягає 973 К і вище. Це зумовлює можливість активної адгезійної взаємодії інструменту з полікристалів алмазу, а також дифузії вуглецю в оброблюваного матеріалу.

Найбільший вплив на температуру, як і при роботі інструментом з природного алмазу, надає швидкість різання, найменший – глибина. Основним джерелом тепловиділення є тертя задньої поверхні інструмента. При обробленні кольорових металів і сплавів більша частина теплоти розподіляється між деталлю і стружкою, а при різанні матеріалів з низькою теплопровідністю, наприклад полімерних композицій, збільшується кількість теплоти, що йде в різець. У разі оброблення як кольорових матеріалів і сплавів, так і полімерних композицій температура поверхні деталі зазвичай не перевищує 373...393 К, що дозволяє проводити оброблення без термічних змін в оброблюваному поверхневому шарі. У зв'язку з низьким тепловиділенням, малим нагріванням деталі і, головним чином, інструменту, оброблення проводиться з максимальною точністю – теплове подовження різця і розширення деталі незначні.

Стійкість алмазного інструменту при лезвому обробленні мідних, алюмінієвих сплавів та інших кольорових металів складає сотні годин. Це дозволяє використовувати інструмент з полікристалічних алмазів на операціях, де потрібна велика розмірна стійкість, тобто на верстатах з числовим програмним керуванням, системах гнучких автоматизованих виробництв, масовому виробництві, наприклад, деталей двигунів внутрішнього згоряння.

Перспективною сферою застосування полікристалічних композитів на основі алмазу є оброблення таких матеріалів, що важко піддаються різанню і викликають швидке зношування інструменту, як деревностружкові плити середньої щільності з високим вмістом клею, з покриттями на основі мелаїнової смоли, декоративний паперово-шаруватий пластик, матеріали, структурні складові яких мають абразивну дію.

Розрізання таких матеріалів проводиться при швидкості різання 0,5...1,16 м/с, а інструмент з ПКА має стійкість в 200...300 разів перевищуючу стійкість твердосплавних інструментів.

Оброблення інструментами з ПНТМ на основі алмазу необхідно проводити на жорстких і швидкохідних верстатах, що забезпечують частоту обертання шпинделя до 6000 об/хв. Жорсткість токарних верстатів має бути не менше 22 кН/мм, а розточувальних – 14,5 кН/мм. Амплітуда коливань верстата не повинна перевищувати 5 мкм, а радіальне та осьове биття шпинделя не повинно бути більше 5...8 мкм для токарних та 3...5 мкм для розточувальних верстатів.

Особливу увагу слід приділяти зниженню вібрацій у технологічній системі та ізоляції верстатів від зовнішніх джерел вібрацій.

Режими різання і шорсткість поверхні  $Ra$ , що досягається, при оброблення кольорових металів і сплавів, а також деяких неметалічних матеріалів інструментами з ПКА наведені в табл. 7.1 та 7.2.

Порівняння причин відмов різців з монокристаллами і полікристаллами алмазу показало, що полікристалічні різці, відрізняючись більш високою міцністю і в'язкістю, ніж монокристалічні, мають більшу кількість і частку різців з нормальним зносом і незначним викрашуванням. Така ж картина спостерігається і при розточуванні великих підшипників ковзання, що виготовляються із кольорових сплавів.

Переваги інструменту з різального частиною полікристалів алмазу виявляються внаслідок довільної орієнтації кристалів в алмазному шарі пластин, що забезпечує високу однорідність твердості та стійкості до стирання у всіх напрямках. Монокристал алмазу, як зазначалося раніше, має кілька твердих і м'яких кристалографічних площин і для досягнення мінімального зношування різальної кромки інструменту з природного алмазу

необхідно забезпечити правильну кристалографічну орієнтацію монокристалу алмазу в інструменті.

**Табл. 7.1. Режими різання при точінні і розточуванні кольорових металів і сплавів**

Оброблюваний матеріал	$v$ , м/с	$S$ , мм/об	$t$ , мм
Алюміній і алюмінієві сплави	5,00...20,00	0,02...0,30	0,01...2,00
Силуміни (до 26 % Si)	1,00...5,00		
Мідь і мідні сплави	3,00...15,00		
Спечені тверді сплави	0,25...0,65	0,01...1,00	0,01...1,00
Титанові сплави	1,00...2,50	0,02...0,20	0,01...0,50

Примітка: При фрезеруванні швидкість різання в 2...2,5 раза вища.

**Табл. 7.2. Режими різання при точінні і розточуванні неметалевих матеріалів**

Оброблюваний матеріал	$v$ , м/с	$S$ , мм/об	$t$ , мм	$Ra$ , мкм
Оргскло	8,0...16,0	0,30...0,80	0,10...7,00	0,32...1,25
Гетинакс	6,0...14,0	0,20...0,80		0,63...1,25
Склотекстоліт	5,0...10,0	0,10...0,80		0,63...2,50
Склопластик	7,0...10,0	0,10...0,70	0,10...6,00	1,25...2,50
Прес-матеріал	4,0...10,0		0,10...7,00	
Компаунд	7,0...10,0	0,10...0,80	0,10...6,50	2,50...3,00
Вуглепластик	3,0...8,0	0,10...0,50		1,25...2,50
Боропластик	1,7	0,10	0,50	$Rz \geq 40$
Склокераміка	1,6...2,5	0,03...0,10	0,01...0,10	1,25...2,50
Пісчаник, граніт	0,8...6,6	0,03...0,30	0,05...5,00	—

Іншою перевагою полікристалічних НТМ є підвищена стійкість до ударних навантажень. Взаємне скріплення дрібних кристалів алмазу в полікристалічному шарі зводить до мінімуму можливість утворення великих сколів під впливом ударних навантажень. Крім того, міцна твердосплавна основа служить гарною опорою для алмазного шару та сприяє збільшенню міцності на удар.

Подібні результати отримані під час оброблення заевтектичних алюмінієвокремнієвих сплавів (20...22 % Si). Звичайні різальні інструменти, у тому числі твердосплавні, швидко руйнуються абразивними кремнієвими частинками, що знаходяться в сплавах алюмінію. Чергування твердої та м'якої структури діє на інструмент як переривчасте різання, тобто сприяє його поломці.

Застосування полікристалічних алмазних інструментів при обробленні алюмінієвих поршнів дозволяє у 100...300 разів підвищити стійкість різців порівняно з твердосплавними, підвищити швидкість різання. При обробленні кремнієво-алюмінієвих сплавів (20...22 % Si) знос різців із полікристалічного алмазу відбувається в основному по задній поверхні, причому площадка зносу виглядає добре відполірованою. Температура різання при цьому не перевищує 523...573 К, а тиск 0,1...1,0 ГПа.

Зміна вмісту кремнію у складі сплаву обернено пропорційно впливає на стійкість різців. Зменшення вмісту Si в 2 рази призводить до такого ж підвищення стійкості інструменту. Широке використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) обмежується у зв'язку з більшими труднощами, що виникають при їх механічному

обробленні. Це пов'язано з їх низькою теплопровідністю, а також тим, що як наповнювачі в ПКМ використовуються полімерні, органічні, неорганічні тверді та механічно міцні наповнювачі.

В процесі різання ПКМ теплопровідність інструментального матеріалу значною мірою визначає температуру в зоні різання та якість оброблення виробів. ПКА, що відрізняються від інших інструментальних матеріалів максимальною теплопровідністю та високою стабільністю геометричних параметрів різальної кромки, забезпечують найнижчу температуру в зоні різання, найвищі показники якості обробленої поверхні, стійкість інструменту та продуктивність оброблення.

При точінні таких матеріалів, як титанові сплави, зношування алмазних різців носить яскраво виражений температурний характер зі значним збільшенням радіуса округлення різальної кромки. Таким чином, зношування різця збільшує теплонапруженість процесу різання. Тому при обробленні титанових сплавів за критерій затуплення приймають зношування по задній поверхні, що дорівнює 0,2...0,3 мм. Якщо ж до шорсткості висувають підвищені вимоги, то приймається зношування по задній поверхні не більше 0,2 мм.

Внаслідок сильного зношування ПКМ, їх специфічних фізико-механічних і технологічних властивостей для оснащення інструменту слід вибирати найбільш зносостійкі інструментальні матеріали на основі алмазу. При цьому необхідно враховувати, що суттєво менші сили різання, ніж при обробленні металів, дозволяють використовувати інструмент із ПКА при значних по абсолютній величині подачах (до 1,2 мм/об) та глибинах різання (до 7...8 мм при розмірі пластини) 12,7 мм, тобто до 0,5...0,6 довжини різальної кромки. Досвід показує, що стійкість інструменту з ПКА при обробленні полімерних композиційних матеріалів досягає 300 хв.

Різці з полікристалічні НТМ не забезпечують такий низький рівень шорсткості, як різці з природного алмазу. Полікристалічна будова не дозволяє отримати рівну різальну кромку у різця, так як при заточуванні окремі блоки кристалітів викрішуються, залишаючи на кромці вириви, нерівності.

Чим крупнозерніший полікристал, тим шорсткішою буде різальна кромка різця. При використанні полікристалів алмазу з дрібнозернистою будовою та гарним доведенням інструменту можна наблизитися до результатів, одержуваних при обробленні лезовим інструментом з природного алмазу.

В загальному випадку при використанні різців із синтетичного алмазу при обробленні металів та сплавів першої та другої груп висота мікронерівностей обробленої поверхні приблизно в 1,5...2,5 рази вище, ніж при застосуванні різців із природного алмазу за однакових умов різання.

Істотний вплив на шорсткість поверхні робить знос інструменту, що зазвичай погіршує якість оброблення. Величина критерію затуплення регламентується двома факторами: якістю обробленої поверхні та собівартістю оброблення.

Критерій затуплення різців із полікристалічного синтетичного алмазу зазвичай становить 0,2...0,3 мм по задній поверхні. За такої величини критерію затуплення забезпечується висота мікронерівностей менше 0,8...1,0 мкм, що задовольняє вимогам виробництва наймасовіших деталей із алюмінієвих висококремністих сплавів – поршнів двигунів внутрішнього згорання.

При необхідності одержання високоякісної обробленої поверхні з полікристалічних надтвердих матеріалів на основі синтетичного алмазу (ПКА) в сучасному виробництві найбільш широке застосування знайшли двошарові композити (АТП – на основі з твердого сплаву, АКП – на керамічній основі), які використовуються при оснащенні різального інструменту для оброблення кольорових металів і сплавів, виробів з

керамічних, металокерамічних, деревностружкових, полімерних матеріалів, граніту та пісковіку.

Інструменти, оснащені АТП і АКП показали високу ефективність при обробленні виробів з кольорових і силумінових сплавів, полімерних абразивовмісних композитів, напилених оксидних покриттів типу  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  та інших важкооброблюваних матеріалів. Двошарові алмазно-твердосплавні (АТП) різальні пластини круглої форми ефективно використовуються при обробленні поршнів двигунів внутрішнього згорання із силумінових сплавів (рис. 7.2).



**Рис. 7.2. Поршні ДВЗ, оброблені інструментом з АТП**

Такі пластини застосовуються при обточуванні по копіру на верстатах-напівавтоматах, в автоматичних лініях. Технічні вимоги до оброблюваних деталей: допуск на діаметр головки поршня – 0,08 мм, спідниці – 0,02 мм, шорсткість поверхні  $Ra$  1,25 мкм. Поршні обробляють за один прохід.

У зв'язку з овальністю профіля спідниці в поперечному перерізі, а також його конусністю глибина різання змінюється як один оборот шпинделя, і у міру руху різця вздовж деталі.

Як мастильно-охолоджуючі рідини використовується 5% водний розчин емульсолу. Для обточування застосовуються різальні пластини діаметром 6,35, 7,50 та 12,7 мм, товщиною 2,48, 2,80, 3,18 мм відповідно. Різці, оснащені цими пластинами, мають передній кут  $\gamma = 0^\circ$ , задній –  $7^\circ$  та  $11^\circ$ .

Дослідження показали, що різці, оснащені різальними круглими пластинами з АТП, при точіння сплавів із вмістом кремнію 16 % дозволяють отримати шорсткість поверхні  $Ra$  0,37...0,91.

Шорсткість поверхні  $Ra \leq 0,8$  досягається при  $h_z \leq 0,05...0,1$  мм після оброблення 2000...7000 поршнів, що відповідає 40...110 м<sup>2</sup> обробленої поверхні або 2500...9000 хв машинного часу.

Через овальність профіля спідниці в поперечному перерізі, а також його конусності величина глибини різання за один оберт поршня змінювалася від 0,20 до 0,35 мм. Крім того, у міру руху різця вздовж деталі глибина різання змінювалася від 0,2 до 0,4 мм. За статистичними даними ресурс різцевої вставки з АСПК в середньому становив 800 поршнів при 1-2 переточках. Шорсткість обробленої поверхні –  $Ra$  0,6...1,6.

Через порівняно швидке затуплення різців та нестабільну їх працездатність, коефіцієнт, що враховує величину остаточного браку поршнів на операції обточування, становив 0,18. Різальні пластини з АТП механічно закріплювали в спеціально спроектованих державках, які вставляли в різцеутримувачі, пов'язані з копірним

пристроєм і здійснюють при обробленні коливальні рухи, що забезпечують задану геометрію оброблених поршнів в поперечному і поздовжньому напрямках.

Як показали дослідження працездатності різців із АТП у виробничих умовах, ресурс інструменту (без переточок) становив у середньому 6,2 тис. поршнів при 4–6 поворотах пластини. Застосування круглих пластин дозволяє забезпечити чотири-шість періодів стійкості без переток (за рахунок повороту пластини та використання всього її периметра), стабільну шорсткість обробленої поверхні, підвищити продуктивність оброблення в 1,5 рази, знизити відсоток браку.

Термін служби різальної пластини становить 15...20 тис. поршнів. Як показав виробничий досвід, шорсткість обробленої поверхні значною мірою залежить стану технологічної системи, її вібростійкості. Одна і та ж різальна пластина на різних верстатах може дати суттєво різні результати з шорсткості обробленої поверхні.

Круглі різальні пластини АТП, забезпечуючи стабільно задану шорсткість поверхні та геометрію поршня (допуск на діаметр поршня – 0,04 мм), дозволяють збільшити поздовжню подачу на 30 %, за рахунок чого цикл остаточної оброблення спідниці поршня скорочується з 4 хв. з до 3 хв. 10 с.

Стабільне забезпечення якості поршнів за рахунок підвищення надійності інструменту дозволяє знизити коефіцієнт, що враховує величину остаточного браку поршнів з 0,18 до 0,08, отримати економію силумінового сплаву до 15,0 т на рік.

Як критерій затуплення алмазних різців, призначених для фінішного оброблення, рекомендується приймати зношування по задній поверхні від 0,1 до 0,3 мм.

Зі зростанням зернистості порошку алмазу, що використовується виготовлення АКП, збільшується стійкість інструменту. У той же час із зменшенням зернистості порошку алмазу зростає вміст Si у різальному шарі. Правомірно зробити висновок, що під дією твердих частинок, які містяться в оброблюваному матеріалі, відбувається мікроривикришування частинок алмазу з робочого шару АКП внаслідок руйнування прошарків карбиду кремнію, що міститься в АКП.

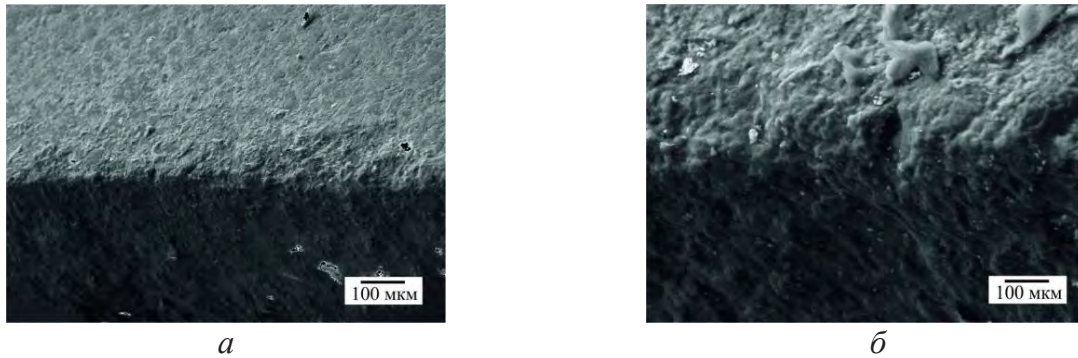
Стійкість інструменту при точіння покриттів складу  $Al_2O_3$  (85%) +  $Ti_2$  (15%) в 1,5 рази вище, ніж при обробленні покриттів  $Al_2O_3$ . Як видно із рис. 7.3, зношування інструменту при точіння напиленого керамічного покриття має абразивний характер. Застосування інструменту з АТП та АКП дозволяє обробляти вуглеграфіт АГ 1500-С05 зі швидкостями різання 250...300 м/хв. Стійкість інструменту становить кілька годин.

Оброблення силікованого графіту ЗПГ (70...72 HRC) проводиться при швидкостях різання 50...60 м/хв.

При обробленні алюмінієво-кремнієвих сплавів спостерігається повільне регулярне зношування інструменту з АКП, інтенсивність якого визначається вмістом кремнію. Висока теплопровідність інструментального матеріалу забезпечує невисокі температури у зоні різання при обробленні таких матеріалів. Стійкість алмазних різців при обробленні алюмінієвих сплавів становить сотні годин, тому проведення стійких досліджень у лабораторних умовах становить значні труднощі.

Зношування інструменту з АКП при точінні безолов'яної алюміній-залізистої бронзи БРАЖ 9-4 у широкому діапазоні швидкостей різання переважно визначається довжиною шляху різання. Інструмент з АКП (АСМ 7/5; пластина 120300) при режимах різання  $v = 450$  м/хв,  $S = 0,05$  мм/об,  $t = 0,2$  мм забезпечує шорсткість обробленої поверхні  $Ra$  0,45...0,63.

При обробленні різальних пластин, які сформовані з крупнозернистого порошку алмазу, значно складніше досягти високої якості (гостроти) різальної кромки, яка є дуже важливим фактором при обробленні кольорових сплавів. Такі інструменти використовуються при відносно грубому обробленні.



**Рис. 7.3. Зношені ділянки алмазного шару АКП після точіння покриття на основі  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : а –  $\times 140$ ; б –  $\times 650$**

Оброблення титанових сплавів, залежно від геометрії інструменту з АКП, не рекомендується проводити зі швидкостями різання понад 95...120 м/хв. Під час оброблення титанового сплаву ВТ14 (система Ti-Al-Mo-V) необхідно обмежуватися швидкістю різання 150 м/хв.

Незважаючи на те, що стійкість інструменту зі зростанням швидкості зменшується, при зрізанні однакового об'єму ( $17,74 \text{ см}^3$ ) титанового сплаву ВТ3-1 залежність  $h_3 = f(v)$  має екстремальний вигляд.

Виходячи з максимуму довжини шляху різання визначено оптимальну швидкість різання, яка становить 100 м/хв (рис. 7.4, а). Зернистість порошку, з якого спечено АКП, істотно впливає на зносостійкість інструменту при обробленні титанових сплавів: швидкість зношування інструменту знижується зі зростанням зернистості вихідного порошку алмазу (рис. 7.4, б).

При точінні титанового сплаву ВТ-6 (система Ti-Al-V) зі швидкістю різання 60 м/хв стійкість алмазного інструменту перевищує стійкість інструменту твердого сплаву в 10 разів і більше.

