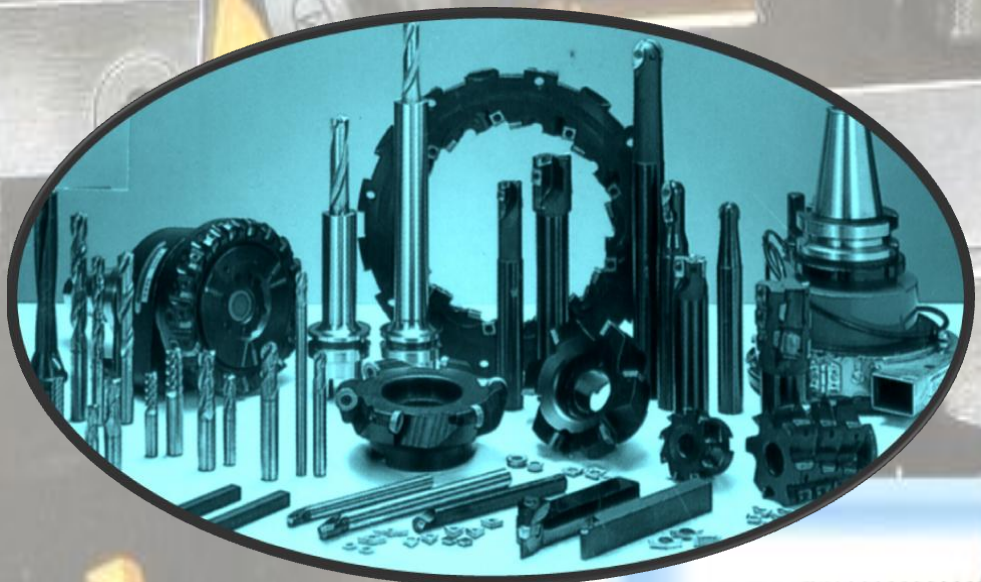


**В. О. Залога
В. Д. Гончаров
О. О. Залога**

**СУЧАСНІ
ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ
МАТЕРІАЛИ
У МАШИНОБУДУВАННІ**

Навчальний посібник



Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

В. О. Залого, В. Д. Гончаров, О. О. Залого

**СУЧАСНІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ
У МАШИНОБУДУВАННІ**

Навчальний посібник

За загальною редакцією доктора технічних наук
В. О. Залого

Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України



Суми
Сумський державний університет
2013

УДК 669-1:621.9.025.5/7(075.8)
ББК 34.4-5Я73
3-24

Рецензенти:

Ю. М. Внуков – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри, проректор з наукової роботи Запорізького національного університету;
С. А. Клименко – доктор технічних наук, професор, заступник директора з наукової роботи ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України;
О. Ф. Саленко – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри процесів і обладнання механічної та фізико-технічної обробки Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського

Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямками підготовки «Машинобудування» та «Інженерна механіка» (лист № 1/11-801 від 29.01.2013 р.)

Залога В. О.

3-24 Сучасні інструментальні матеріали у машинобудуванні : навчальний посібник / В. О. Залога, В. Д. Гончаров, О. О. Залога; за заг. ред. В. О. Залого. – Суми : Сумський державний університет, 2013. – 371 с.
ISBN 978-966-657-469-8

Наведена інформація про інструментальні матеріали (вимоги, що ставляться до них; класифікація як за їх властивостями, так і за групами застосування (за ISO); їх структура (кристалічна будова), способи отримання та експлуатаційні показники в кожній групі та ін.). У посібнику наведені рекомендації щодо вибору різних інструментальних матеріалів залежно від способу та умов оброблення різанням і розглянуті тенденції їх удосконалення, в т. ч. шляхом застосування зносостійких покриттів; питання для самоперевірки (у кожному розділі), а також наведені методичні вказівки з вивчення теми «Інструментальні матеріали» і типові тести для самоперевірки і модульного контролю знань.

Навчальний посібник може бути використаний під час вивчення теми «Інструментальні матеріали» з дисциплін «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство», «Матеріалознавство у машинобудуванні», «Теорія різання» та ін. студентами всіх спеціальностей, які навчаються за напрямками «Машинобудування» та «Інженерна механіка», і може бути корисний студентам машинобудівних спеціальностей старших курсів під час курсового та дипломного проектувань. Методичною і довідковою інформацією, наведеною у посібнику, можуть користуватися й інженерно-технічні працівники у процесі вирішення конкретних виробничих завдань.