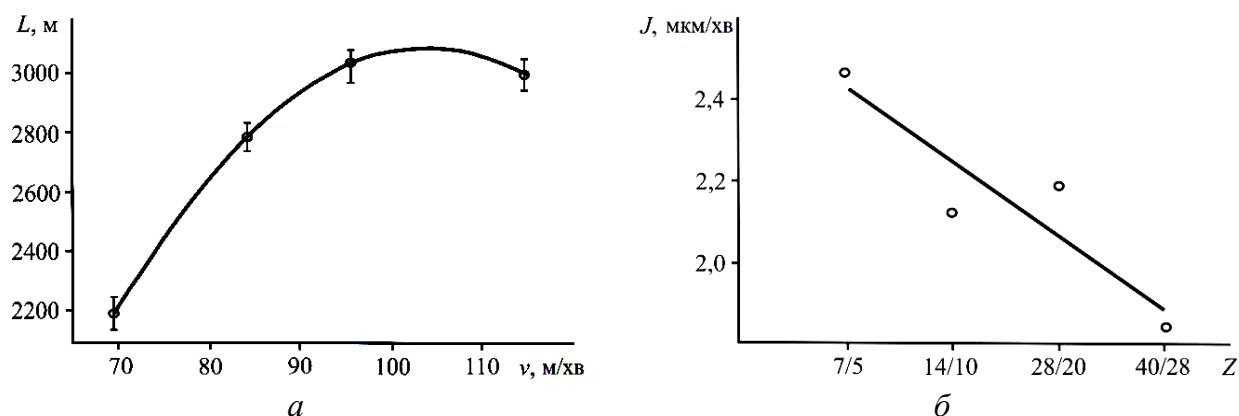
У порівнянні з різальними інструментами, оснащеними АТП, різці з АКП, внаслідок меншого рівня напружень і більшої теплопровідності композиту, мають підвищену працездатність при обробленні  $\alpha+\beta$  титанових сплавів систем Ti-Al-Mo-Cr-Fe-Si ( $\sigma_{\text{в}} = 1000 \dots 1250 \text{ МПа}$ ), Ti-Al-Mo-V ( $\sigma_{\text{в}} = 850 \dots 1400 \text{ МПа}$ ), Ti-Al-V ( $\sigma_{\text{в}} = 900 \dots 1250 \text{ МПа}$ ).

Успішно застосовуються різальні пластини з ПКА для оброблення полімерних композиційних матеріалів. Використання різальних пластин з механічним кріпленням та їх переустановкою дозволяє підвищити стійкість у 15...25 разів у порівнянні з інструментом із твердого сплаву та у 2...4 рази – з балласу. Форма та розміри різальних пластин з полікристалів сприяють збільшенню глибини різання до 4...10 мм, подачі до 0,6...0,9 мм/об, поєднанню напівчистових та чистових операцій лезового оброблення деталей з композиційних матеріалів.

Швидкість різання при обробленні деталей з композиційних полімерних матеріалів становить 6,0...8,3 м/с. Застосування різальних пластин з полікристалів круглої форми дозволяє значно підвищити якість оброблюваних деталей. Продуктивність оброблення підвищується у 2...3 рази.

Ще однією з перспективних областей застосування полікристалічного алмазного інструменту є оброблення таких, що важко піддаються різанню і викликають швидкий знос інструменту таких матеріалів, як деревостружкові плити, плити середньої щільності з високим вмістом клею, з покриттями на основі меламінової смоли, декоративний

паперово-шаровий пластик, а також матеріали, що мають абразивну дію. Оброблення таких матеріалів звичайним інструментом є неекономічною.



**Рис. 7.4.** Шлях різання інструментом, оснащеним АКП, залежно від швидкості різання (АСМ 14/10,  $S = 0,05$  мм/об,  $t = 0,15$  мм) при точіння титанового сплаву ВТЗ-1 (а), швидкість зношування інструменту, оснащеного АКП, залежно від зернистості порошку алмазу в композиті при точіння титанового сплаву (б)

В даний час різальний інструмент, що застосовується в деревообробній промисловості та промисловості з переробки пластмас, оснащують полікристалами алмазу. Такий інструмент має стійкість у 200...300 разів, що перевищує стійкість твердосплавних інструментів.

Інструмент, оснащений композитом алмаз – WC, дозволяє ефективно обробляти такі абразивовмісні матеріали ВК15, вуглеграфіт АГ 1500-С05 і силіційований графіт СПГ (70...72 HRC) зі швидкостями різання 30...40, 300...350 і 30...35 м/хв відповідно.

Інтенсивність зношування інструменту з композитом алмаз-WC при точіння твердого сплаву ВК15 більш ніж у 2 рази нижча порівняно з інструментом з АТП.

Інтенсивність зношування інструменту з композитом алмаз-WC при точіння силумінів визначається вмістом кремнію в оброблюваному матеріалі. Стійкість різців складає сотні годин.

Інструменти, оснащені композитом алмаз-WC, ефективно працюють в умовах динамічних навантажень – при обробленні ділянок поршня зі сплаву АЛ25 з канавками під компресійні кільця та з отвором під шатунний палець не спостерігалось сколювання різальних кромки.

### 7.3. Оброблення інструментами, оснащеними ПНТМ на основі щільних модифікацій нітриду бору

#### 7.3.1. Загальні відомості

Для лезового оброблення деталей із загартованих сталей, чавунів, з наплавленими і напиленими покриттями на основі Fe, Co та Ni застосовуються інструменти, оснащені полікристалічними надтвердими матеріалами на основі щільних модифікацій нітриду бору – вюрцитної та сфалеритної (табл. 7.3).

Головним резервом підвищення продуктивності оброблення при використанні інструменту з ПНТМ є швидкість різання (табл. 7.4). З таблиці видно, що найбільша

ефективність застосування композитів на основі cBN має місце під час оброблення високотвердих матеріалів.

**Табл.7.3. Области раціонального застосування деяких полікристалічних матеріалів на основі cBN**

Матеріал	Область застосування
Amborite	Неперервне і переривчасте різання загартованих легированих сталей, твердих чавунів, виливків (60 HRC), важкооброблюваних матеріалів
DBC90	Напічистове оброблення загартованих і легированих сталей, чавунів
DBC50	Чистове оброблення загартованих і легированих сталей, чавунів
Sumiboron BN 100	Оброблення сталей, сірих і вибілених чавунів, сплавів на основі Ni та Co
Sumiboron BN200	Неперервне і переривчасте різання загартованих легированих сталей і чавунів
Sumiboron BN500	Оброблення ковкого чавуну з кулястим графітом
Q-bonite BX241	Оброблення сталей і чавунів в умовах переривчастого різання
Wurtzin WBN T8	Оброблення сталей твердістю менше 40...60 HRC
Композит 01	Чистове оброблення загартованих сталей і чавунів
Композит 10	Безперервне і переривчасте різання термооброблених сталей, чавунів, твердих сплавів із вмістом понад 15 %, наплавлених і напилених покриттів. Оброблення сталей з аустенітною структурою
КТП	Оброблення сталей, жароміцних сплавів на Ni-основі
Кіборит	Безперервне і переривчасте різання важкообробних термооброблених сталей і сплавів, чавунів, високотвердих наплавлених матеріалів мартенситного класу, напилених матеріалів, композицій з включеннями твердих сплавів
Борсиніт	Безперервне і переривчасте різання важкообробних термооброблених сталей, чавунів, високотвердих наплавлених матеріалів класу, напилених матеріалів, композицій з включеннями твердих сплавів

**Таблиця 7.9. Швидкість (м/с) інструментами з твердого сплаву і ПКНБ**

Оброблюваний матеріал		Матеріал інструменту	
Назва	Твердість	Твердий сплав	ПКНБ
Сталь	HB 150...250	2,10...5,00	1,66...3,33
	45...55 HRC	0,60...1,15	1,33...2,66
	60...70 HRC	0,15...0,50	1,00...2,00
Чавун:			
сірий	HB 120...240	1,66...3,33	6,66...16,66
високоміцний	HB 160...330	0,83...1,66	5,00...13,33
вибілений, зносоустійкий	40...60 HRC	0,15...0,30	0,83...2,50

Працездатність різального інструменту багато в чому визначається хімічним складом оброблюваного матеріалу. Як зазначалося вище, наявність в оброблюваному матеріалі адгезійно-активних до cBN металів, таких як Ti, Cr тощо, зумовлює підвищену інтенсивність зносу інструменту і, як правило, меншу продуктивність оброблення за

рахунок зниження швидкості різання. Так максимуми стійкості інструменту для сталей із великим вмістом хрому розташовуються в зоні нижчих швидкостей різання.

У табл.7.5, 7.6 наведено орієнтовні режими відповідно точіння і фрезерування ряду матеріалів інструментом з ПКНБ.

**Таблиця 7.5. Режими точіння різцями, оснащеними ПКНБ**

Оброблюваний матеріал	Режими точіння			
	Твердість	$v$ , м/с	$S$ , мм/об	$t$ , мм
Сірий чавун	HB 120...240	5,00...16,50	0,030...0,600	0,05...3,00
Високоміцний чавун	HB 160...330	8,00...13,50	0,030...0,400	0,05...2,50
Вибілений і загартований чавун	HB 400...600	0,80...2,50	0,030...0,200	0,05...1,50
Сталі конструкційні і інструментальні загартовані	45...58 HRC	1,00...3,00	0,003...0,300	0,05...2,50
	58...68 HRC	1,00...2,00	0,030...0,200	0,02...1,20
Спечені тверді сплави з вмістом Co >15 %	80...86 HRA	0,08...0,25	0,030...0,200	0,05...1,20
Наплавленні матеріали мартенситного класу	40...52 HRC	1,50...2,00	0,030...0,250	0,05...2,50
Наплавлена швидкорізальна сталь	58...62 HRC	1,00...1,50	0,030...0,200	0,05...2,00
Напиленні порошкові покриття системи Ni-Cr-B-Si	55...62 HRC			0,05...1,50

**Табл. 7.6. Режими фрезерування інструментами, оснащеними ПКНБ**

Оброблюваний матеріал	Режими фрезерування			
	Твердість	$v$ , м/с	$S$ , мм/зуб	$t$ , мм
Сірий і високоміцний чавун	HB 120...330	13,50...50,00	0,01...0,10	0,05...6,00
Вибілений і загартований чавун	HB 400...600	3,50...13,50		0,05...4,00
Конструкційні і леговані сталі	HB 300	6,50...15,00		0,05...3,00
	35...55 HRC	3,50...10,00	0,05...2,50	
Загартовані і цементовані сталі	50...70 HRC	1,50...5,00	0,01...0,05	0,05...1,50
Швидкорізальна сталь	60...70 HRC	0,30...0,65		0,05...0,80
Склопластик	—	50...100	0,02...0,07	0,05...1,00
Пластмаси	—			

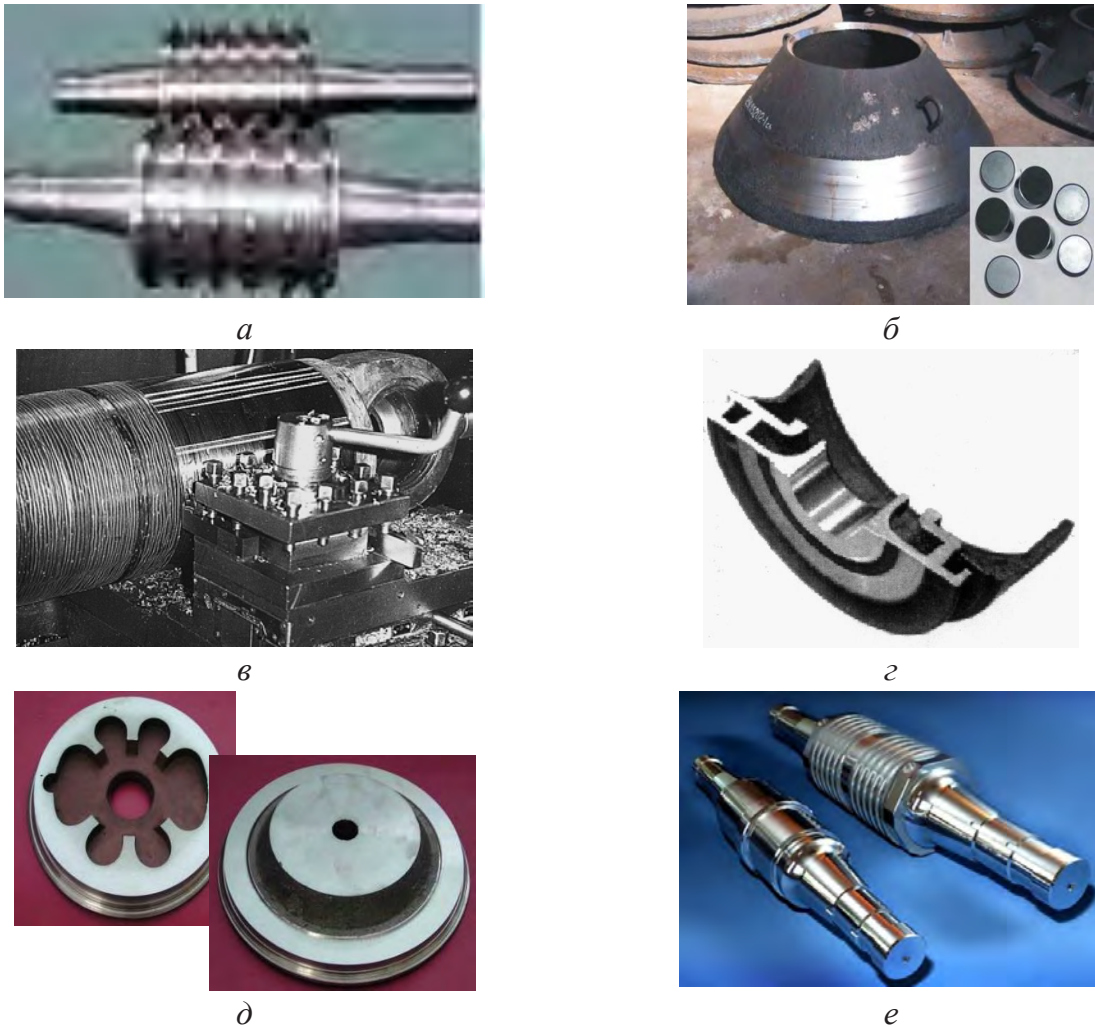
### 7.3.2. Оброблення інструментами, оснащеними композитами групи ВН

Токарне оброблення деталей із важкооброблюваних конструкційних матеріалів високої твердості інструментом, оснащеним ПКНБ, дозволяє у ряді випадків відмовитися від операції шліфування – традиційного способу оброблення деталей із матеріалів високої твердості, до поверхонь яких пред'являються вимоги щодо шорсткості  $Ra < 1,25$ .

Для ефективного використання інструментів із ПКНБ необхідні потужні стаціонарні верстати з точним рухом у площині без торцевого биття інструментальних шпинделів, що забезпечують оптимальну швидкість різання.

Розповсюдження для оброблення деталей з матеріалів високої твердості різальних інструментів, оснащених ПКНБ, та різальної кераміки зумовило появу спеціального терміну – «тверде» точення (hard turning), під яким розуміється оброблення деталей із матеріалів твердістю понад 45 HRC із забезпеченням шорсткості оброблених поверхонь на рівні, що забезпечується процесом шліфування.

На рис. 7.5 показано приклади використання інструментів із ПКНБ.



**Рис. 7.5. Приклади деталей, оброблених інструментами, оснащеними ПКНБ групи ВН: сталь ХВГ (а); лита високомарганцевиста сталь 110Г13Л (б); наплавлене покриття ПП-АН140 (в); напилене покриття ПГ-10Н-01 (г); чавун АЧС-1 (д); твердий сплав ВК25 (е)**

Досвід практичного використання технології «твердого точення» свідчить про наявність значних переваг, пов'язаних з обробленням різцями, оснащеними ПКНБ замість шліфування: продуктивність оброблення за рахунок скорочення машинного часу зростає в 2...4 рази; зменшуються допоміжний час та трудомісткість оброблення; знижуються витрати на обладнання та енергоємність виробництва; з'являється можливість з'єднання кількох операцій на одному робочому місці (подовжнє точення, підрізування торців,

зняття фасок тощо), оброблення деталей проводиться з однієї установки; значно знижується споживання мастильно-охолодних технологічних середовищ; полегшується прибирання стружки та знижується негативний вплив на навколишнє середовище.

Застосування інструменту, оснащеного ПКНБ, дозволяє досягти при точіння деталей із загартованих сталей шорсткість обробленої поверхні  $Ra\ 0,10\dots 1,25$ .

Для «твердого» точення, на відміну від шліфування, характерне формування в поверхневому шарі залишкових напружень, величина і знак яких сприяють підвищенню експлуатаційних характеристик, зокрема міцності втоми деталей. При оброблення різцями, оснащеними ПКНБ, деталі на глибині 50...70 мкм забезпечуються стискаючі напруження, величина яких досягає 0,8 ГПа.

Менш інтенсивне, порівняно зі шліфуванням, локальне нагрівання оброблюваного виробу при точіння, є важливою особливістю оброблення інструментом, оснащеним ПКНБ. Основна частина тепла, що утворюється в зоні різання, йде в стружку та інструмент, внаслідок чого відсутні характерні для шліфування припали, структурні перетворення та зміна хімічного складу матеріалу у поверхневому шарі виробів. При шліфуванні оброблена поверхня може шаржуватися частинками абразиву, насичуватися хімічними елементами, що містяться в шліфувальних кругах та навколишньому середовищі, наприклад, алюмінієм та киснем. Застосування таких різальних інструментів за рахунок можливості регулювання параметрів термобаричного впливу в зоні різання дозволяє керувати формуванням поверхневого шару обробленої деталі з метою створення необхідного стану.

*Оброблення загартованих сталей.* Різальні інструменти, оснащені ПКНБ, ефективно обробляють, допускаючи удари, деталі із загартованих сталей (рис. 7.5 а) твердістю 60...63 HRC зі швидкістю різання до 1,5...2,0 м/с.

Різальні пластини з ПКНБ Кіборит форморозмірів SNMN 090306 і SNMN 120408 дозволяють реалізувати при обробленні загартованих довгомірних деталей технологію «бриючого точіння» (рис. 7.6), при якій проводиться оброблення з подачами до 1 мм/об і забезпечується отримання обробленої поверхні з шорсткістю  $Ra\ 5\dots 1,2$ .

При "твердому бриючому точінні" загартованої сталі ШХ 15 (60...62 HRC) використання квадратних різальних пластин забезпечує вісім періодів стійкості тривалістю 40...90 хв, що дозволяє виконувати оброблення великогабаритних виробів з економічною витратою різального інструменту.

У порівнянні з чистовим точінням бочки прокатного валка зі сталі 9ХС (55...58 HRC) інструментом, оснащеним ПКНБ Композит 10 або керамікою ВОК 71, розроблений інструмент і технологія «бриючого точіння» забезпечують підвищення об'ємної продуктивності  $P_v$  та поверхневої продуктивності  $P_n$  оброблення в 3,37 та 8,4 рази відповідно.

На рис. 7.7 показано залежності зносу інструменту з ПКНБ  $cBN-Si_3N_4$  від часу різання при обробленні інструментальних сталей ХВГ (60 HRC) та 9ХС (60...62 HRC).

*Оброблення високомарганцевої сталі.* Високомарганцеві сталі характеризуються високим ступенем зміцнення під дією контактних навантажень, що обумовлює їх низьку оброблюваність різанням. Для оброблення деталей з литої сталі 110Г13Л розроблені пластини круглої форми з ПКНБ Кіборит (рис. 7.5, б), які дозволяють ефективно обробляти різні поверхні, як по кірці, так і після її видалення.

При точіння по кірці зі швидкостями різання 1,20...1,67 м/с, подачами 0,3...0,4 мм/об і глибиною різання до 8...9 мм стійкість різця, оснащеного ЗБНП з ПКНБ, становить 120...180 хв.

Оброблення торцевої поверхні, що має нерівності від плазмової відрізки литників, проводиться зі швидкостями різання 0,7...0,8 м/с, подачами 0,25...0,35 мм/об і глибиною

різання до 6...7 мм. Стійкість інструменту складає 60...90 хв. Зношування інструменту протікає рівномірно, сколи і поломки різальної пластини спостерігаються рідко, викрашування на різальній кромці не перевищують 0,10...0,15 мм.

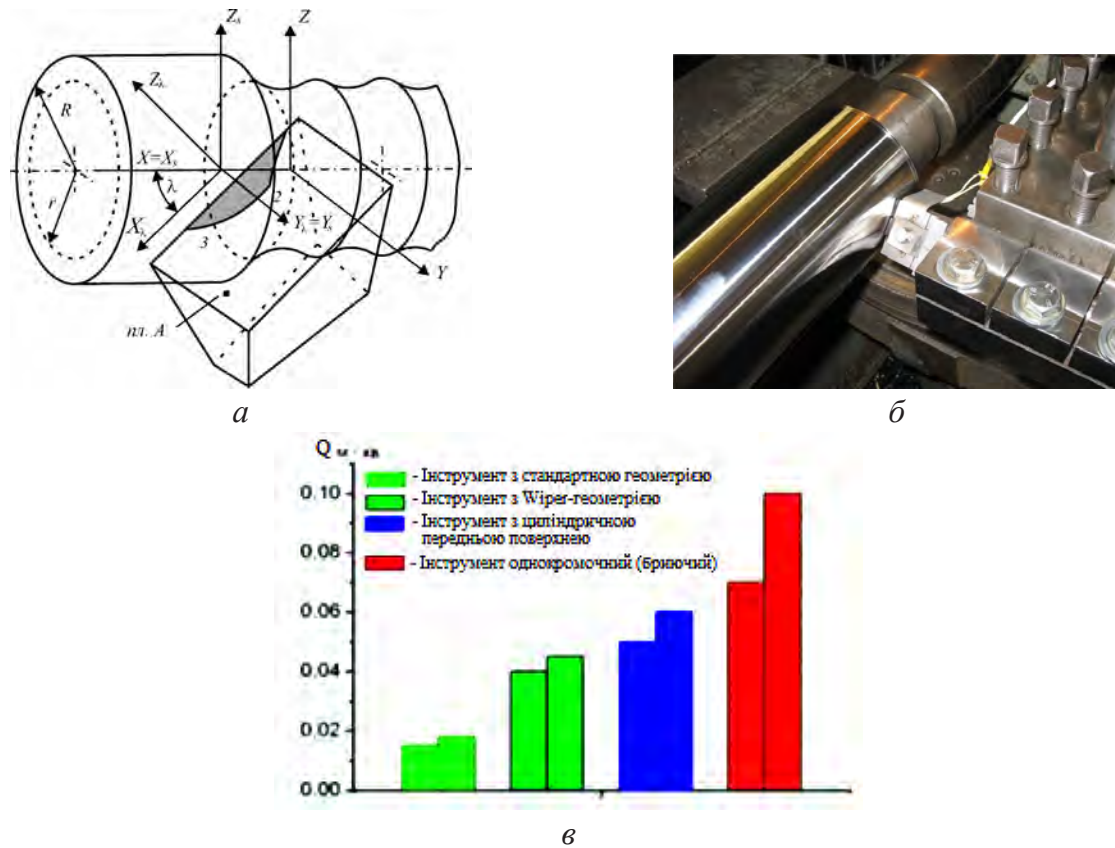


Рис. 7.6. Схематичне зображення знімасого припуску при «бриучому» обробленні (а), оброблення деталі із загартованої сталі «бриучим» різцем (б) поверхнева продуктивність оброблення інструментами, оснащеними ПКНБ, забезпечуючим шорсткість обробленої поверхні  $Ra$  0,32...0,63;  $Rz$  1,5...5,0 (в)

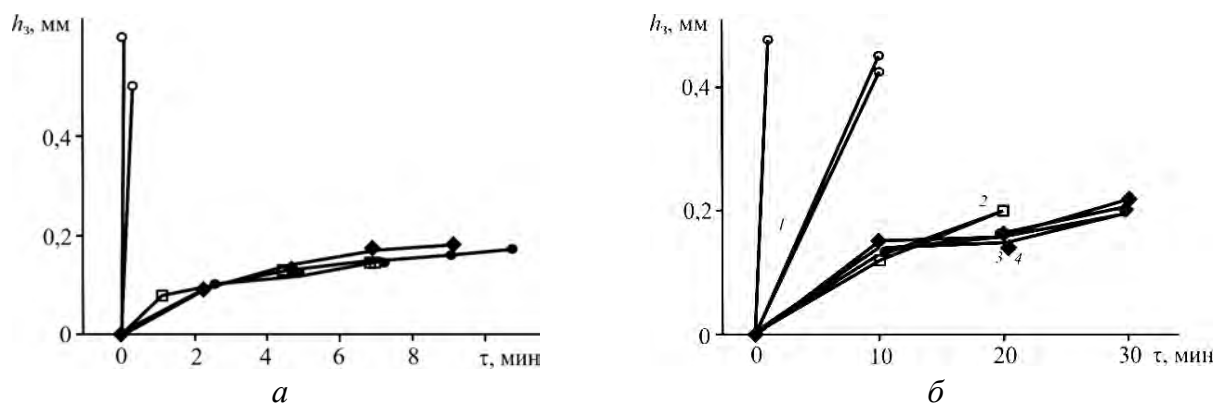


Рис. 7.7. Зношування інструменту з ПКНБ  $cBN-Si_3N_4$  (а; б, 2-4) та KBN 900 (б, 1) по задній поверхні при переривчастому точінні загартованих інструментальних сталей XBG60 HRC (а) и 9XC 60...62 HRC (б): а -  $v = 80...90$  м/хв,  $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,5$  мм;  $Si_3N_4$ , мас. %:  $\circ$  - 0,  $\square$  - 3,  $\blacklozenge$  - 6,  $\bullet$  - 10; пластина RNGN070300T; б -  $v = 80-82$  м/хв,  $S = 0,2$  мм/об,  $t = 0,8-0,9$  мм;  $Si_3N_4$ , 3 мас. %, пластины: 1 - RNGN120300T; 2 - RNGN070300T; 3 - RNGN090300T; 4 - RNGN120400T

Повне оброблення броні зі сталі 110Г13Л конусної дробарки проводиться одним інструментом з круглою пластиною RNUN 190700Т, використовуючи всю робочу довжину її різальних кромки (10–12 періодів стійкості), без мастильно-холоджуючих технологічних середовищ і без введення в зону підігріву додаткових видів енергії (наприклад плазмового підігріву).

Порівняння оброблення броні твердосплавним інструментом, твердосплавним інструментом з плазмовим підігрівом та інструментом з ПКНБ Кіборит RNUN 190700Т, показує, що в останньому випадку: у 5...7 разів підвищується продуктивність оброблення та у 2...3 рази збільшується стійкість інструменту порівняно з обробленням твердосплавними різцями; продуктивність оброблення наближає до продуктивності плазмово-механічного оброблення, при меншій витраті енергії та кращих умов праці.

*Оброблення напилених та наплавлених деталей.* Номенклатура деталей, що відновлюються та зміцнюються методами наплавлення та напилення (рис. 7.5, в, г), включає валки прокатних станів, конуси та чаші засипних пристроїв, деталі запірної апаратури безпечного запірного пристрою, правильні ролики та ролики рольгангів, різні вали ряд інших деталей. При їх точінні високу працездатність мають інструменти, що оснащені ПКНБ. Виконується як чистове оброблення, так і точіння безпосередньо по дефектній кірці покриття.

Промислові випробування показали, що різці з ПКНБ Кіборит дозволяють успішно обробляти деталі, відновлені напиленням з подальшим оплавленням покриттів із порошків ПС-12НВК2-01 (65% ПГ-10Н-01 + 35% WC), ПГ-СР3, ПГ-СР4, ПГ-ХН80С4Р4, ПН85Ю15, а також напиленням дротом 65Г, 40Х13 та іншими матеріалами. Застосування різців із ЗБНП з ПКНБ Кіборит-1 при точінні жароміцної наплавки (20Х16МГСА, 50 НРС) дозволило збільшити швидкість різання, порівняно з інструментами з твердосплавними пластинами SECO TP 1500, з 0,4 м/с (подача 0,2 мм/об) до 3 м/с.

*Оброблення деталей із чавуну.* Прокатні, млинові, каландрові та інші види валків з вибіленого чавуну виготовляються з твердістю бочок 2350...6200 МПа (37...85 НS). На багатьох металургійних заводах для їх оброблення використовуються високоточні вальцетокарні верстати з числовим програмним управлінням фірми «Геркулес» або інших зарубіжних фірм.

Ці верстати оснащуються різцями з механічним кріпленням круглих пластин з різальної кераміки, які обробляють прокатні валки з вибіленого чавуну з режимами різання:  $v = 0,3...0,4$  м/с,  $S = 0,12$  мм/об,  $t = 0,3...0,5$  мм. Стійкість пластин становить 1-2 проходи бочкою валка. Для точіння валків спеціально розроблені різальні пластини (RB, C, РМН) з ПКНБ Борсініт і оригінальна конструкція різця з їх механічним кріпленням.

Конструкція забезпечує можливість роботи інструменту під час різання на дузі більше 180°. Усі проходи (чорнові та чистові) проводяться без переустановки різальної пластини. Порівняння результатів випробувань різців з ПКНБ з керамічними різцями показало значну перевагу перших: за продуктивністю оброблення у 4...5 разів; за стійкістю в 2,9...3,4 рази. Інструмент зі змінними багатограними переточуваними пластинами з ПКНБ дозволяє обробляти валки як по бочці, так і по струмках з режимами різання: швидкість різання – 1,2 м/с на чорнових проходах і 1,4 м/с на чистовому проході; подача – 0,2 мм/об; глибина різання – 1,5 мм на чорнових проходах та 0,2 мм на чистовому проході. Після 25 хв роботи по бочці валка знос інструменту по задній поверхні становить до 0,10 мм.

Оброблення струмків проводили за чотири чорнові проходи та один чистовий прохід. Працюючи без переустановки різальної пластини повністю обробляється прокатний валок, тобто період стійкості пластини становить 125 хв. Інструментом, оснащеним однією круглою пластиною, обробляється по бочці та струмках 2–3 валка.

Слід зазначити, що оброблення різних видів чавунів (рис. 7.5, *д*) – один із найефективніших напрямків застосування інструменту, оснащеного ПКНБ.

*Оброблення деталей із твердого сплаву.* Інструмент, оснащений ПКНБ Борсиніт, дозволяє обробляти арматуру прокатних валків із твердих сплавів ВК25 (рис. 7.5, *е*), ВК30. При роботі зі швидкостями різання 0,2...0,3 м/с різальний інструмент до зносу по задній поверхні 0,25 мм обробляє три деталі по 120 мм із п'ятьма струмками в кожній.

*Оброблення деталей із сплавів на основі Ni.* Оброблення матеріалів високої твердості на нікелевій основі продуктивно та якісно виконується інструментами, оснащеними ПКНБ. Використання інструменту з кібориту дозволяє в 5...10 разів збільшити швидкість різання порівняно з прийнятими під час оброблення твердосплавними різцями. Незважаючи на те, що стійкість інструменту з ПКНБ у цих умовах може становити 1...2 хв, продуктивність процесу така, що цього часу достатньо для повного проходу інструменту по деталі.

Виробничі випробування інструменту з ПКНБ Кіборит-1 показали його ефективність при точенні нікелевих сплавів типу ВС та ВЖЛ. Оброблення нікелевих сплавів інструментом, оснащеним полікристалічний композитом СТМ Борсиніт, виконується з продуктивністю 2,8...3,0 см<sup>3</sup>/хв.

Поєднання високої твердості (36...38 ГПа) та високої теплопровідності (100...150 Вт/м×К) з достатнім рівнем тріщиностійкості ( $\geq 8$  МПа·м<sup>1/2</sup>) ПКНБ Кіборит-1 забезпечило можливість його використання у лезовому інструменті практично на всіх операціях чорнового, напівчистового та чистового точення широкого класу матеріалів.

*Інструменти для зварювання тертям із перемішуванням.* ПКНБ Кіборит-2 знайшов ефективне використання в інструментах для зварювання тертям із перемішуванням деталей (7.8), особливо листових, зі сталі.



**Рис. 7.8.** Інструменти с ПКНБ Кіборит-2 для зварювання тертям з перемішуванням

Цей матеріал обраний завдяки кращому поєднанню твердості, в'язкості руйнування, теплопровідності та вимогам до геометричних розмірів інструменту. З використанням інструменту з ПКНБ Кіборит-2 розроблено технологічні процеси наплавлення міді та нікелю на мідні пластини великої товщини методом наплавлення тертям з перемішуванням, зварювання нікелевих сплавів, сталей, жароміцного та нержавіючого сплавів, ряду інших матеріалів.

*Елементи конструкцій із надтвердих полікристалів.* ПКНБ Кіборит-2 та Кіборит-3 знайшли ефективне застосування у високонавантажених деталях у кубічних та тетрадрічних АВТ для заміни твердосплавних пуансонів. Матеріали показали значне (до 25 разів) збільшення терміну служби пуансонів та забезпечили досягнення вищого (до 40 ГПа) тиску порівняно з твердосплавними.

Деякі інструментальні та конструкційні вироби різного технологічного призначення з кібориту показано на рис. 7.9, 7.10.

Їх якість регламентується зерновим складом і міцністю при одновісному стисканні. Найбільш раціональними областями застосування шліфпорошків з кібориту є оброблення конструкційних сталей і чавуну, зносостійких наплавок та інших важкооброблюваних матеріалів.



**Рис. 7.9.** Елементи конструкцій з ПКНБ Кіборит-2 і Кіборит-3



**Рис. 7.10.** Пунсони кубічні АВТ, виконаного з ПКНБ Кіборит-2

*Інструменти абразивні.* Шліфпорошки cBN Кіборит мають високі фізико-механічні властивості, відрізняються переважним вмістом ізометричних зерен і можуть застосовуватися для виготовлення абразивного інструменту, особливо в тих випадках, коли потрібні порошки великих зернистостей. Порошки зернистістю 50/40...2000/1600 отримували дробленням масивних ПКНБ Кіборит.

Особливо ефективно використання шліфпорошків ПКНБ Кіборит зернистістю 1000/800 і вище в одношаровому інструменті на адгезійно-активних зв'язках для оброблення чавунок

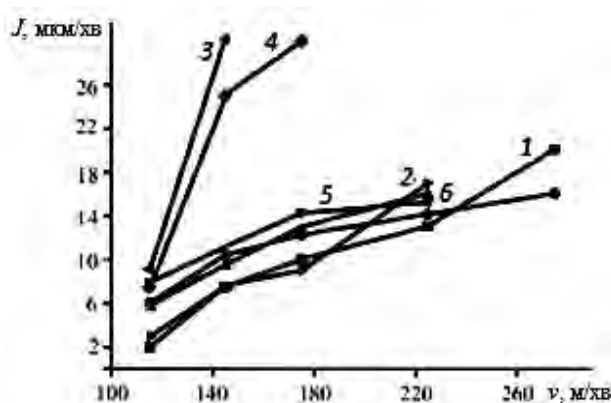
### 7.3.3. Оброблення інструментами, оснащеними композитами групи VL

При обробленні з невисокими швидкостями різання інструмент з ПКНБ зношується переважно по задній поверхні і зношування визначається інтенсивністю протікання процесів абразивної та адгезійної взаємодії контактуючих матеріалів. При швидкості різання більше 120 м/хв процес зношування інструменту значно інтенсифікується. Це пов'язано зі збільшенням температури в контактній зоні, що обумовлює інтенсифікацію хімічної взаємодії матеріалу інструменту з оброблюваним та елементами навколишнього середовища.

Проведені дослідження показують, що при використанні інструменту з композитом групи VL при оброблення загартованої сталі твердістю 60...62 HRC збільшення

швидкості різання вище 110 м/хв недоцільне через низьку стійкість інструменту (рис. 7.11).

Для виявлення особливостей застосування проведено дослідження працездатності інструментів, оснащених ПКНБ групи BL зі зв'язками на базі TaN, TiC, TiN (*c*BN(КМ)-TaN, *c*BN(КМ)-TiN, *w*BN-TiN, *c*BN(КМ)-TiC, *w*BN-TiC, *c*BN(АМ)-TiN, 55...45; *c*BN(КМ)-TiC, 75–25).



**Рис. 7.11.** Залежність швидкості зношування різців с ПКНБ від швидкості різання при точінні сталі ШХ15 (62 HRC) ( $S = 0,1$  мм/об;  $t = 0,2$  мм): 1 – CBN100 (Швеція); 2 – WBN565 (Німеччина); 3 – Томал-10 (Росія); 4 – Борсиніт (Україна); 5 – *w*BN (55 об.%) + TiN; 6 – *w*BN (55 об.%) + TiC; 7 – *c*BN (55 об.%) + TiC

Точіння ( $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,2$  мм) сталей ШХ15 (56...58 HRC), ХВГ (56...58 HRC). При точінні зі швидкістю різання 170 м/хв величина зносу по задній поверхні пластин з більшості партій не перевищувала  $h_3 = 0,1$  мм після 10 хв роботи, що свідчить про високу працездатність інструментів з матеріалів, що розглядаються при обробленні в таких умовах.

Процес точіння зі швидкістю різання 215 м/хв характеризується поступовим зносом інструментів і незначним монотонним збільшенням радіальної сили різання  $P_y$ . Значення тангенціальної сили різання  $P_z$  для всіх інструментів (за винятком ПКНБ *c*BN(КМ)-TaN, 55–45) практично не змінюється і становить 100 Н. Швидкість зношування інструментів досягає 10...12 мкм/хв.

З підвищенням швидкості до 265 м/хв швидкість зношування інструментів зростає до 15...18 мкм/хв (ПКНБ *c*BN(КМ)-TiC, *c*BN(АМ)-TiN, 55–45; *c*BN(КМ)-TiC, 75–25) а при швидкості різання 320 м/хв – до 25 мкм/хв (ПКНБ *c*BN(КМ)-TiC, *c*BN(АМ)-TiN, 55–45).

Точіння сталі ХВГ (62...64 HRC). У початковому періоді оброблення (3...4 хв – залежно від умов різання) інструментом з ПКНБ *c*BN(КМ)-TiC, 55–45 спостерігається інтенсивне збільшення радіальної складової сили різання  $P_y$ . При точінні зі швидкістю  $v = 200$  м/хв ( $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,2$  мм) першому проході (час проходу становить  $T = 3,3$  хв) такий зростання становить від 120 до 230 Н. Це пов'язано з утворенням фаски зносу по задній поверхні інструменту на стадії припрацювання, яка в даному випадку склала  $h_3 = 0,08$  мм. На наступних проходах спостерігається стабілізація зростання  $P_y$  (на кожному проході на 40...50 Н) та швидкості зношування інструменту.

Вимірювання величини зношування після 10 хв роботи (три проходи) показало, що ширина фаски зношування склала  $h_3 = 0,13$  мм. Стійкість інструменту до досягнення величини зношування  $h_3 = 0,4$  мм тривала 34 хв. Подальше підвищення швидкості різання

до 320 м/хв не призводить до істотної зміни характеру зношування інструменту: відбувається поступове зношування по задній поверхні і збільшення лунки на передній поверхні.

Для визначення технологічних можливостей інструменту, оснащеного композитами групи VL, проводилося оброблення загартованої сталі ХВГ (62 HRC) з підвищеними подачами. Для порівняння було вибрано інструменти, що мають високі експлуатаційні властивості при чистовому точенні – з ПКНБ  $cBN(KM)-TiC$ , 55–45 та CBN100 (фірма Seco). Інструменти при точінні зі швидкістю різання 215 м/хв та подачею 0,19 мм/об втрачали працездатність вже після 6 хв роботи. Для інструменту з ПКНБ CBN100 характерне інтенсивне зношування по задній поверхні, для інструменту з ПКНБ  $cBN(KM)-TiC$ , 55–45 – мікросколювання різальної кромки в контактній зоні.

Випробування міцності показали, що більш перспективним є інструмент, оснащений композитом із вмістом  $cBN$  70–75 об.%. Стійкість інструменту з ПКНБ  $cBN(KM)-TiC$ , 75–25 при точенні зі швидкістю різання 215 м/хв, подачею 0,19 мм/об та глибиною різання 0,2 мм становить 12,5 хв при величині зношування по задній поверхні  $h_3 = 0,35$  мм. На контактних поверхнях інструменту не спостерігається сколювання матеріалу композиту.