УДК 669-1:621.9.025.5/7(075.8)
ББК 34.4-5Я73

© Залога В. О., Гончаров В. Д., Залога О. О., 2013
ISBN 978-966-657-469-8 © Сумський державний університет, 2013

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	7
1 ВИМОГИ, ЩО СТАВЛЯТЬСЯ ДО ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ. КЛАСИФІКАЦІЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ЇХ ВЛАСТИВОСТЯМИ	10
1.1 Висока твердість	11
1.2 Висока міцність	12
1.3 Висока теплостійкість	13
1.4 Висока зносостійкість.....	15
1.5 Високі теплопровідність і теплоємність	15
1.6 Сприятливі фрикційні й адгезійні властивості	16
1.7 Технологічність	18
1.8 Класифікація інструментальних матеріалів за їхніми властивостями	20
Питання для самоперевірки	25
Слова, скорочення, терміни в розділі №1	26
2 ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ СТАЛІ	28
2.1 Інструментальні нелеговані сталі.....	39
2.2 Леговані інструментальні сталі.....	43
2.3 Швидкорізальні сталі.....	45
2.4 Основні тенденції вдосконалювання інструментальних сталей.....	55
2.4.1 Швидкорізальні сталі підвищеної продуктивності.....	56
2.4.2 Швидкорізальні сталі високої теплостійкості	57
2.4.3 Швидкорізальні ошадливо леговані сталі.....	58
2.4.4 Порошкові швидкорізальні сталі.....	58
2.4.5 Карбідосталі.....	60
2.5 Одержання інструментальних сталей методом СВ-синтезу.....	62
2.5.1 Сутність процесу самопоширюваного високо- температурного синтезу.....	62
2.5.2 Одержання монолітної структури металу методом СВС.....	63

2.5.3 СВ-синтез інструментальної сталі з оксиду заліза, алюмінію і карбїду титана.....	65
2.6 Короткі рекомендації щодо вибору інструментальних сталей.....	69
Питання для самоперевірки.....	74
Слова і скорочення в розділі 2.....	76
3 ТВЕРДІ СПЛАВИ.....	78
3.1 Вольфрамкобальтові тверді сплави (ВК).....	87
3.2 Титановольфрамкобальтові тверді сплави (ТК).....	90
3.3 Титанотанталовольфрамкобальтові тверді сплави (ТТК).....	91
3.4 Безвольфрамкові тверді сплави (БВТС).....	93
3.5 Короткі рекомендації для вибору твердих сплавів.....	94
3.6 Класифікація сучасних твердих сплавів по міжнародному стандарту ISO 513-75 і визначення умов їхнього ефективного використання.....	101
3.7 Основні тенденції вдосконалення твердих сплавів.....	112
3.7.1 <i>Класи матеріалів, що одержуються СВ-синтезом</i>	117
3.7.2 Наукові принципи керування процесом одержання компактованих СВС продуктів.....	118
3.7.3 Матеріали, отримані за технологією СВС-компактування.....	122
Питання для самоперевірки.....	133
Слова і скорочення у розділі 3.....	135
4 РІЗАЛЬНА КЕРАМІКА.....	137
4.1 Оксидна та оксидно-карбїдна рїзальна кераміка.....	139
4.2 Оксидно-нітридна та нітридна рїзальна кераміка.....	144
4.3 Короткі рекомендації з вибору рїзальної кераміки.....	146
4.4 Основні тенденції вдосконалення мінералокераміки.....	149
4.4.1 Кераміка, отримана за технологією СВ-синтезу.....	158
Питання для самоперевірки.....	159
Слова і скорочення в розділі 4.....	159
5 НАДТВЕРДІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ.....	161
5.1 Особливості одержання синтетичних інструментальних матеріалів на основі алмазу і кубїчного ніприду бору.....	163
5.2 Характеристика основних властивостей та області застосування полікристалів синтетичного алмазу (ПКА).....	175