Вимірювання параметрів шорсткості обробленої поверхні після кожного проходу показало, що її якість залишається досить високою і після семи проходів – до настання величини зношування задньої поверхні  $h_3 = 0,35$  мм. При наступних проходах з'являється вібрація, що зв'язано із значним зростанням радіальної сили різання  $P_y$ , величина якої за таких умов оброблення досягає 1200 Н. При обробленні сталі меншої твердості (сталь ХВГ, 57 HRC) стійкість інструменту з ПКНБ  $cBN(KM)-TiC$ , 75–25 та  $cBN(KM)-wBN-TiN$ , 60–15–25 підвищується до 25...30 хв, що значно розширює сферу застосування інструментів з ПКНБ групи VL.

*Точіння сталі ШХ15 (62...64 HRC).* Порівняльну працездатність інструментів, оснащених розглянутими композитами групи VL, при точінні загартованої сталі ШХ15 (62...64 HRC) оцінювали порівняно з працездатністю інструментів з ПКНБ групи VL CBN100 (Seco, Швеція), WBN565 (Ceram Tec, Німеччина), Томал-10 (Томілінський завод алмазного інструменту), а також з працездатністю інструменту, оснащеного ПКНБ групи ВН – «борсиніт» (97 об.%  $cBN$ , Інститут надтвердих матеріалів НАН України ім. В.М. Бакуля).

Зі збільшенням зношування інструменту найбільш інтенсивно зростає радіальна сила різання  $P_y$ , що визначається площею контакту інструменту з оброблюваним виробом та інтенсифікацією тертя на задній поверхні. При точінні зі швидкостями різання 90...120 м/хв швидкість зношування інструментів з ПКНБ групи VL істотно не відрізняється і становить 3...9 мкм/хв, а стійкість інструментів при досягненні величини зношування по задній поверхні  $h_3 = 0,4$  мм – більше 60 хв. При точенні зі швидкістю різання 140 м/хв швидкість зношування інструменту ПКНБ Томал-10 становить 30 мкм/хв, а при швидкості різання 160 м/хв такий інструмент втрачає працездатність внаслідок швидкого руйнування різальної кромки.

Процес точіння зі швидкостями різання до 140 м/хв інструментами з іншими композитами характеризується поступовим рівномірним зносом по задній поверхні і монотонним збільшенням сили різання  $P_y$ . Зі збільшенням швидкості різання до 175 м/хв знос інструменту з борсиніту має вкрай нестабільний та інтенсивний характер. Різне східчає зростання складових сили різання  $P_y$  і  $P_z$  свідчить про утворення мікросколів на різальних кромках і контактних поверхнях інструменту.

Дані реєстрації сил різання та визначення величини зносу при обробленні інструментами з ПКНБ CBN100, WBN565, інструментами з ПКНБ  $wBN-TiN$ ,  $cBN(KM)-$

TiC, wBN-TiC, 55–45 вказують на відносно низьку швидкість зношування при такій швидкості різання.

При швидкостях різання 220 м/хв інструменти композитів групи VL зберігають високу працездатність, проте спостерігається інтенсифікація процесу зношування і зменшення їх стійкості. При такій швидкості різання зростає ймовірність виходу з ладу інструменту внаслідок сколювання його різальної вершини до досягнення критичної величини зносу інструменту по задній поверхні. При обробленні з високими швидкостями різання стружка нагрівається до дуже високої температури і однією з головних умов проведення процесу точіння є безпечне та швидке відведення стружки із зони оброблення (рис. 7.12).



**Рис. 7.12. Точіння з швидкістю різання  $v = 250$  м/хв заготовки з загартованої сталі ШХ15 (62 HRC) інструментом з ПКНБ cBN(KM)-TiC, 55–45**

За отриманими результатами досліджень побудовано залежності швидкості зношування розглянутих інструментів з ПКНБ груп VN та VL від швидкості різання (див. рис. 7.11), що підтверджують перспективність застосування інструментів з ПКНБ групи VL при точінні загартованих сталей з високими швидкостями різання.

Оброблення заготовок із сталі ХВГ (62...64 HRC) із дефектною поверхнею (одержуване точінням). При обробленні загартованої заготовки зі сталі ХВГ (62...64 HRC), на якій в осьовому напрямку мали місце тріщини осьові, були отримані наступні результати.

Вже за швидкості різання 190 м/хв інструменти з ПКНБ CBN100 мають низьку стійкість. Після 2,3 хв роботи спостерігаються інтенсивне зношування та руйнування задньої поверхні такого інструменту. При точінні за таких умов інструментом з ПКНБ cBN(KM)-TiC, 75–25 має місце рівномірне зношування без утворення явних макродефектів на різальних кромках. Швидкість зношування становить 16 мкм/хв, що відповідає стійкості інструменту 25...30 хв. З підвищенням швидкості до 250 м/хв протягом першої хвилини роботи відбувається катастрофічне руйнування інструментів з композитами з низьким вмістом BN.

Такі інструменти (на прикладі інструментів з ПКНБ cBN(AM)-TiN, 55–45 та CBN100) виходять з ладу внаслідок утворення макросколів на контактних ділянках, що свідчить про неможливість їх застосування при точінні навіть із незначним ударом.

При обробленні за таких умов інструмент з ПКНБ cBN(KM)-TiC, 75–25, зберігає свою працездатність до настання критичної величини зношування по задній поверхні. Характер зношування інструменту не змінюється – переважно зношується задня поверхня інструменту з утворенням лунки на передній поверхні.

Проведений комплекс дослідження показав, що інструменти, оснащені ПКНБ з низьким вмістом кубічного нітриду бору (група BL,  $cBN$  50–75%), дозволяють ефективно проводити чистове точіння загартованих сталей твердості до 62...64 HRC при високих швидкостях різання  $v = 180...270$  м /хв і підвищити продуктивність оброблення в 1,5...2,5 рази порівняно з існуючими технологіями. У таких умовах швидкість зношування інструментів із розглянутих ПКНБ в 1,5...5,0 рази нижча порівняно з інструментами, оснащеними ПКНБ з високим вмістом  $cBN$  (група ВН, 95–97 %), що дозволяє забезпечити високу якість обробленої поверхні при точінні в протягом тривалого часу (25...45 хв). При швидкостях різання більше 250 м/хв найбільш перспективним є застосування інструментів, оснащених композитом з  $cBN$  (55 об.%)–TiC.

Інструменти з ПКНБ та групи BL із вмістом  $cBN$  70–75 об.% за швидкістю зношування при точінні загартованих сталей (60...64 HRC) з високими швидкостями різання  $v = 180...270$  м/хв на 25...30 % поступаються інструментам, оснащеним композитами з вмістом  $cBN$  (50...55 об.%), проте дозволяють проводити оброблення при динамічних навантаженнях.

У таких умовах оброблення інструментами з ПКНБ з низьким вмістом  $cBN$  призводить до швидкого руйнування робочої частини за рахунок мікро-і макросколювань. Точіння інструментами з ПКНБ з вмістом  $cBN$  70–75 об.% може проводитися з підвищеними подачами при високій стійкості інструменту, що розширює сферу застосування інструментів з ПКНБ групи BL області напівчистового оброблення. Для розширення технологічних можливостей різальних інструментів при обробленні конструкційних сталей проведено дослідження працездатності інструментів, оснащених ПКНБ групи BL ( $cBN$  60–65 %) зі зв'язками на базі систем  $cBN$ -TiC-Al,  $cBN$ -Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Al,  $cBN$ -VC-Al,  $cBN$ -CrN-Al,  $cBN$ -VN-Al,  $cBN$ -CrB<sub>2</sub>-Al при точінні загартованої сталі Uddeholm Vanadis 4 Extra (P6M5) (60 HRC) та аустенітної нержавіючої сталі AISI 316L (03X17H14M3) (88).

Для підвищення її ефективності інструментів, оснащених ПКНБ групи BL та розширення області їх застосування на випадки оброблення з підвищеними подачами та динамічними навантаженнями розроблені композити, армовані віскерами, наприклад,  $cBN$ -TaN-Al-SiC<sub>w</sub>,  $cBN$ -TaN-Al-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>w,  $cBN$ -TaN-Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>w,  $cBN$ -TaN-Al-Mg<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>5</sub>w. Згідно з результатами досліджень, отриманими при високошвидкісному чистовому обробленні нержавіючої та загартованої інструментальної сталей, найбільш працездатними є інструменти, оснащені ПКНБ групи BL, що містять віскери Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>w і SiC<sub>w</sub> відповідно.

#### 7.4. Оброблення волокнистих композитів лезовим інструментом

Інструментальні матеріали для оброблення волокнистих полімерних композиційних матеріалів (ВПКМ) повинні забезпечувати високий опір абразивного зносу робочих поверхонь, мати низький коефіцієнт тертя, високі теплопровідність і теплостійкість. В даний час для оброблення ВПКМ часто застосовують твердосплавні інструменти. Найбільш часто застосовуються дрібнозернисті тверді сплави. Додаткове підвищення різальної здатності інструментів при обробленні ВПКМ можна досягти за рахунок нанесення на робочі поверхні твердосплавних інструментів зносостійких покриттів або використання полікристалічних надтвердих матеріалів на основі алмазу.

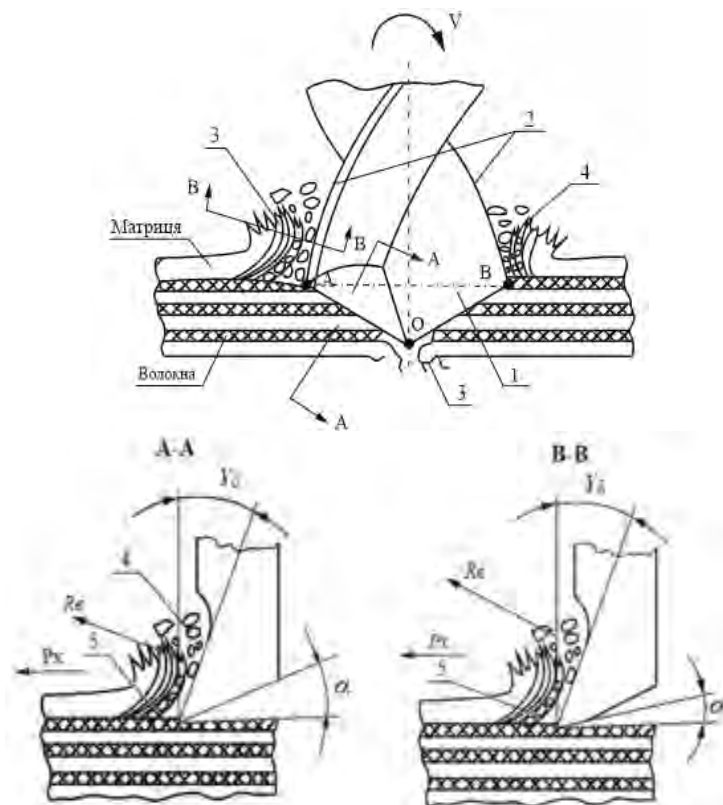
Для формування отворів в однорідних і змішаних пакетах, що містять ВПКМ, необхідне застосування осьового інструменту спеціальної конструкції, що забезпечує зменшення осьової сили. Зменшення кута при вершині і багатоплощинна заточка дозволяють поліпшити якість і збільшити продуктивність оброблення отворів в ВПКМ

Твердосплавні свердла також випускаються з покриттями, у тому числі алмазними CVD, PVD покриттями. Свердла з покриттям демонструють більш високу стійкість в порівнянні зі свердлами без покриття, але вища вартість та неможливість здійснення багаторазової переточки різального інструменту знижують їх економічну доцільність.

Серед свердел з НТМ можна виділити лезові та абразивні свердла, які оснащені різальною частиною з композиційного полікристалічного алмазу (polycrystalline diamond (PCD) та алмазного порошку відповідно. Абразивні свердла в переважній більшості мають конструкцію кільцевих свердел з нанесеним абразивним порошком. Недоліками їх є неможливість переточки та формування певної геометрії різальної частини за відсутності різальних кромки. Кільцеві свердла із низькою зернистістю абразивного порошку забезпечують високу якість оброблення, а саме низьку шорсткість поверхні отвору, але свердління супроводжується високою температурою в зоні різання через майже суцільний контакт поверхні різального інструменту з оброблюваною поверхнею.

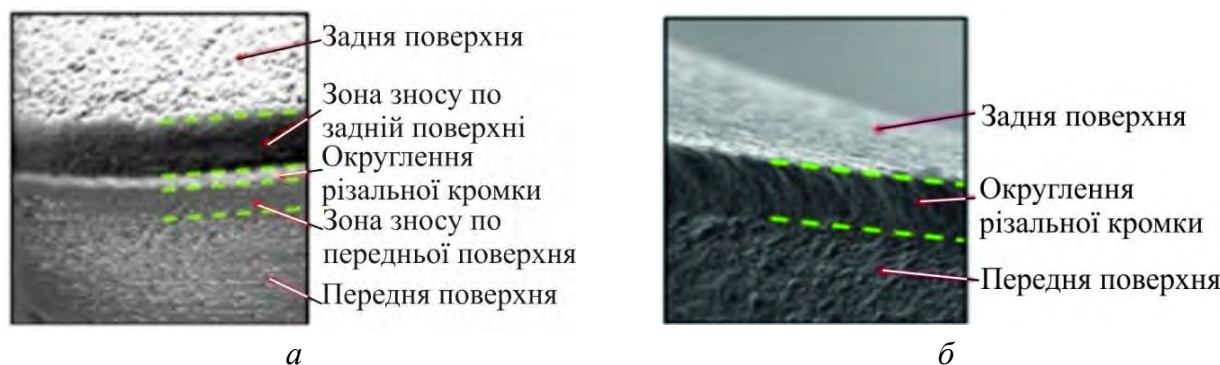
Лезові свердла з НТМ є більш універсальними в порівнянні з кільцевими абразивними свердлами. Перевагами застосування надтвердих полікристалів в конструкціях свердел для оброблення ВПКМ безсумнівно є можливість забезпечення малого радіусу різального інструменту (до 4,3 мкм). В сучасній промисловості основними представниками комерційних моделей свердел з PCD спеціалізованих для оброблення ВПКМ є компанії SECO Tools та Sandvik AB, які представляють свердла SD203-CX1 та SD203-CX2, Sandvik Coromant AB, яка представляє свердла 85 PT та 86 PT, оснащені PCD пластинами і мають радіус РК  $R = 4,2$  мкм.

Схема свердління ПКМ наведена на рис. 7.13.



**Рис. 7.13.** Схема свердління полімерних композиційних матеріалів: 1 – головні різальні кромки; 2 – бокові різальні кромки; 3 – відколи поверхневих шарів; 4 – пакетування пиловидної стружки; 5 – мікротріщини;  $P_x$  – напрям сили різання;  $R_t, R_b$  – напрям сил різання від головних (А-А) і бокових різальних кромки (В-В)

На рис. 7.14 наведено зображення різальної кромки свердла SECO SD290A-7.963-27-8R1-C1 з CVD алмазним покриттям та SECO SD203-7.94-27-8R1-CX1 оснащеним PCD.



**Рис. 7.14. Різальні кромки свердл SECO SD290A-7.963-27-8R1-C1 (а), SECO SD203-7.94-27-8R1-CX1 (б)**

З урахуванням низької теплоємності та теплопровідність ПКМ у поверхневих шарах, в характерних зонах отворів, утворює дефекти. Найпоширені це відколи, розшарування, конусність, еліпсність, мікротріщини та припали за рахунок деструкції матричного матеріалу.

З метою підвищення ефективності оброблення деталей ВПКМ за рахунок підвищення стійкості інструменту використання у ньому PCD є більш доцільним – свердла з PCD демонструють в 5 і 20 разів вищу стійкість ніж твердосплавні з CVD алмазним покриттям та твердосплавні свердла без покриття, відповідно.

## 7.5. Виглажування і накатування інструментами з композитами на основі алмазу

Застосування оздоблювально-зміцнювальних методів, заснованих на холодному поверхневому пластичному деформуванні (ХППД), є ефективним способом підвищення довговічності деталей машин та приладів. Утворення мікрорельєфу з мікронерівностями пологої «обтічної форми», низькі значення їх висоти, великі величини відносної опорної довжини профілю, наявність шару деформаційного зміцнення підвищують зносостійкість і опір втомним навантаженням.

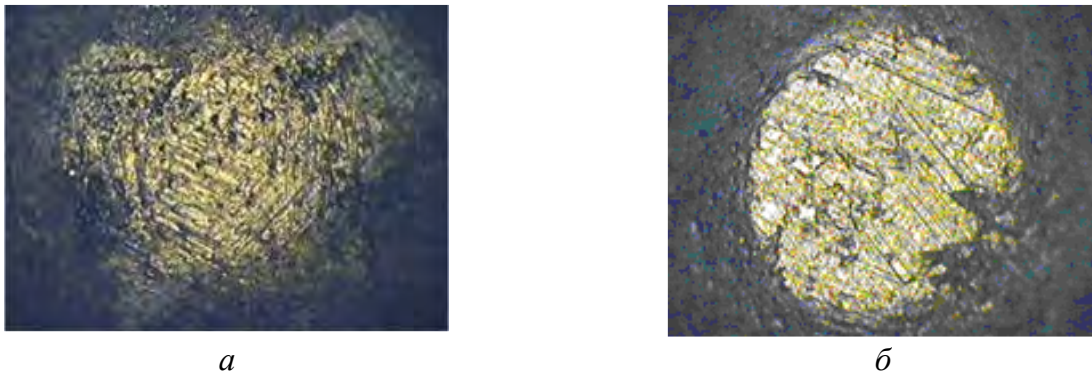
Застосування МОТС позитивно впливає якість обробленої поверхні і стійкість інструмента. Експериментально встановлено, що з найбільш доступних видів МОТС при виглажуванні сталей найбільш ефективним є індустріальне масло I-20A.

Характер зношування вигладжувачів з АКТМ (алмазний композиційний термостійкий матеріал) при обробленні сталей – адгезійний – на зношеній поверхні видно «виразки» викришування кристалів алмазу (рис. 7.15).

Характер зношування вигладжувача з полікристалічного алмазного матеріалу АСПК (карбонадо) відрізняється від АКТМ. На зношеній поверхні відсутні «виразки», характерні для адгезійного зносу. Підвищення термостійкості вигладжувачів за рахунок застосування вставок з АКТМ дозволяє підвищити швидкість виглажування та продуктивність процесу при зниженні сили тертя.

Слід зазначити, що АКТМ є перспективним матеріалом для вигладжувачів, що застосовуються для оброблення виробів із сталі. У той же час він не дозволяє ефективно

обробляти вироби з титанових сплавів, цирконію, ніобію, що пов'язано з підвищеною схильністю до захоплення алмазу з цими матеріалами.



**Рис. 7.15.** Вид зношеної поверхні вигладжувача з АКТМ (а) и АСПК (б)

Оздоблювально-зміцнююче оброблення виробів із цих матеріалів доцільно виконувати накочуванням кулями, тобто методом, у якому тертя ковзання зведено до мінімуму, а переважає тертя кочення.

Накатники з робочим елементом з АКТМ показали високу працездатність при обробленні виробів з титанових сплавів:

- при вихідній шорсткості оброблюваної поверхні  $Ra$  5...7, можна отримати шорсткість  $Ra$  0,15 та 0,25 для титанових сплавів BT1-0 та BT22 відповідно;

- при накочуванні поверхні виробу з титанового сплаву BT1-0 мікротвердість збільшується в 1,6 рази при глибині зміцненого шару до 400 мкм, при накочуванні поверхні виробу з титанового сплаву BT22 – в 1,1 раза при глибині зміцненого шару до 100 мкм;

- стійкість робочого елемента з АКТМ при накочуванні титанових сплавів як мінімум в 5 разів перевищує стійкість робочого елемента ШХ15. Застосування накатників з робочим елементом з АКТМ дозволяє суттєво розширити технологічні можливості процесу накочування та знизити ймовірність появи браку.

## 7.6. Алмазно-електрохімічне оброблення полікристалічними катодами

Полікристалічні катода (ПК) призначені для алмазно-електрохімічного чорнового знімання металу та подальшого чистового механічного доведення отриманої поверхні. Область застосування ПК широка і визначається номенклатурою виробів, що обробляються, а кількість типорозмірів ПК практично не обмежена.

Незважаючи на те, що зносостійкість ПНТМ залежить від великої кількості факторів (розміру зерен, типу оброблюваного матеріалу, режимних параметрів тощо) при виборі полікристалів для катода можна орієнтуватися за їх твердістю.

Для забезпечення при алмазно-електрохімічному обробленні полікристалічними катодами (АЕОПК) низької шорсткості оброблюваної поверхні, наприклад, по твердому сплаву  $Ra$  0,08, зерна алмазу або ПКНБ повинні бути, орієнтовно, величиною 10 мкм. При цьому в катодах, призначених для АЕОПК твердосплавних виробів, бажано використання ПНТМ на основі алмазу, а для оброблення сталевих на основі cBN, хімічно інертного до заліза та його сплавів.

Коли доводиться обробляти отвори малого діаметра, наприклад, у твердосплавних волоках з каналом діаметром 2...3 мм і з використанням самого полікристалу як катодну

частину ПК для проходження через нього технологічного струму, то опір його має бути орієнтовно 20...100 Ом. При такому варіанті АЕОПК технологічний струм розгалужується на дві складові: струм короткого замикання, що проходить через ПНТМ, і струм, що проходить через електроліт в бічних зазорах між спеціальними поверхнями лисок на полікристалі і оброблюваній.

Значно розширюють можливості АЕОПК комбіновані інструменти-катоди, що оснащуються полікристалічними та алмазно-абразивними елементами. Необхідність у них впливає зі складності виправлення вихідної форми оброблюваного отвору шляхом тільки електрохімічного розчинення сплаву, коли доводиться видаляти значний припуск на оброблення, так як при АЕОПК зазвичай матеріал видаляється електрохімічним розчиненням еквідистантно вихідної форми оброблюваної поверхні.

При необхідності вирівнювати поверхню отвору або усувати значну його конусність, а загалом – локалізувати електрохімічне розчинення на необхідних ділянках, де має відбуватися знімання металу або сплаву, поверхню покривають тонким шаром електроізоляційного клею, наприклад, УП 5–207.

В процесі оброблення ділянок каналу, на яких потрібно забезпечити розчинення сплаву для пошарового вирівнювання оброблюваної поверхні клей необхідно зчищати. Для цього використовуються алмазно-абразивні елементи, що виконують у процесі оброблення роль абразивних скребків.

Можливість здійснення такого технологічного прийому ґрунтується на практично однаковій продуктивності АЕОПК обертовим і необертальним інструментом у разі незмінної частоти обертання оброблюваної заготовки, як це має місце при внутрішньому шліфуванні. Це дозволяє спочатку зачищати алмазно-абразивним елементом ПК найбільш виступаючі нерівності оброблюваної поверхні, забезпечуючи тим самим їх випереджаюче електрохімічне травлювання. Потім, повернувши відповідним чином інструмент, проводять її доведення полікристалічними елементами, включаючи стадію полірування.

До цієї групи комбінованих інструментів примикають алмазні свердла або зенкери, що оснащуються полікристалами надтвердих матеріалів. Вони дозволяють отримувати одним інструментом отвори в цілісній заготовці або видаляти великий припуск на оброблення, а також доводити отриману поверхню на рівні полірування до забезпечення заданих параметрів за якістю. При цьому на етапі чорнового знімання може бути усунений ексцентриситет або овальність отвору без попереднього покриття поверхні стінки клейової ізоляцією. Особливо ефективним є використання комбінованих конічних зенкерів при обробленні неглибоких циліндричних отворів.

Алмазно-абразивні інструменти бувають з алмазозносним шаром двох видів: на гальванічній або металокерамічній зв'язках з високоміцними алмазами АС15, АС20.

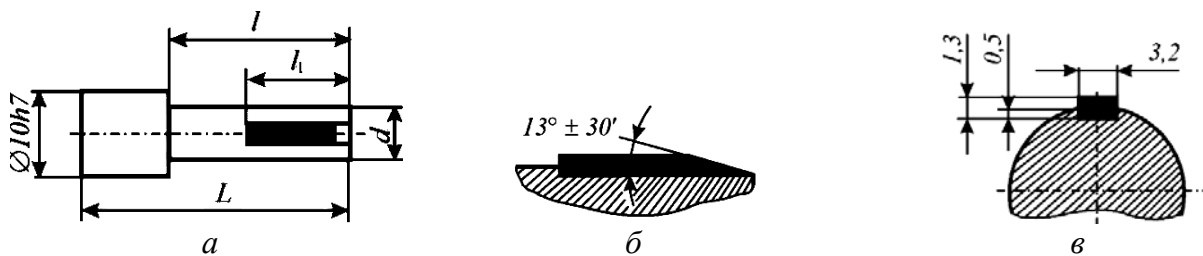
Інструменти з алмазозносним шаром на гальванічній (зазвичай нікелевій) зв'язці характеризуються високими продуктивністю та стабільністю різальних властивостей. Разом з тим, такі інструменти зазвичай мають всього 1...2 шари алмазів і, отже, характеризуються нетривалим терміном служби. Крім того, вирівнювання алмазозносного шару утруднено, так як абразивна правка інструменту може призвести до відчутного або навіть повного видалення алмазозносного шару. Зазначені недоліки відсутні в інструментах з алмазозносним шаром на металокерамічних зв'язках. Такі інструменти мають алмазозносний шар діаметром 4...20 мм, довжиною 4...20 мм, товщиною 1,2...6,6 мм при загальній довжині інструмента 40...80 мм.

Для шліфування каналів холодновисадкових матриць ефективно також застосування алмазних інструментів типу А8 (А1ПП) з алмазозносним шаром діаметром 6...13 мм, довжиною 6...10 мм.

Широкі можливості у створенні інструментів для оброблення твердосплавних холодновисадкових матриць відкриває листовий алмазозносний прокат. Промисловість випускає пластини недеформованого прокату товщиною 0,15...6,3 мм з алмазами АСМ, АСН зернистістю 20/14...60/40 та алмазами АС6, АС15, АС20, АС32 зернистістю 50/40...500/400 на с1 М5-22. Ширина та довжина пластин дорівнює 100...400 мм. З таких пластин електроерозійним способом вирізують бруски, які потім вклеюють в корпуси інструментів (рис. 7.16).

Для інструментів, що застосовуються в процесах АЕО, ефективно можуть бути використані й хонінгувальні бруски типу АБХП 60×3×1,5×4,9×2 АС32 250/200 100 МП1, які вклеюють у відповідні пази корпусу катода. При цьому забезпечується виступ робочої поверхні алмазозносного шару над корпусом, орієнтовно на 0,5 мм.

Алмазно-абразивні інструменти, незважаючи на їхню високу ефективність, дозволяють здійснювати тільки попереднє, чорнове знімання основного припуску на оброблення. Чорнове знімання сплаву в поєднанні з довідковими операціями при високій стійкості робочого інструменту здійснюється полікристалічними катодами.



**Рис. 7.16. Катод с алмазно-абразивним бруском:** схема ( $L$  – загальна довжина катода;  $l$ ,  $d$  – довжина і діаметр робочої частини катода;  $l_1$  – довжина бруска) (а); продольний і поперечний перетин катода (б, в)

При АЕОПК знімання твердого сплаву відбувається в основному за рахунок його електрохімічного розчинення в умовах «абразивного тертя» та продуктивність процесу оброблення за інших рівних умов залежить від сили технологічного струму, яка в свою чергу визначається катодною площею ПК – чим менша кількість полікристалів знаходиться в корпусі катода, тим більше його катодна площа і повинен бути вищим технологічний струм. З цього погляду найбільш прийнятними є однорядні ПК.

В разі відгинання інструмента під дією радіальної сили його притиску, ПЕ можуть залишати на оброблюваній поверхні гвинтоподібний слід-царапину, якщо ряд ПСТМ короткий, або контактувати з поверхнею тільки невеликою ділянкою ряду, виключаючи можливість оброблення всієї поверхності отвору, якщо ряд полікристалів довгий. Великими можливостями забезпечити низьку шорсткість обробленої поверхні (до  $Ra$  0,08) мають багаторядні ПК.

Так як застосування інструментів з короткими рядами полікристалів підвищує ймовірність появи на поверхні отвору гвинтової подряпини, то короткорядні ПК доцільно використовувати в основному для попереднього знімання припуску.

В подовжених корпусах ПК довжини катодних ділянок до і після полікристалів повинні дорівнювати довжині отвору для того, щоб при осьовій осциляції інструменту в будь-який момент оброблення розчинення сплаву відбувалося постійно по всій поверхні матриці.

Для чорнового АЕО каналів малого діаметра (3...4 мм) в твердосплавних заготовках холодновисадочних матриць можуть бути використані також інструменти-католи, що

являють собою стрижні сегментного перерізу з пружинного дроту з алмазно-абразивними або полікристалічними елементами, що припаюються до них.

При АЕОПК знімання сплаву відбувається практично лише шляхом його електрохімічного розчинення з еквідистантним копіюванням вихідної форми оброблюваної зони каналу матриці. Якщо на ній є нерівності, овальність, конусність, виправити їх багатопрохідний АЕОПК практично неможливо. Тому перед обробленням поверхні каналу матриці покривають тонким шаром електроізоляційного матеріалу, наприклад, клею УП 5-207, що виконує в даному випадку роль захисного екрану від електрохімічного розчинення сплаву.

При обертанні заготовки та осьової осциляції катода, що контактує зі сплавом, здійснюється зачистка від клею поверхонь на виступах мікронерівностей і забезпечується можливість їх електрохімічного стравлювання. Пошарове зачищення поверхні від клею відбувається і на інших ділянках поверхні в міру знімання сплаву. Процес локалізованого знімання металу в результаті призводить до вирівнювання поверхні. Для можливості здійснення цього ПК повинен мати абразивну ділянку, наприклад, у формі бруска, що дозволяє здійснювати зачистку поверхні від електроізолюючого покриття. Вимога стає здійсненою завдяки можливості вести оброблення необертаючимся ПК при повороті його по черзі алмазно-абразивним або полікристалічним ділянками для контактування з оброблюваною поверхнею.

Так як при АЕОПК периферійною частиною інструменту-катода механічного, абразивного знімання сплаву не відбувається, то сила притиску його до оброблюваної поверхні на етапі чорнового, електрохімічного знімання необертаючимся ПК може бути невеликий (5...10 Н). Для етапу механічного доведення отриманої поверхні необертаючимся інструментом таке зусилля притиску є недостатнім і на етапі доведення інструменту надають обертання. Щоб абразивна ділянка комбінованого ПК при цьому не залишала на сплаві подряпин, робочу поверхню алмазно-абразивного бруска при виготовленні ПК занижують щодо робочої поверхні полікристалів.

До довгорядних ПК відносяться полікристалічні катоди типу хонінгувальних головок. Такі інструменти використовуються при обертанні тільки оброблюваної заготовки і характеризуються тими самими перевагами, що й однорядні ПК. У них є один рухомий хонінгувальний брусок і два опорні. Опорні та рухомі бруски контактують з оброблюваним виробом завдяки розтискному зусиллю, створюваному внутрішньою пружиною хонінгувальної головки через її шток. Коли припуск виявиться рівним нулю, автоматично відключається джерело технологічного струму і подається сигнал переходу верстата на здійснення доведення. Так як хід рухомого хонінгувального бруска не перевищує 1 мм, то різниця діаметрів каналу і хонінгувальної головки також не може перевищувати 1 мм, що вносить обмеження в номенклатуру хонінгувальних брусків і головок для такого різновиду АЕОПК.

Проблемними питаннями в обробленні тврдосплавних холодновисадкових матриць є пошук способів підвищення продуктивності на операції оброблення довгих каналів малого діаметра (3...6 мм) і поліпшення якості обробленої поверхні на внутрішніх кінцевих переходах в матрицях, що редукують. Для їх вирішення прийнято дві принципи схеми АЕОПК каналу матриць: оброблення прутковим (або трубчастим) ПК, що закріплюється в розтягуючих його центрах, і оброблення стрижневим катодом, що переміщається по осі каналу подібно до розгортки. Таке рішення ґрунтується на наступному.

Однією зі специфічних особливостей АЕОПК є відсутність припрацювання полікристалічних елементів катода за формою в процесі оброблення, що обумовлюється їх роллю в процесі АЕОПК – зносостійкі електроізоляційні прокладки між катодною і

оброблюваною поверхнями, регламентуючи висоту міжелектродного зазору між ними і видаляючи продукти електрохімічних реакцій з металу. Мікрорізання вони не виконують і тому дуже мало зношуються.

Алмазно-абразивний елемент ДПК закріплюється в площині перпендикулярної площині основного ряду полікристалів. У процесі оброблення ДПК не обертається. Його повертають залежно від того, яким елементом необхідно працювати на даній стадії формування поверхні – абразивним чи полікристалічним.

Стрижневий полікристалічний катод (СПК) призначений для знімання припуску на оброблення в твердосплавних заготовках матриць з діаметром каналу 3...6 мм. Він може бути використаний також для доведення внутрішньої конічної поверхні редуруючої ділянки каналу. У цьому випадку розміри та форма робочої частини катода задаються відповідно до розмірів, зазначених у кресленнях на матрицю. У разі оброблення такими катодами редуруючих матриць кут західної частини СПК вибирається рівним куту конічного переходу всередині каналу матриці. З метою інтенсифікації алмазно-електрохімічного знімання сплаву шляхом посилення корозійного мікроруйнування оброблюваного шару доцільно застосовувати полікристалічні елементи з великих алмазних зерен, що забезпечують мікрорізання при глибокому поверхневому розтріскуванні металу. Різновидом СПК є катоди з полікристалічними елементами, розташованими в середній частині його корпусу. Оброблення такими катодами здійснюється за схемою багатопрохідного шліфування при пружній поперечній подачі не обертаючого інструменту. Хід його при цьому варіанті оброблення не може бути більше половини довжини СПК, що визначає довжину каналу матриці, оброблюваної катодом розглянутого типу.

При осциляції СПК з полікристалічним елементом у середині корпусу в будь-який момент оброблення піддається електролітичному розчиненню вся поверхня каналу, а алмазний елемент зчищає продукти електрохімічних реакцій. Завдяки цьому забезпечується висока продуктивність при чорновому зніманні сплаву. Якщо в такому СПК розташовують з одного боку корпусу дрібно-, а з іншого крупнозернистий полікристали, то після чорнового знімання сплаву можна проводити дрібнозернистим полікристалом і доведення оброблюваної поверхні на рівні полірування.

В разі оброблення циліндричних отворів або розшліфовування конічних, коли заготовці надають обертання, інструмент-катод у кожний момент контактує своїм полікристалічним елементом з поверхнею сплаву по мікродузі, що утворюється дотиком ПСТМ по гвинтовій лінії з циліндричною або конічною поверхнями.

При обертанні інструмента-катода ділянка торкання переміщається за кожен оборот по всьому периметру ПЕ, а на оброблюваній поверхні залишається слід від контактування обертових поверхонь. При цьому траєкторія контакту має вигляд синусоїди. Так як у процесі оброблення всі ділянки робочої поверхні контактують з оброблюваною один і той же час і за однакових умов, то знос ПЕ відбувається рівномірно по всьому його периметру. Тому не потрібно реставрувати ПЕ круглим алмазним шліфуванням. У міру зношування ПЕ потрібно лише забезпечити виступання робочої поверхні ПЕ щодо катодної на 0,2...0,3 мм, що здійснюється зазвичай електролітичним травленням корпусу катода за відомою технологією.

**Контрольні запитання**

1. Основні параметри різальних інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів.
2. Особливості реометричних параметрів монокристалічних інструментів.
3. Оброблення монокристалічними інструментами.
4. Оброблення інструментами із полікристалічних матеріалів на основі алмазу.
5. Оброблення інструментами із полікристалічних матеріалів на основі кубічного нітриду бору групи ВН.
6. Оброблення інструментами із полікристалічних матеріалів на основі кубічного нітриду бору групи ВL.
7. Підвищення продуктивності оброблення різальними інструментами із полікристалічних надтвердих матеріалів.
8. Оброблення полімерних композиційних матеріалів.
9. Конструкційні елементи із полікристалічних надтвердих матеріалів.
10. Оброблення поверхневим пластичним деформуванням інструментами із надтвердих композитів.
11. Комбіноване оброблення інструментами із надтвердих композитів.

## РОЗДІЛ 8 ПОКРИТТЯ В ІНСТРУМЕНТАХ З НТМ

Однією із основних тенденцій вдосконалення різальних інструментів є нанесення на їхні робочі поверхні захисних покриттів [11]

Найбільш ефективним для інструментів є покриття, які забезпечують зменшення температури в зоні різання за рахунок мінімізації тертя на контактних ділянках, запобігають протіканню хімічних реакцій із оброблюваним матеріалом і утворенню з його компонентами хімічних сполук, мають низький рівень внутрішніх залишкових напружень, характеризуються високими трибологічними властивостями за рахунок комплексу фізико-механічних параметрів, мають низьку крихкість та підвищену пластичність для мінімізації механічного руйнування.

Зниження внутрішніх напружень термічного характеру в покритті досягається за рахунок використання у їх складі матеріалів, які близькі за своїм хімічним складом до інструментальної основи, що дозволяє зменшити різницю коефіцієнтів температурного розширення.

### 8.1. Покриття для порошків НТМ

У сучасних технологічних процесах виготовлення інструменту з порошків алмазів і кубічного нітриду бору покриття використовують для активування процесів змочування, адгезії, хімічної взаємодії в системі зерно НТМ-покриття-зв'язка, що дозволяє підвищити ступінь утримання зерен у зв'язці та працездатність абразивного інструменту (рис. 8.1, 8.2).

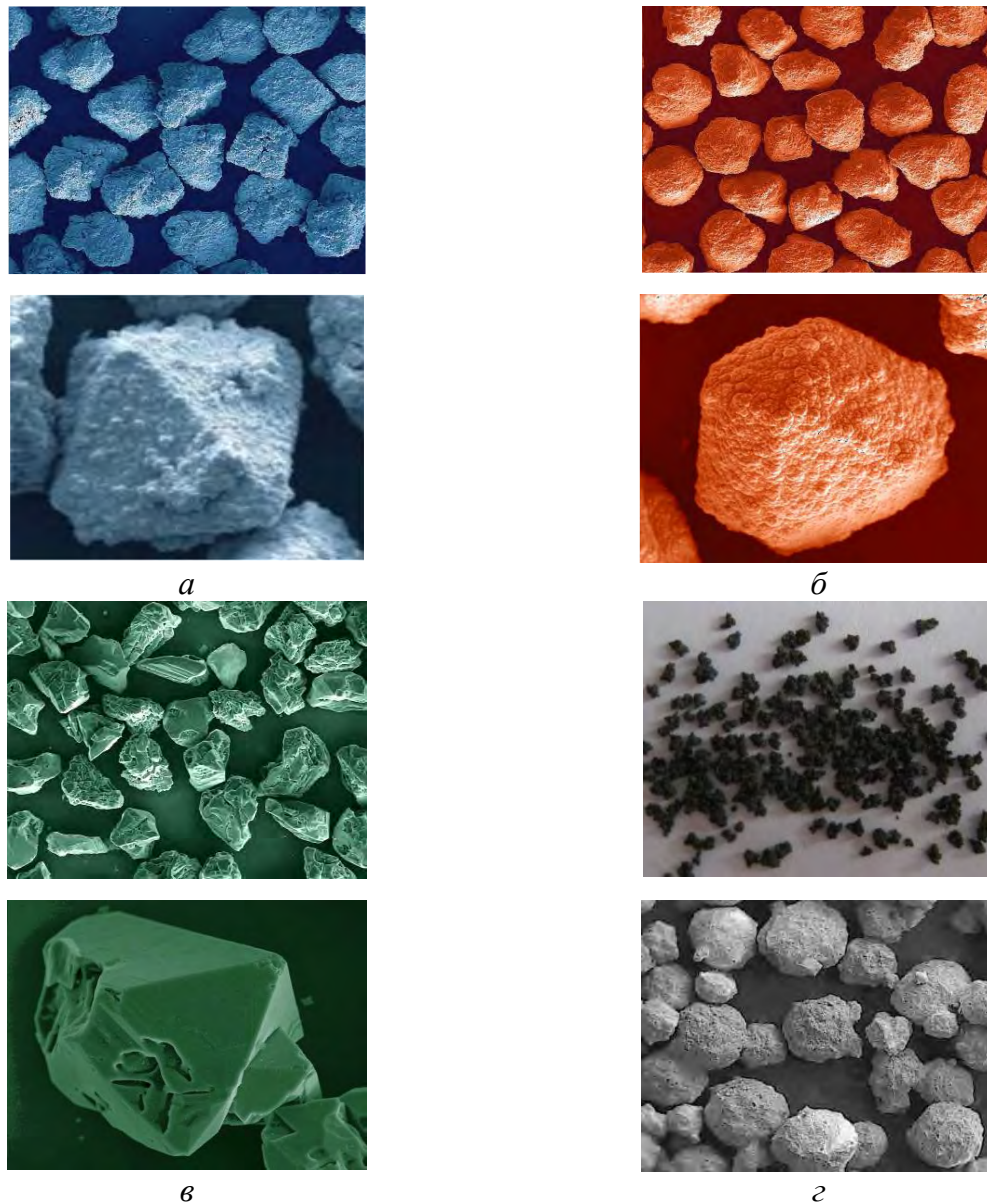
Створення і широке застосування нових високоміцних і термостійких марок алмазів AC15, AC20, AC32, AC40, AC50, AC65, AC80, AC50T, AC65T, AC82T, AC105T, AC132T, а також cBN різних марок вимагає розробки покриттів і методів їх нанесення.