5.3 Характеристика основних властивостей і область застосування ПНТМ на основі щільних модифікацій нітриду бору BN	180
5.4 Короткі рекомендації з вибору і застосування ПНТМ	188
5.5 Основні тенденції в досконалюванні ПНТМ	193
5.6 Наукові і технологічні основи створення нових алмазовмісних матеріалів методом СВС	195
Питання для самоперевірки	198
Слова та терміни в розділі 5	199
6 ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ЗІ ЗНОСОСТІЙКИМИ ПОКРИТТЯМИ.....	201
6.1 Вимоги, які ставляться до зносостійких покриттів	203
6.2 Методи нанесення зносостійких покриттів	212
6.2.1 Методи хімічного осадження покриттів (CVD)	212
6.2.2 Методи термодифузійного насичення (ТДН).....	215
6.2.3 Методи фізичного осадження покриттів (PVD).....	216
6.3 Рекомендації з вибору зносостійких покриттів	220
6.4 Ефективність застосування зносостійких покриттів	224
Питання для самоперевірки	233
Слова і скорочення в розділі 6.....	234
7 ХАРАКТЕРИСТИКИ І МАТЕРІАЛИ АБРАЗИВНИХ ІНСТРУМЕНТІВ	235
7.1 Абразивне оброблення.....	235
7.2 Характеристики абразивних інструментів	240
7.3 Абразивні матеріали.....	240
7.3.1 Природні й синтетичні абразивні матеріали та їх властивості.....	242
7.3.2 Природні й синтетичні надтверді матеріали та їх властивості.....	250
7.4 Зернистість абразивних матеріалів	257
7.5 Твердість абразивних інструментів	261
7.6 Зв'язки абразивних інструментів	263
7.7 Структура абразивних інструментів	268
7.8 Концентрація алмазних або ельборових абразивних інструментів	271
7.9 Форми і розміри абразивних інструментів	272

7.10	Особливості виготовлення алмазо- та кубонітоабразивних інструментів.....	273
7.11	Пасти та суспензії з поршків НТМ.....	288
7.12	Основні тенденції вдосконалювання абразивних інструментів і матеріалів.....	292
7.13	Маркування абразивних інструментів.....	297
	Питання для самоперевірки.....	301
	Слова і скорочення в розділі 7.....	302
8	ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЮ, У ТОМУ ЧИСЛІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ.....	305
8.1	Синтезовані алмазні нанопорошки.....	305
8.1.1	Синтез та очищення УДА.....	306
8.1.2	Області застосування алмазних нанопорошків (марки УДА, УДА-Г).....	307
8.2	Фулерени і вуглецеві нанотрубки.....	310
8.2.1	Структури молекул графіту, алмазу, фулерена і нанотрубки.....	310
8.2.2	Властивості фулеренів, нанотрубок і ймовірні області їхнього застосування.....	315
	Питання для самоперевірки.....	319
	Слова і скорочення в розділі 8.....	320
9	МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ПО ВИВЧЕННЮ ТЕМИ «ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ».....	321
	ТИПОВІ ТЕСТИ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І МОДУЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ЗНАТЬ.....	334
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	366

ВСТУП

Сучасне промислове виробництво передбачає різке підвищення технічного рівня, якості та обсягу випуску продукції машинобудування й металообробки у встановлені терміни. У виконанні цих завдань велике значення має якість усієї обробної системи, зокрема різального інструменту. Підвищення рівня точності продукції машинобудування, широка автоматизація технологічних процесів на базі гнучких виробничих систем і верстатів із ЧПК істотно підвищили вимоги до експлуатаційних властивостей різального інструменту – його точності й надійності, які для заданих умов оброблення значною мірою визначаються властивостями інструментального матеріалу.

У посібнику узагальнений і систематизований досвід вітчизняних підприємств, закордонних фірм, науково-дослідних і проектно-конструкторських організацій, а також використані дослідження авторів з питань вибору і практичного використання сучасних інструментальних матеріалів у машинобудівній галузі з метою створення конкурентоспроможної промислової продукції.

У посібнику багато уваги приділено: вимогам, які ставляться до інструментальних матеріалів; їх класифікації як за групами, так і за підгрупами, у т.ч. і за міжнародним стандартом ISO 513–75; характеристикам основних властивостей і сферам застосування різних груп інструментальних матеріалів; технологіям виготовлення інструментальних матеріалів і основним тенденціям і принципам їх удосконалення. Крім того, наведені короткі рекомендації щодо вибору і практичного використання інструментальних матеріалів, що забезпечують високі якість, надійність і працездатність різальних інструментів.