Нанесення покриття на порошки НТМ підвищує експлуатаційні характеристики інструменту, дозволяє створити принципово нові полімерні, металеві або керамічні композиції, що мають якісно інші властивості, що забезпечують підвищення режимів оброблення матеріалів, продуктивність обладнання при значному збільшенні надійності та довговічності інструментів. Отже, вдосконалення існуючих та створення нових покриттів, а також методів їх нанесення на порошки НТМ є важливим завданням у виробництві інструменту. Її рішення має велике народногосподарське значення.

Як покриття порошків НТМ використовуються метали, їх карбіди, нітриди і оксиди, металеві композиції, органічні та силікатні матеріали. Покриття розрізняються фізико-механічними і хімічними властивостями: зносо- і термостійкістю, пластичністю, антифрикційними характеристиками, коефіцієнтом термічного розширення, хімічним зв'язком із зернами алмазу або cBN, внутрішніми напруженнями тощо.

При нанесенні покриттів на кожне зерно НТМ (поодинокі металізовані зерна) або на кілька зерен спільно (агреговані металізовані порошки) осаджується шар (наприклад, металу) певної товщини. В результаті підвищується міцність зерен, покращується ступінь утримання їх у зв'язках, збільшуються твердість, теплопровідність, міцність та ударна в'язкість робочого шару, що в результаті призводить до підвищення надійності та довговічності інструменту. Вибір матеріалу та методу нанесення покриттів на зерна НТМ залежить в основному від марки НТМ, зв'язки алмазно-абразивного інструменту та умов його застосування.

Покриття умовно можна розділити на три групи: металеві, неметалеві та композиційні. Найбільшого поширення отримали металеві покриття.

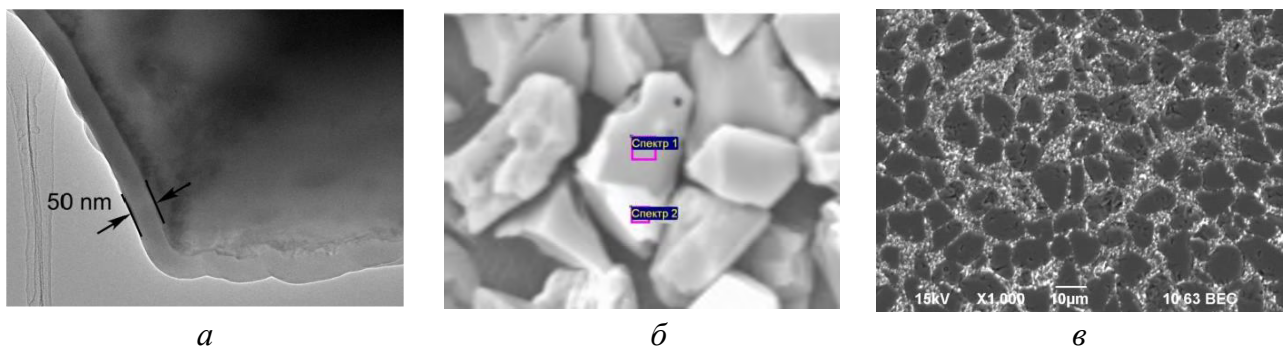


**Рис. 8.1.** Покриття на порошках алмазу: *а* – нікель; *б* – мідь; *в* – хром; *г* – скло

Наносять їх на порошки НТМ різними способами: електролітичним, хімічним, карбонільним, катодного наплення, з розплаву, розпиленням металічного розплаву, що містить алмази, під тиском, безпосередньо в ході синтезу.

Покриття можуть бути різної товщини, одно-, дво-, три-і багат шаровими. Для надання специфічних властивостей їх піддають хімічному травленню, науглерожують, формують голчасті виступи, проводять термооброблення, окислюють тощо. Найчастіше порошки НТМ з покриттям використовуються для виготовлення інструменту на органічних та металевих зв'язках, рідше – в інструменті на керамічних зв'язках та пастах, а також у вільному стані.

Для поліпшення фізико-механічних властивостей (твердості, зносостійкості, крихкості, міцності тощо) до складу покриттів вводяться дрібнодисперсні порошки тугоплавких металів, карбідів, антифрикційних та інших матеріалів. Такі покриття називають композиційними.



**Рис. 8.2.** Покриття на порошках cBN (*a* – SiO<sub>2</sub>, отримане методом RCVD; *б* – AlCrSi, отримане вакуумно-дуговим PVD-методом), структура композита, отриманого з порошку cBN з покриттям TiN+TiB<sub>2</sub>, сформованим CVD-методом (*в*)

Введення дрібнодисперсних частинок (добавок), наприклад карбідів тугоплавких металів, призводить до зміни внутрішніх напружень у покритті. Внутрішні напруження в композиційних покриттях зазвичай нижчі, ніж у чистих металах, що використовуються для покриття. Вибір матеріалу для покриття залежить від технологічних вимог, що пред'являються як до порошків НТМ, так і інструменту в цілому.

В процесі формування покриттів на зернах НТМ, виготовлення робочого шару інструменту (спікання), а також при його роботі під впливом силікатних розплавів, газотранспортних реакцій, з парогазової фази, вакуумне та плазмове напылення тощо. Металізовані порошки НТМ застосовуються при виготовленні інструменту всіх видів та типорозмірів на металевих, металокерамічних та твердосплавних зв'язках. Металізації піддаються блочні високоміцні і термостійкі марки алмазів – AC15, AC20, AC32, AC40, AC65, AC80, AC50T, AC65T, AC82T, AC105T, AC132T, а також cBN марок КР, ЛП, ЛКК, ЛС.

Адгезія одержаних з використанням магнетронів покриттів до поверхні НТМ значно вища, ніж у покриттів, отриманих термовакuumним методом. Крім того, в іонних покриттях виникають напруження стиснення, а в покриттях, отриманих випаровуванням, – напруження розтягування.

Стиснення може досягати  $10^9$  Н/м<sup>2</sup> для молібдену та вольфраму, що сприяє кращому утриманню зерен в інструменті, створює передумови для широкого використання даного методу нанесення покриттів на високоміцні та термостійкі порошки алмазів та cBN, призначених для виготовлення інструменту, що працює в важких умовах: при правці, бурінні і каменеобробленні.

Створені композиційні покриття, що включають крім металевої дрібнозернисті порошки графіту, гексагонального нітриду бору, дисульфиду молібдену і деяких карбідів тугоплавких металів. Такі покриття рекомендуються для сухого шліфування крихких матеріалів. Введення антифрикційних добавок і твердих мастил сприяє покращенню умов шліфування завдяки зниженню тепловиділення в зоні оброблення. У композиційних покриттях поєднуються властивості матеріалів покриття, абразивного порошку та твердої фази включення, що підвищує їх фізико-механічні характеристики та покращує шліфуючу здатність інструменту. Порошки НТМ з композиційними покриттями застосовуються виготовлення інструменту всіх видів і типорозмірів на органічних зв'язках. Покриття наносяться в інертному середовищі і вакуумі з розплаву на порівняно крихкі порошки алмазів марок AC2, AC4, AC6 зернистістю 28/20 і більше неправильної форми з шорсткою поверхнею, що застосовуються в інструменті на органічних зв'язках.

При торцевому шліфуванні твердого сплаву Т15К6 навколо 12А2 125х5х3 АС2 80/63-Б1-100% з алмазів з композиційним покриттям на основі сплаву Cu-Sn-Ti при глибині 0,02 мм/дв. хід температура різання знижується порівняно з металевим покриттям лише сплавом Cu-Sn-Ti на 150 °С; при 0,04 мм/дв. хід – на 200...250 °С, що дуже важливо при шліфуванні без охолодження, так як температура різання в кругах з алмазів, металізованих цим сплавом, при глибині 0,04 мм/дв. хід досягає 600 °С і більше.

При цьому, крім механічних видів зносу, може відбуватися часткове окислення алмазів і термічне руйнування (деструкція) органічної зв'язки, що призводить до передчасного зносу алмазного інструменту. Введення твердих мастил дозволяє в 1,5 рази знизити зусилля різання. Ефективна потужність шліфування також знижується.

Працездатність кругів 12А2 125х5х3 АС2 125/100-Б1-100 % з алмазів з різними композиційними покриттями при обробленні твердого сплаву Т15К6 на режимах  $v_{кр} = 16$  м/с,  $S_{np} = 2$  м/хв,  $S_{non} = 0$ . хід наведено у табл. 8.1, з якої видно, що композиційні покриття суттєво підвищують довговічність інструменту.

**Табл. 8.1. Результати випробувань кругів з алмазних порошоків з покриттями**

Покриття	$m_a$ , МГ	$m_M$ , р	$q_p$ , МГ/Г	$N_f$ , кВт	$Ra$ , мкм
Металічне Cu-Sn-Ti	54,58	497,7	0,11	0,30...1,90	0,19
Композиційне на основі Cu-Sn-Ti	33,08	491,0	0,06	0,40...0,95	0,18

Порошки НТМ з металевим та композиційним покриттями призначені для виготовлення інструменту на органічних та металевих зв'язках усіх видів та типорозмірів на традиційному обладнанні та за існуючими технологічними процесами.

Особливістю процесу виготовлення є зменшення об'єму робочого шару зв'язки або наповнювача на величину об'єму металу, що вводиться в круг і рівномірно розподіленого на зернах НТМ. В даний час значна частина інструменту, виготовляється з порошоків НТМ з покриттями і широко використовується при обробленні твердих сплавів, твердих сплавів спільно зі сталлю, при бурінні, каменеобробленні, обробленні скла, кремнію і корунду, фарфору, феритів, зносостійких покриттів інших матеріалів.

Таким чином, вибір методу та матеріалу покриттів обумовлений фізико-механічними властивостями існуючих марок надтвердих і зв'язуючих матеріалів, а також умовами виготовлення інструменту. Встановлено, що нанесення покриттів суттєво підвищує властивості НТМ (руйнівне навантаження та поріг окислення зерен НТМ, змочування та просочення зерен сполучними матеріалами, утримання зерен та тепловідведення). В результаті суттєво покращуються фізико-механічні властивості зв'язок, підвищується працездатність інструменту. Інструмент з металізованих алмазів успішно застосовується при обробленні твердих і відносно крихких матеріалів, наприклад, при обробленні твердого сплаву, скла, кераміки, граніту тощо або твердого сплаву спільно зі сталлю, при цьому в порівнянні із інструментами з непокритими зернами збільшується продуктивність оброблення, але може підвищуватися температура в зоні різання і, як наслідок, утворюватися припали та інші дефекти на обробленій поверхні.

cBN, завдяки високій термічній стійкості та хімічній інертності до залізобуглецевих сплавів, широко застосовується при обробленні різного виду сталей і насамперед швидкорізальних. Інструмент із металізованих порошоків cBN при обробленні таких матеріалів має високу зносостійкість, проте при цьому на обробленій поверхні можуть утворюватися припали, особливо при роботі інструменту без застосування МОТС.

Тому покриття, що наносяться на НТМ-зерна, повинні забезпечувати не тільки високу зносостійкість інструменту, виготовленого на їх основі, високу якість обробленої поверхні, а також підвищувати продуктивність шліфування при обробленні в'язких матеріалів. Для цього інструмент не повинен засолюватися, повинен працювати в режимі самозаточування, забезпечувати високу потужність шліфування, що визначається фрикційними властивостями системи різальний інструмент – оброблюваний матеріал.

Цим вимогам задовольняє інструмент, виготовлений з порошків НТМ, з неметалевими покриттями на основі натрієво-боросилікатного скла.

При роботі інструмента у зоні різання, зазвичай, розвиваються досить високі температури, що перевищують температуру трансформації скла. Завдяки цьому шари скла, що знаходяться в контакті з оброблюваним матеріалом, будуть розм'якшуватися. Розм'якшене скло, будучи гарним мастилом, сприяє зниженню температури і потужності шліфування при обробленні в'язких матеріалів, а це, у свою чергу, підвищує якість шліфованої поверхні. Крім того, скла на відміну від металів мають невисоку адгезію до металів, що перешкоджає схоплюванню інструменту з оброблюваним матеріалом.

На підставі проведених досліджень зі змочуваності та взаємодії розплавів скла з алмазом та *cBN* обрані склади скла для покриття порошків НТМ. Розроблено спосіб нанесення склопокриттів на порошки НТМ з рідкої фази. Він простий у виконанні, не вимагає складного обладнання, газових захисних середовищ або вакууму. За цим способом отримують агрегати, що складаються з 5...20 зерен НТМ, покритих і пов'язаних між собою активним адгезійним склом.

Використання порошків алмазу та *cBN* зі склопокриттями дозволяє надати інструменту нових позитивних якостей і в першу чергу знизити відносні витрати абразиву, а також температуру в зоні різання, потужність шліфування.

Випробування працездатності кругів у промислових умовах показали, що круги з алмазів і *cBN* зі склопокриттям на органічних і металевих зв'язках можуть ефективно використовуватися в технологічних процесах абразивного оброблення суцільного твердосплавного та напайного твердосплавного інструментів, а також багатолезових інструментів з швидкорізальних сталей при роботі з охолодженням і без нього.

Застосування алмазів і *cBN* зі склопокриттям дозволяє підвищити працездатність абразивного інструменту порівняно з НТМ без покриття та покритих металами за рахунок зниження відносних витрат НТМ, підвищення продуктивності шліфування, зменшення припалів на оброблюваній поверхні, зниження потужності шліфування.

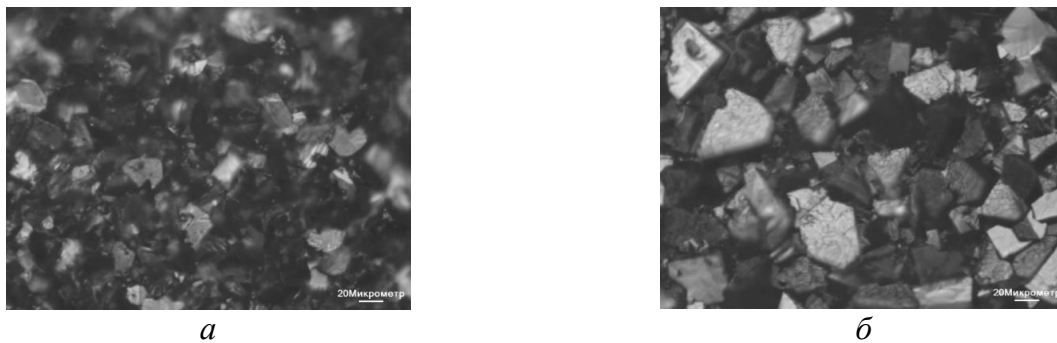
## **8.2. Покриття на композитах на основі НТМ**

### **8.2.1. Покриття на композитах на основі алмазу**

З врахуванням вказаного комплексу вимог до покриттів, для випадку інструменту з композитів на основі синтетичного алмазу найбільш перспективними є полікристалічні алмазні покриття, осаджені методом CVD, які характеризуються високими значеннями твердості, модулю пружності, теплопровідності, низьким коефіцієнтом тертя, хімічною інертністю, термічною стійкістю. Нанесення на поверхні інструменту такого покриття дозволяє не тільки зміцнити поверхню, але, завдяки утворенню суцільного алмазоподібного шару, покращити стабільність роботи інструменту в цілому. Оскільки покриття не містить сторонніх зв'язувальних матеріалів, воно дозволяє наблизити фізико-механічні властивості поверхневого шару інструменту, оснащеного композитним матеріалом, до характеристик алмазу.

Крім того, вказане покриття має безпосередній вплив на структуру та кінцевий рівень шорсткості поверхні робочих елементів із композиту на основі алмазу.

Алмазне покриття формується з газової суміші водню з вуглеводнем в області термодинамічної стабільності графіту. Ключову роль в зростанні алмазу відіграють атомарний водень і метил-радикали. Для їх утворення необхідно активувати газову суміш, для чого найчастіше використовують НВЧ розряд за допомогою досить дорогого і складного в експлуатації обладнання. Подальший розвиток промислових технологій синтезу, направлений на забезпечення найкращого співвідношення ціна/якість завдяки збільшенню швидкості росту алмазних покриттів і площі осадження, зниженню енергоємності процесу і витрат газу, а також досягненню стабільності і відтворюваності процесу синтезу. Ведуться дослідження щодо використання інших методів активації. Одним із таких методів активації газової суміші є тліючий розряд у різних його модифікаціях, що дозволяє істотно спростити і здешевити метод синтезу. У результаті CVD-синтезу на поверхні підкладки з алмазного композиту формується суцільне алмазне покриття, яке має однорідну структуру. Середній розмір кристалів алмазу у покриття знаходиться в межах 5 ... 30 мкм, що в першу чергу визначається структурою застосованого алмазної композита, на який нанесено покриття. Мікроскопічні зображення поверхні зразків покриття (рис. 8.3) ілюструють вплив морфології вихідної поверхні під покриття на середній розмір кристалів алмазу в покритті.



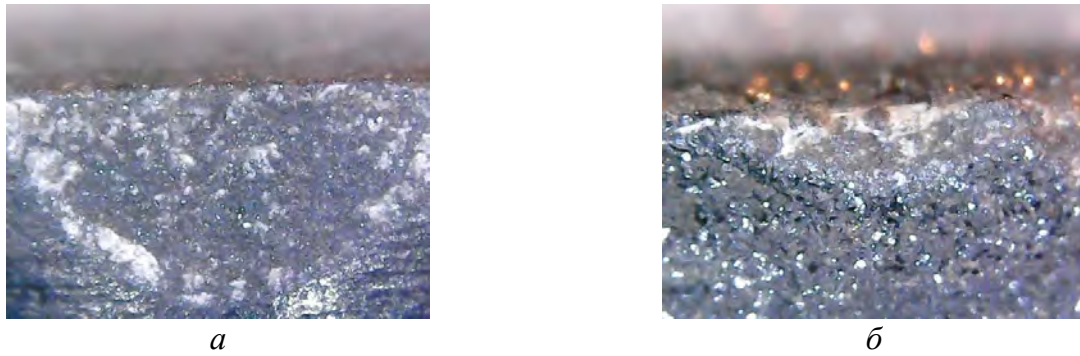
**Рис. 8.3. Поверхня покриття з полікристалічного алмазу, отриманого CVD-методом**

Головними параметрами, які визначають процес росту та структуру CVD-покриття, є: тиск газової суміші, потужність збудження (яка визначає температуру газу), частка вуглеводнів у газовій суміші і температура підкладки.

Порівняльні випробування інструментів, оснащених різальними пластинами з ПКА, у вихідному стані та з нанесеними алмазним покриттями, свідчать, що останні забезпечують під час точіння алюмінієвого сплаву покращення якості оброблених поверхонь виробів, а при різанні важкооброблюваної кераміки на основі  $Al_2O_3$  – зменшення зносу інструменту у 1,50...1,75 рази, що поширює область використання та забезпечує підвищення ефективності використання такого інструменту (рис. 8.4)

### 8.2.2. Покриття на композитах на основі cBN

Провідні інструментальні фірми ISCAR, Sandvic Coromant, Sumitomo та ін. Пропонують комерційні марки різальних пластин із ПКНБ як цілісних, так і напайних з покриттями систем TiN, Ti (C, N), TiAlN, що наносяться методом PVD. Областями застосування таких інструментальних композитів вказані оброблення загартованих сталей на високих і середніх швидкостях різання, безперервне і легке переривчасте оброблення.

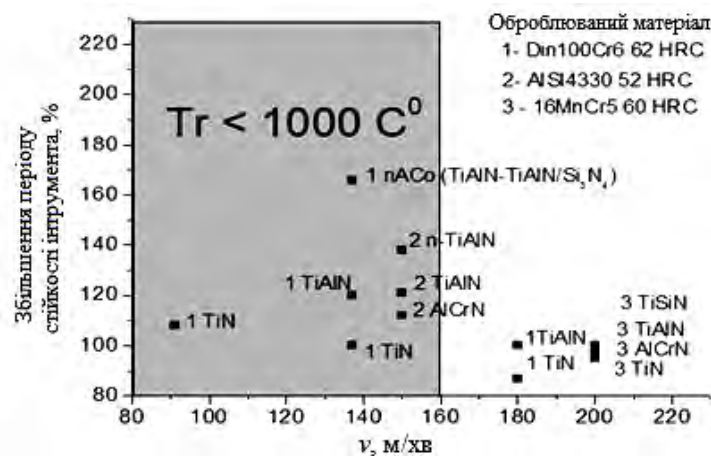


**Рис. 8.4.** Задні поверхні різального інструменту без покриття (а) та з алмазним покриттям (б) після точіння кераміки

Покриття на серійному виробництві ПКНБ мають той же тип, що і на твердосплавних інструментах та грають, переважно, інформаційну роль, сприяючи більш точному визначенню величини зносу різального інструменту. При цьому виробниками відзначається, що інструменти із ПКНБ з покриттям формують на обробленій поверхні мікропрофіль з відносно стабільною висотою мікронерівностей.

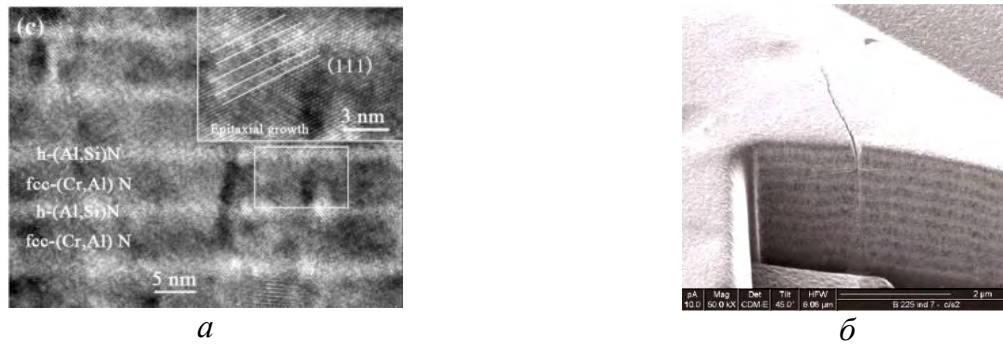
У науково-технічній літературі також є дані, що стосуються закономірностей зношування різальних інструментів із ПКНБ з покриттями AlCrN, TiN, TiAlN, TiSiN, хоча кількість джерел вкрай незначна.

На рис. 8.5 показано зведені дані, що характеризують відношення періодів стійкості різальних пластин із ПКНБ з покриттями і без, що демонструє, що стійкість інструменту при нанесенні покриттів збільшується в середньому на 30...40% і лише наноструктурні матеріали дозволяють підвищити цей показник до 60%.



**Рис. 8.5.** Вплив покриттів на стійкість інструментів із ПКНБ

Аналізуючи дані по стійкості інструментів із ПКНБ з покриттями в різних умовах різання і механізм їх зношування, зазвичай вказується, що основним фактором, що визначає ефективність покриття, є його здатність зберігати свої механічні властивості при високих температурах. І дійсно, як видно з діаграми (рис. 8.6), збільшення швидкості різання, що приводить до зростання контактної температури до величин більше 1000 °С, практично позбавляє будь-якого сенсу застосування навіть найбільш температуростійких покриттів типу TiAlN, TiSiN на пластинах із ПКНБ.



**Рис. 8.6. Структура нан шарового покриття (а) і просування тріщини в багатошаровому покритті (б)**

Безумовно, температурна стійкість є необхідною умовою, однак, не менш значущим є і механічна міцність покриття. Як свідчить досвід, відмінною рисою кінетики зносу покриттів на пластинах із ПКНБ є їх руйнування, а не поступове стирання з утворенням фаски зносу на підкладці вже в період припрацювального зносу (0,5...1,5 хв. різання), що обумовлено високими значеннями напружень в контактній зоні при різанні важкооброблюваних матеріалів.

У зв'язку з цим, з метою подальшого вдосконалення інструментів із ПКНБ, необхідно розробляти і застосовувати покриття, принцип роботи яких повинен ґрунтуватися на більш складному комплексі трибологічних і механохімічних ефектів, що обумовлюють здатність покриттів зберігати свою цілісність і властивості під впливом високих температур і контактних напружень, що в першу чергу пов'язане з управлінням структурою захисних покриттів.

Величезна кількість робіт, присвячених дослідженням як фізико-механічних властивостей і способів отримання захисних покриттів, так і характеристик застосування інструментів з покриттями свідчать, що наноструктурні системи характеризуються більш високими величинами твердості, тріщино- і термостійкості, а також підвищеними експлуатаційними параметрами, в порівнянні з покриттями, структурні елементи яких відносяться до мікрометричного діапазону.

У зв'язку з цим однією з основних тенденцій у створенні покриттів для різальних інструментів є прагнення забезпечити нанорозмірність при формуванні, як структурних елементів покриття, так і окремих шарів в багатошарових композиціях. Зазначена перевага наноструктур теоретично обґрунтовано фактом істотної зміни фізико-механічних властивостей матеріалу зі зменшенням розміру його структурних складових (зерна, кристали).

Даний ефект спостерігається коли середній розмір структурних елементів не перевищує 40 нанометрів. Така закономірність описується відомим рівнянням Холла-Петч:  $\sigma_y = \sigma_y + k \cdot d^{-1/2}$ , яке визначає залежність межі текучості і твердості полікристалічного матеріалу від розміру зерна. При цьому міцність композиту повинна наближатися до теоретичної граничної міцності на зсув при відсутності дислокацій. Однак зростання об'ємної частки кордонів зерен і потрійних стиків у міру зменшення розмірів зерен призводить до зміни механізму деформації, коли дислокації, що проходять через зерна, змінюються ефектами ковзання на їхніх кордонах. Зазначене призводить до зниження механічних властивостей матеріалу при розмірах зерна менше  $\sim 10$  нм.

Таким чином, формування нанорозмірної структури матеріалу покриттів засноване на виборі оптимального за критерієм міцності розміру зернистості виходячи з балансу між

залежністю Холла-Петч і виразом, що визначає швидкість зерномежевої повзучості при подальшому зменшенні розміру зерен.

Наноструктурні матеріали можуть мати твердість більше 40 ГПа, що за класифікацією покриттів дозволяє відносити такі матеріали до надтвердих.

Розглянемо основні підходи до створення наноструктурних покриттів високої твердості, які практикуються в даний час. Аналіз літературних джерел дозволяє виділити основні напрямки досліджень з даної проблематики:

- в процесі осадження покриття, підкладка піддається бомбардуванню іонами;
- створення покриття складається з сотень шарів з товщиною окремого шару близько 20 нм;
- добавка до складу покриття легуючих елементів, що перешкоджають росту кристалітів;

– наноккомпозитні структури, зростання зерен в яких обмежений.

Іонне бомбардування покриттів (ІСО – іонно-стимульоване осадження) призводить до суттєвих змін в їх структурі і властивостях. Так зменшується розмір зерен, кордони між ними ущільнюються, в масиві покриття формуються точкові дефекти, забезпечується формування стискаючих напружень.

Дослідження, метою яких було визначення закономірностей впливу величини потенціалу зміщення на підкладці, що визначає енергію осідаючих іонів, на твердість, розмір зерен і залишкові напруження в покриттях показують, що при  $U_b = 0... -300$  В спостерігається подрібнення зерна і зростання твердості плівок, що супроводжується збільшенням залишкових напружень. Екстремуми цих залежностей зазвичай знаходяться в діапазоні  $U_b = -150... -300$  В.

Вищі ( $U_b \sim -500$  В) значення потенціалу зміщення викликають деградацію механічних властивостей покриття, викликану збіднінням вмісту легких елементів (Al, Si), зменшенням вмісту азоту, інтенсивним утворенням радіаційних дефектів і формуванням аморфоподібної фази.

До недоліків покриттів отриманих із застосуванням методу ІСО відноситься низька стабільність, обумовлена тим, що твердість таких покриттів інтенсивно знижується з підвищення температури відпалу до  $400...600$  °С, що пов'язано з релаксацією дефектів – основного джерела зміцнення і підвищення твердості. Даний факт нівелює цінність такого підходу до отримання покриттів призначених для вдосконалення експлуатаційних властивостей інструментів для оброблення матеріалів високої твердості.

При створенні багатошарових нанотовщинних покриттів (рис. 8.6, а) в структурі зростає площа поверхонь розділу між окремими фазами і кордонами зерен. Ці кордони є перешкодою на шляху поширення тріщин і дислокацій, обумовлюючи підвищення твердості і міцності. Ще одним фактором, який сприяє підвищенню твердості, є те, що сусідні шари мають великі відміни в значеннях модуля Юнга.

Такі структури називають також надрешіткою і складаються вони, як правило, з двох шарів, що чергуються, загальна товщина яких називається періодом надрешітки.

Необхідно відзначити, що при товщині шару менше  $5...7$  нм розмиваються межі між шарами і механічні характеристики покриття різко падають. Також було виявлено, що при випробуваннях на тертя зношування монолітного покриття обумовлено пластичною деформацією окремих зерен в шарах на глибину до  $50...75$  нм під дією дотичних контактних напружень.

У разі якщо покриття має структуру надрешітки, глибина пошкодження значно менше – зазвичай  $6...8$  нм. Як наслідок, швидкість зносу зразків з надрешіткових покриттів в умовах трибологічних випробувань значно нижче.

Наочним експериментальним свідченням, ефективності покриттів з наношаровою архітектурою є знімок ділянки поверхні з тріщиною, що йде в масив покриття поруч з відбитком індентора. Перетин покриття отримано методом інтенсивного йонного травлення (рис. 8.6, б). Просування тріщини вглиб покриття обмежений, зважаючи на розсіювання енергії при подоланні тріщиною міжфазних кордонів на стиках шарів.

Найбільш перспективними з точки зору їх застосування на різальних інструментах із ПКНБ є нанокомпозитні покриття. Це обумовлено поєднанням високих значень фізико-механічних властивостей, стійкості до окислення і дисоціації хімічних сполук, що входять до їх складу, обумовлених особливостями структури нанокомпозитних плівок.

Нанокомпозитні структури бувають двох видів: – нітридна нанорозмірна фаза, яка введена в м'яке або тверде міжкристалічне середовище (nc-MeN / міжкристалічна фаза); зерна одного матеріалу утворюють дві фази з різною кристалографічною орієнтацією або суміш нанозерен різних матеріалів.

Велике поширення отримав перший спосіб створення нанокомпозитних покриттів типу nc-MeN/ $\alpha$ -фаза, коли воно формується з нанозерен твердих нітридів перехідних металів з аморфною міжкристалічною фазою-матрицею з  $TiB_2$  або  $Si_3N_4$ , BN та інших нітридів неметалів, що утворюють ковалентні зв'язки.

При конденсації нітридоутворюючих металів з введенням кремнію, зростання зерен  $TiN$ ,  $TiAlN$ ,  $TiCr$  і т.д. пригнічується через те, що вони впроваджені в аморфну матрицю товщина якої, виходячи з умови максимальної твердості покриття, становить всього кілька атомних шарів (рис. 8.7, а). Спостережувана висока твердість якісно пояснюється тим, що через малий розмір нанозерен зародження і ковзання дислокацій пригнічується, в той час, як висока когезійна міцність тонкої міжзернової фази блокує зернограничне ковзання.

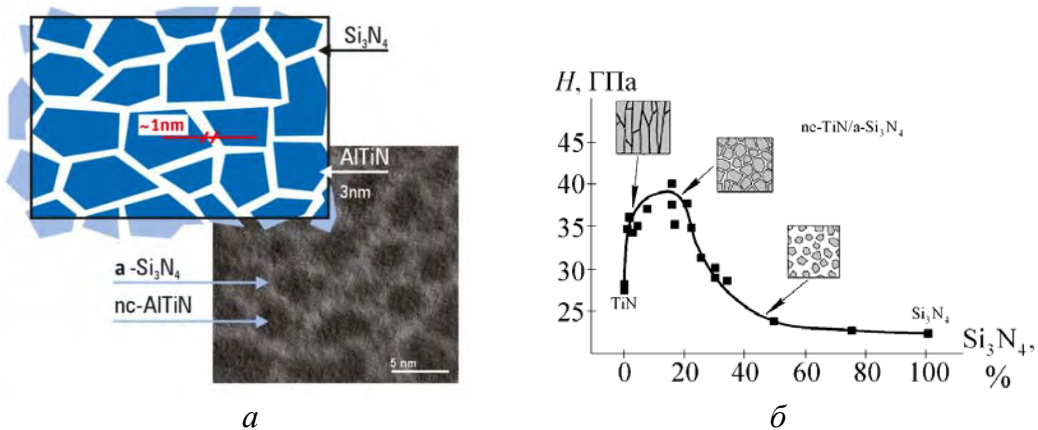


Рис. 8.7. Структура (а) і вплив вмісту кремнію на мікротвердість покриття типу nc-MeN/ $Si_3N_4$  (б)

Аморфна складова покриття при цьому здатна щонайкраще узгоджуватися з поверхнею нанокристалів і забезпечує хороше зчеплення з підкладкою, що призводить до суттєвого підвищення міцності системи. Дані покриття, за умови правильного підходу до їх нанесення, можуть мати незвичайну комбінацією механічних властивостей, таких як висока твердість 40...100 ГПа, високе пружне відновлення 80...94 %, граничні пружні напруження > 10 % і висока міцність на розтяг (від 10 до більш ніж 40 ГПа), що близько до ідеальної міцністю не пластичних матеріалів. Більш того наноструктура і відповідний

їй надтвердий стан може залишатися стабільним при температурах, що перевищують 1100 °С.

Найбільш дослідженими системами, що демонструють перспективи розвитку концепції нанокompозитних покриттів, є  $\text{nc-TiN}/\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  і  $\text{nc-TiAlN}/\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ . Встановлено, що принципова можливість отримання на їх основі покриттів з високими характеристиками пов'язана з рядом критично важливих умов. Так до однієї з основних особливостей таких систем відноситься наявність оптимальної концентрації кремнію. Діаграма (рис. 8.7, б) схематично демонструє закономірності структуроутворення нанокompозитного покриття.

При оптимальній концентрації фази  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ , що формує матрицю, пригнічується ріст зерен нітриду перехідного металу, що як вже зазначалося, відповідно до закону Холла-Петч, збільшує твердість композиту.

З подальшим збільшенням процентного вмісту кремнію, товщина прошарків зростає, тріщини проходять вже через матрицю і механічні властивості покриття як наслідок знижуються.

В даний час технологія створення наноструктурних композиційних покриттів в якості комерційного продукту реалізується швейцарською фірмою PLATIP. Зокрема покриття  $\text{nAlCo}^\circ$  ( $\text{nc-AlTiN}/\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ ) твердістю 41 ГПа зі спеціальним адгезійним підшаром на інструментах із ПКНБ дозволяє, при точінні загартованої сталі 100Cr6 (61 HRC) з  $v = 140$  м/хв,  $S = 0,12$  мм/об,  $t = 0,25$  мм, збільшити стійкість інструмента до 1,6 рази.

Матеріали такого типу відносять до нанокompозиційного покриттям другого покоління. Окрім значної твердості вони характеризуються високою теплостійкістю і низькою окислювальністю і рекомендуються для оброблення матеріалів високої твердості.

Як уже зазначалося, крихке руйнування покриття на етапі припрацювання інструменту є характерним при точінні загартованих сталей. Оцінка величини контактних навантажень показує, що нормальні і контактні напруження при обробленні сталі досягають величин до 2500 і 1100 МПа відповідно. Ймовірно, дійсні напруження будуть ще вище, так як реальна площа контакту двох шорстких поверхонь, які беруть участь в процесі тертя, значно менша за номінальну, що обумовлено контактом поверхонь по окремим мікронерівностям.

Знизити величину навантажень можна, якщо конструкція покриття буде включати в себе верхній шар покриття, що виконує припрацювальну функцію. Основними вимогами до такого прошарку є поєднання пластичності і міцності при тому, що його твердість може бути істотно нижче, ніж твердість основного робочого шару.

Аналізу топографії ділянок покриття, утворених в процесі його контактування з оброблюваним матеріалом в процесі різання показує, що висота мікронерівностей характеризується значеннями  $Rz$  0,8,  $R_{max}$  1,6. Таким чином, виходячи з умови, що рівноважна шорсткість повинна формуватися в межах припрацювального шару, його товщина повинна становити не менше 2 мкм.

Можна запропонувати формувати припрацювальний шар з аморфно-кристалічної низькомодульної структури ( $\alpha\text{-BN}$ ,  $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$  або  $\alpha\text{-TiB}_2$ ), які також можуть виконувати роль твердого змащення.

Подібна конструкція покриття знижує ймовірність крихкого сколювання в області, прилеглої до різальної кромки, що істотно подовжує період стійкості інструменту.

Термостійкість (стабільність властивостей і стійкість до окисдуванню при високих температурах) є другою за значимістю вимогою, що пред'являється до покриттів на ПКНБ. Експериментальні дослідження по відпалу покриттів і оцінки зміни їх маси, пов'язаної з протіканням окислювальних реакцій показують, що термостійкість

класичних покриттів TiN, TiCN знаходиться в межах 450...600 °С. Найбільш термостійкими є покриття, що містять алюміній і хром.

Оксидна плівка(Ti, Al) N, що утвориться на поверхні дозволяє захистити основний масив матеріалу покриття від окислення аж до температури 850 °С. Якщо брати до уваги тільки хімічний склад, як фактор, що визначає термостійкість, то найбільш ефективними виявляються покриття з вмістом Cr в зв'язку з їх здатністю чинити опір впливу високих (1000...1100 °С для CrN і AlCrN відповідно) температур, зберігаючи хімічну стабільність, високу гарячу твердість (рис. 8.8) і твердість після відпалу.

Це пояснюється інтенсивною дифузією хрому до поверхні з подальшим формуванням в діапазоні 700...1000 °С щільної структури Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, що запобігає декопозиції AlCrN. У зв'язку з цим даний склад відзначається як дуже перспективний для подальших досліджень.

Для підвищення термостойкості покриттів також ефективна добавка в покриття атомів ітрію, яка сприяє підвищенню стійкості до окислення внаслідок утворення фази YO<sub>x</sub> на кордонах зерен. Така добавка призводить до дроблення зерен і втрати стовпчикової структури конденсатів, що важливо для опору зносу тертям.