Від якості, надійності й працездатності різального інструменту, який застосовується у процесах виготовлення деталей машин і механізмів, значною мірою залежать їх якість і точність, а також продуктивність та ефективність процесу оброблення. Проблемі продуктивності необхідно приділяти особливу увагу, тому що вона в першу чергу впливає на зниження собівартості продукції. Продуктивність процесу різання знаходиться в

тісній залежності від стійкості інструменту: зі збільшенням інтенсивності роботи інструменту його стійкість, як правило, знижується. Продуктивність обробки, стійкість і міцність інструменту визначаються багатьма факторами (родом матеріалу різальної частини інструменту; кількістю і довжиною різальних кромок; конструктивними і геометричними елементами різальної частини; стружкозавиванням та стружколоманням; умовами охолодження різальних кромок у процесі різання та багатьма іншими), від яких залежить вибір режимів різання.

З перелічених вище факторів найбільше, і при цьому революціонізує, значення має матеріал різальної частини інструменту, про що свідчить історія розвитку різальних інструментів. Так, на початку дрібносерійного мануфактурного виробництва (18-те століття) з використанням лише інструментальної нелегованої сталі швидкості різання були в межах швидкості пересування людини. Потім, коли стала швидко розвиватися промисловість, а, відповідно, і металообробка, та з'явилися більш якісні інструментальні матеріали, у т.ч. і такі, як синтетичні алмази та надтвердий кубічний нітрид бору, швидкості різання, особливо при обробці кольорових металів, на початку 21-го століття досягли швидкості звуку, тобто продуктивність під час різання металів лезовим інструментом за цей час зросла майже в 200 разів. Таким чином, спостерігалось різке підвищення продуктивності під час переходу, наприклад, для лезових інструментів від нелегованої (вуглецевої) і легваної інструментальних сталей до швидкорізальної сталі, від швидкорізальної сталі до твердих сплавів, від твердих сплавів до мінералокераміки, від мінералокераміки до надтвердих матеріалів.

Інструментальні матеріали можна класифікувати за схемою, наведеною на рис. 1.

Підвищення швидкостей різання під час переходу при обробленні лезовим інструментом від інструментальної сталі до швидкорізальної, твердих сплавів і мінералокераміки характеризується співвідношеннями $1 : (4-4,5) : (16-25) : (40-50)$ відповідно. Звідси випливає, що ніякий інший фактор у підвищенні