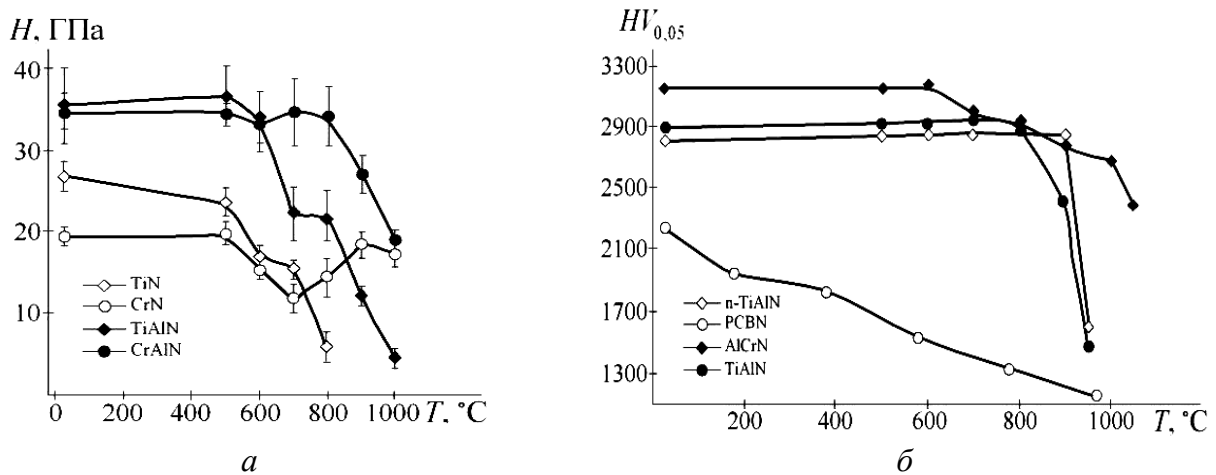
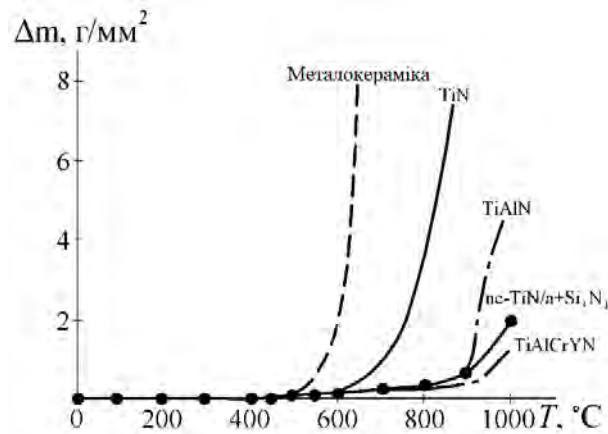


Рис. 8.8. Твердість покриттів після відпалу (а), гаряча твердість покриттів і підкладки із ПКНБ (б)

Подібно механічним властивостям, термостійкість покриттів також значною мірою визначається не тільки хімічним складом, а й структурою. Зокрема ті ж нанокompatитні системи типу nMeN/ $\alpha$ -фаза (рис. 8.9) характеризуються підвищеною термічною стабільністю. Дрібнозернисті полікристалічні матеріали рекристалізуються під час відпалу при  $T \geq 0,4T$  плавлення. При цьому межа термостабільності покриття nc-TiN/a-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, нанесеного на кремнієву підкладку сягає 1100 °С, що становить 63 % від температури дисоціації Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Таке підвищення граничної температури обумовлено відсутністю реакції окислення на межі поділу стехіометричних фаз TiN і Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, незмішуваність яких обумовлена спінодальною природою фазової сегрегації в цій системі.

Логічним продовженням концепції структурно зумовленої термостійкості є наступний підхід. На думку авторів в роботі зерна, в тому числі і нанорозмірні, з яких складається масив покриття, контактують з вільною поверхнею і кордони зерен є провідниками для кисню обумовлюючи окислювальні процеси по всьому об'єму плівки. Особливо схильні до цього колумнарні структури, характерні для стандартних покриттів типу TiN.

Далі в якості методу підвищення термостійкості покриття пропонується використовувати інтергранулярну склоподібну фазу, формування якої можна забезпечити в нанокompозитах шляхом збільшення вмісту кремнію (> 40 %) і відповідно фази  $\alpha$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Підтверджує таку концепцію експеримент по відпалу покриття Ta-Si-N. При концентрації Si більше 50 % структура покриття аморфна і аж до температури 1300 °C окислюється виключно дуже тонкий поверхневий шар плівки без будь-яких змін по її об'єму.



**Рис. 8.9. Кінетика окислення нанокompозитних покриттів у порівнянні з покриттями попередніх поколінь**

Інший механізм підвищення стійкості інструменту призначеного для роботи у високошвидкісному (і отже високотемпературному) діапазоні умов оброблення реалізується при створенні самоадаптивних покриттів. Основна ідея полягає не в запобіганні окисленню, а в використанні цього явища для управління параметрами контактної взаємодії при різанні і зниження коефіцієнта тертя і, отже, термобаричного навантаження в зоні контакту.

Подібні покриття в процесі різання окислюються, утворюючи поліоксидну вторинну структуру (трибоплівку), яка грає роль твердого змащення. Відомо, що в якості твердого змащення застосовуються графіт або дисульфат молібдену або вольфраму, однак вони не мають термостабільності, необхідної для інструментальних покриттів.

З урахуванням цієї вимоги, а також того, що тверде мастило повинне характеризуватися низькою міцністю на зсув в роботі запропоновано використовувати покриття  $\text{AlN-Ti}(\text{Cr})\text{B}_2$ . При точінні інструментом з таким покриттям на його поверхні утворюється поліоксидна трибоплівка, яка включає  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і оксиднітрид алюмінію  $\text{Al}_x\text{O}_y\text{N}_z$ . Дані сполуки мають високу термостабільність до 1300 °C, крім того в таких системах утворюються гомологічні ряди твердих розчинів оксидів, що мають гарну змащувальну здатність. Дослідження елементного складу покриття після оброблення різанням показали, що на глибині 70 нм відбувається різке збільшення кількості кисню, тобто зовнішній нанорозмірний шар інтенсивно окислюється, переходячи в продукти зносу і знову окислюючись.

В підшарі розташованому на глибині від 30 до 70 нм утворюються обмежені тверді розчини на основі  $\text{Al}_2\text{O}_3$  систем ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{AlN}$ ). Експлуатаційні випробування інструменту із ПКНБ з покриттям  $\text{AlN-Ti}(\text{Cr})\text{B}_2$  твердістю  $\text{HV}_{50}$  22,18 ГПа, що нижче твердості основи, при точінні загартованої сталі показали зниження інтенсивності зношування інструменту із ПКНБ. Подібний підхід перспективний в інструментах для фінішного оброблення, а основний напрямок подальших досліджень

пов'язаний зі створенням систем, що містять SiC і AlN, які хімічно стабільні при температурах понад 1300 °C.

Розроблено концепція підвищення стійкості різальних інструментів із ПКНБ, яка базується на зменшенні температури в контактній зоні різання шляхом нанесення на робочі поверхні інструменту покриття, що зменшує коефіцієнт тертя. Основною відмінністю даного покриття, є його аморфно-кристалічний структурний стан при цьому матеріали підкладки і самого покриття однорідні.

Ефект досягається за рахунок зниження твердості в порівнянні з інструментальною основою (15 і 34 ГПа відповідно), що зменшує внутрішні залишкові напруження і крихкість матеріалу; зменшення модуля Юнга, що підвищує пружні властивості покриття і стійкість до абразивного стирання; низького коефіцієнтом тертя, що сприяє зменшенню термобаричного навантаження на робочих ділянках інструменту. Експериментальні дослідження властивостей покриттів продемонстрували їх високі експлуатаційні характеристики.

Зокрема випробування, проведені на машині тертя, продемонстрували зниження коефіцієнта тертя з 0,4 до 0,3 в діапазоні швидкостей відносного переміщення 75...90 м/хв. Також спостерігалось зниження на 15 % температури різання, визначеної розрахунково-експериментальним методом і підвищення стійкості інструменту на 25 %.

Ще одним механізмом підвищення стійкості інструменту, в якому явно проявляється ідея використання покриття як проміжного середовища, що надає прямий вплив на параметри процесу різання – це застосування таких компонентів, які в процесі контактної взаємодії з оброблюваним матеріалом утворюють сполуки-інгібітори хімічних реакцій між оброблюваним матеріалом і інструментальним композитом.

Пригнічуючи хімічно обумовлений механізм зношування інструменту такі покриття збільшують стійкість ПКНБ при високошвидкісному різанні або обробленні нікелевих сплавів, які виявляють в парі з ПКНБ високу хімічну активність.

Аналіз досвіду застосування інструментів, оснащених ПКНБ з покриттям, показує, що основними функціями такого покриття є таке:

- підвищення надійності роботи інструменту на етапі пристосування. Наявність покриття на робочих поверхнях інструменту призводить до перерозподілу напружень, які формуються в інструменті під час його термобаричного навантаження в зоні різання. За наявності покриття нормальні та дотичні напруження на передній поверхні інструмента знижуються до 25%. Напружений стан інструмента з боку задньої поверхні також характеризується меншими показниками. Зниження напружень у різальному інструменті, особливо на етапі його припрацювання, сприяє підвищенню надійності інструменту під час експлуатації в умовах динамічного навантаження;

- збільшення періоду стійкості інструментів (рис. 8.10). Нанесення на робочі поверхні інструменту покриття сприяє збільшенню його періоду стійкості у зв'язку зі зниженням інтенсивності зношування завдяки підвищеному опору поверхневого шару інструменту окиснювальному впливу довкілля, мінімізації адгезійної та хімічної взаємодії між матеріалами інструменту й виробу, що обробляється, у зоні різання, меншій величині зношення інструменту, що досягається на етапі припрацювання;

- інтенсифікація режимів різання. Інструменти з покриттями мають підвищену працездатність в умовах високих температур, зокрема під час роботи з високими швидкостями різання, що пов'язано з меншою інтенсивністю адгезійної та хімічної взаємодії матеріалів інструменту та оброблюваного між собою, а також обмеженням впливу елементів навколишнього середовища. Під час чистового оброблення деталей із загартованих сталей орієнтовні швидкості різання 150...210 м/хв. З огляду на особливості

напруженого стану інструменту з покриттям, можна припустити, що діапазон використовуваних подач і глибин різання також збільшується;



**Рис. 8.10. Контактна ділянка інструменту з ПКНБ без покриття (а) і з покриттям (TiAlSiY)N (б) після 24 хв різання сталі ХВГ (58–60 HRC) зі швидкістю різання 100 м/хв**

– інформаційна функція (см. рис. 8.10). Покриття на різальних пластинах із ПКНБ полегшує процес оцінювання величини зносу інструменту – ПКНБ, у більшості випадків, має темний колір, тоді як покриття – жовтого або кольору «металік», при цьому менш інтенсивне масоперенесення оброблюваного матеріалу на контактні поверхні інструменту з покриттям, як порівняти з інструментом без покриття, дає змогу виявляти розміри зношених поверхонь без хімічного підбурювання або механічного видалення з них шару налиплого матеріалу.

На основі великої кількості досліджень механізму впливу різних покриттів на закономірності зношування інструментів з ПКНБ, можна виділити кілька взаємопов'язаних підходів, які є теоретичним обґрунтуванням для створення різних перспективних систем покриттів:

– вибір структурних складових покриття, які в процесі оброблення різанням на повітрі забезпечують утворення на робочих поверхнях інструменту високотемпературних поліоксидних трібопленок, що грають роль твердого змащення, що ефективно знижує інтенсивність зносу інструменту;

– введення до складу покриття сполук, що є інгібіторами реакцій хімічної взаємодії, що дозволить змити початок активної хімічної взаємодії в зоні оброблення в діапазон більш високих швидкостей різання;

– зниження коефіцієнта тертя і контактних навантажень на ділянці контакту за рахунок твердих мастил і припрацювальних шарів покриття;

– забезпечення необхідного структурного стану (аморфно-кристалічні або наноструктуровані) покриття.

### **Контрольні запитання**

1. Методи формування покриттів.
2. Покриття для порошків надтвердих матеріалів.
3. Особливості надтвердих матеріалів з покриттям.
4. Вимоги до захисних покриттів.
5. Покриття на композитах на основі алмазу.
6. Покриття на композитах на основі кубічного нітриду бору
7. Функції захисних покриттів на різальних інструментах із надтвердими композитами.
8. Сучасні тенденції у створюванні покриттів.

## ЗАКЛЮЧЕННЯ

Ефективність розв'язання задач синтезу та спікання алмазних і алмазоподібних матеріалів, виробництво з них абразивних і лезових інструментів базуються на вивченні фундаментальних і прикладних засад матеріалознавства надтвердих матеріалів, впливу високого тиску на речовину, термодинаміки нерівноважних процесів, фізикохімії твердого тіла на структурних рівнях від нано- і атомнокристалічного до макро- і структурно-фазового.

Саме із цих позицій інформація щодо існуючих та перспективних надтвердих матеріалів, конструкцій інструменту на їх основі, дає змогу не тільки удосконалювати процеси синтезу, а і більш ефективно застосовувати сучасні інструменти у різних галузях промисловості, мати конкурентні переваги на високотехнологічних ринках, створювати конкурентоспроможну продукцію, що в цілому сприяє інноваційному розвитку України.

У даному посібнику стисло наведено основні результати наукових досліджень, які дозволили розробити технології синтезу нано-, субмікро-, мікропорошків алмазу та кубічного нітриду бору. Особливістю створених технологій є застосування методів механоактивації та поверхневого модифікування, хіміко-термічного оброблення компонентів реакційних сумішей, а також використання нових ростових систем, що дає змогу одержувати порошки алмазу та кубічного нітриду бору з поліпшеними та заданими фізико-механічними характеристиками.

Подані відомості дозволяють здобувачам освіти комплексно оволодівати нормованими компетенціями, визначеними за напрямом «Механічна інженерія» спеціальностей «Прикладна механіка», «Галузеве машинобудування» та «Матеріалознавство». Це особливо актуально для спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» із огляду на розвиток IV Індустріальної революції, яка, окрім іншого, передбачає високу надійність і відтворюваність процесів машинного виробництва.

В посібнику також представлено результати накопиченого практичного досвіду зі створення технологічного обладнання, апаратів високого тиску, технологічного оснащення для промислового синтезу і спікання порошків алмазу, кубічного нітриду бору, а також надтвердих композиційних матеріалів з різною структурою і широким спектром фізико-механічних характеристик.

Заслугує увагу інформація щодо розроблених на основі порошків алмазу, кубічного нітриду бору, нано- і мікроструктурних полікристалічних композиційних надтвердих матеріалів гама абразивних і лезових різальних інструментів нового покоління, які мають підвищену зносостійкість та забезпечують високу продуктивність, точність і якість оброблення загартованих сталей і чавунів, жаростійких і зносостійких покриттів, напилених і наплавлених покриттів, твердих сплавів, мінералокераміки, сплавів кольорових металів, тендітних неметалевих матеріалів, інших сучасних конструкційних та інструментальних матеріалів [12].

Представлені в посібнику результати фундаментальних і прикладних наукових досліджень процесів синтезу і спікання полікристалічних композиційних надтвердих матеріалів, результати практичного застосування інструментів на їхній основі, створення нової техніки, приладів, оснащення для інструментальної та металообробної галузей промисловості покликані розширити використання матеріалів на основі алмазу і кубічного нітриду бору в сучасному виробництві.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Надтверді абразивні матеріали в металообробленні: енцикл. справ. / В.І. Лавріненко, М.В. Новіков. – К. : ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2013. – 456 с.
2. Лавріненко В.І. Надтверді матеріали. – К. : Академперіодика, 2018. – 336 с.
3. Ільницька Г.Д., Лавріненко В.І., Смоквина В.В. Алмази для шліфувального інструменту, отримані в різних системах. – К. : Наук. думка, 2021. – 168 с.
4. Бочечка О.О. Фізико-хімічні основи спікання алмазних порошків під дією високого тиску тв. Високої температури. – К. : Наук. думка, 2019. – 240 с.
5. Lavrinenko V. Grinding wheels of superhard materials for diamond-abrasive processing. – К. : Akadempriodyka, 2019. – 190 s.
6. Технологія ремонту та відновлення (Фінішна алмазно-абразивна обробка еластичними інструментами у ремонтному виробництві) / С.А. Клименко, В.В. Бурикін, Л.Г. Полонський, В.Г. Сніцар. – Житомир : ЖДТУ, 2014. – 122 с
7. Основи теорії різання матеріалів : підручник / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков. – Львів : Новий світ-2000, 2021. – 472 с.
8. Cutting superhard materials by jet methods (on functional approach) / A. Salenko, V. Shchetynin, G. Gabuzian, E. Lashko, Mohamed R.F. Budar, S. Klimenko, A. Potapov // Recent advances in engineering materials and metallurgy. – London : IntechOpen, 2020. – P. 169–189.
9. Фізичні засади формоутворення прецизійних поверхонь під час механічної обробки неметалевих матеріалів / Ю.Д. Філатов, В.І. Сідорко, О.Ю. Філатов, С.В. Ковальов. – К. : Наук. думка, 2017. – 248 с.
10. Антонюк В.С., Клименко С.Ан., Клименко С.А. Теплові явища при обробленні різанням : навч. посібн. – К. : НТУ України «КПІ», 2014. – 156 с.
11. Різальні інструменти з композиту на основі кубічного нітриду бору з покриттям / А.С. Манохін, С.А. Клименко, В.М. Береснєв, С.Ан. Клименко, М.Ю. Копейкіна, В.О. Столбовий, С.В. Литовченко. – К. : Наук. думка, 2023. – 176 с.
12. Klymenko S., Kopeikina M. Improvement of technologies for edge cutting machining with tools equipped with superhard structured composites // Modern manufacturing process and systems; collective monograph. – Belgrade-Vrnjačka Banja (Serbia) : SaTCIP Publisher Ltd., 2020. – Vol.1: Fundamentals. – P. 139–160.

Навчальне видання

**Клименко Сергій Анатолійович**  
**Антонюк Віктор Степанович**  
**Саленко Олександр Федорович**

**Надтверді матеріали  
інструментального призначення  
для автоматизованого  
виробництва**

**Навчальний посібник**

*В авторській редакції  
Надруковано з оригінал-макета замовника*

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р.  
просп. Берестейський, 37,  
м. Київ, 03056

Підп. до друку 16.01.2025. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офс. Гарнітура Times.  
Спосіб друку – електрографічний. Ум. друк. арк. 13,77. Обл.-вид. арк. 16,26. Наклад 23 пр.  
Поз. 25-1-2-001. Зам. № 25-004.

Видавництво «Політехніка» КПІ ім. Ігоря Сікорського  
вул. Політехнічна, 14, корп. 15  
03056, м. Київ  
тел. (044) 204-81-78



**Клименко Сергій Анатолійович**, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, лауреат премії Кабінету Міністрів України за розроблення і впровадження інноваційних технологій.

Заступник директора Інституту надтвердих матеріалів імені В. М. Бакуля Національної академії наук України.

**Наукові інтереси:** матеріалознавство інструментальних матеріалів, процеси оброблення різанням інструментами із надтвердих матеріалів.



**Антонюк Віктор Степанович**, доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, лауреат премії Кабінету Міністрів України за розроблення і впровадження інноваційних технологій. Професор кафедри комп'ю-

терно-інтегрованих технологій виробництва приладів приладобудівного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Наукові інтереси:** інженерія поверхні, процеси формування топографії функціональних і зносостійких покриттів.



**Саленко Олександр Федорович**, доктор технічних наук, професор. Професор кафедри конструювання машин навчально-наукового механіко-машинобудівного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Наукові інтереси:** оброблення композиційних матеріалів потужними потоками енергії, гібридні методи оброблення, засоби та інструментальне забезпечення енергоефективного виробництва.