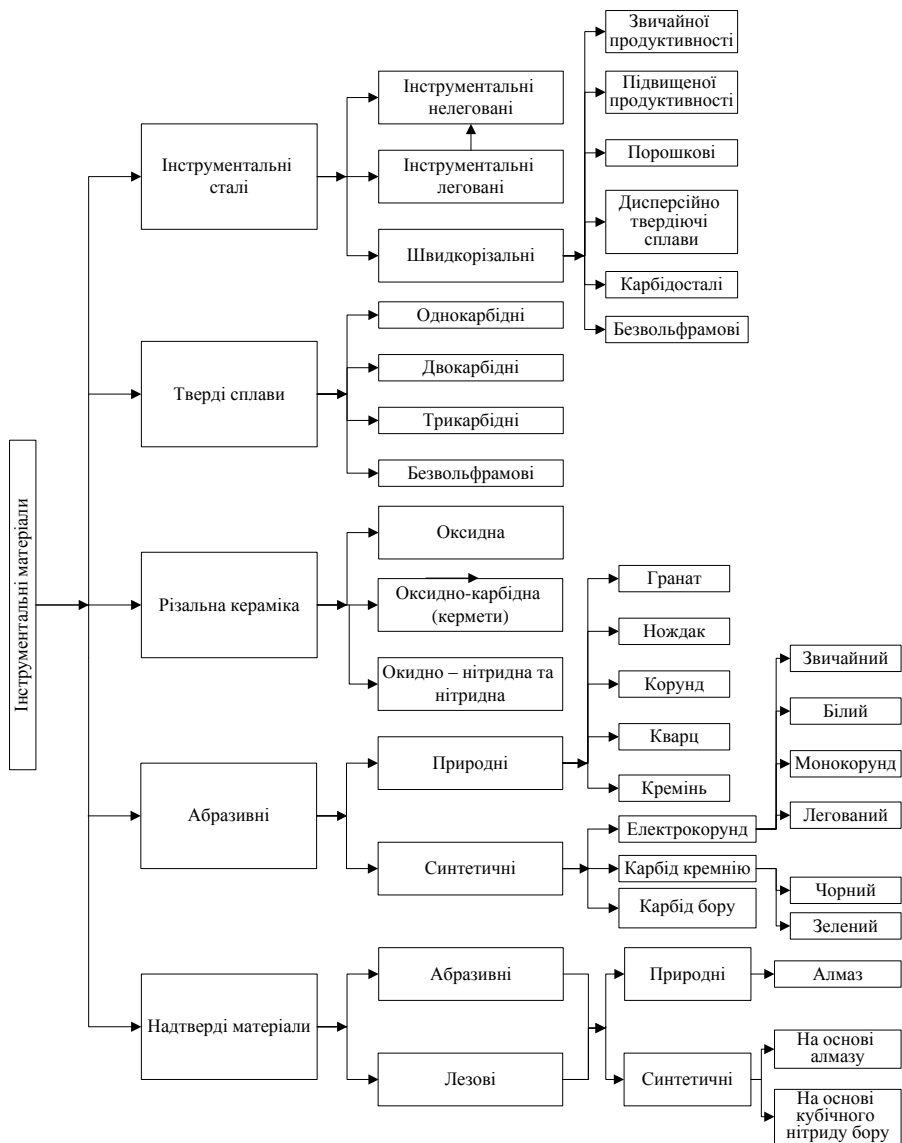


Рисунок 1 – Класифікація інструментальних матеріалів

продуктивності праці не може конкурувати з матеріалом різальної частини інструменту, тобто правильний вибір матеріалу різальної частини інструменту є однією з найважливіших умов, які забезпечують високу продуктивність процесу різання.

За своїми фізико-хіміко-механічними властивостями та принципами практичного використання всі інструментальні матеріали діляться на дві групи:

- інструментальні матеріали для лезових інструментів;
- інструментальні матеріали для абразивних інструментів.

Необхідно звернути увагу на те, що лише надтверді матеріали можуть використовуватися для виготовлення як лезових, так і абразивних інструментів. Інші ж використовуються або тільки для виготовлення лезових (інструментальні сталі, тверді сплави (металокераміка), різальна кераміка (мінералокераміка)) інструментів, або тільки для виготовлення абразивних (абразивні матеріали) інструментів.

1. ВИМОГИ, ЩО СТАВЛЯТЬСЯ ДО ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ. КЛАСИФІКАЦІЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ЇХ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Під час різання контактні площадки інструмента піддаються інтенсивному впливу високих силових навантажень і температур, величини яких мають, як правило, змінний характер, а взаємодія з оброблюваним матеріалом і реагентами з навколишнього середовища приводить до перебігу інтенсивних фізико-хімічних процесів: адгезії, дифузії, окислювання, корозії та ін.

З урахуванням необхідності забезпечення опору різального інструменту мікро- і макроруйнуванню в зазначених умовах до властивостей інструментальних матеріалів ставляться комплекс спеціальних вимог, виконання яких визначає місце їхнього ефективного застосування для відповідних різальних інструментів та умов обробки.

1.1. Висока твердість

Для проникання леза в матеріал заготовки і відділення від неї зрізаного шару (рис. 1.1) твердість інструментального матеріалу H_i повинна бути, в принципі, вища, ніж твердість оброблюваного матеріалу H_m . В іншому разі різання не буде відбуватиметься.

Примітка. Твердість – це здатність матеріалу опиратися проникненню в нього тіла з іншого матеріалу. При вимірюванні твердості таким тілом є спеціальний наконечник – індентор, який може мати форму кулі (методи Бріннеля і Роквелла (шкала В)),

конусу (метод Роквелла (шкали А і С)) або піраміди (метод Віккерса). Індентор виготовляють із матеріалу, що має твердість більшу, ніж твердість випробовуваного матеріалу: із загартованої сталі (найчастіше) або твердого сплаву (методи Бріннеля і Роквелла (шкала В)), або алмазу (методи Роквелла і Віккерса). Після статичного нагрівання індентора певним зусиллям на поверхні випробовуваного матеріалу внаслідок пластичного деформування частини поверхневого шару залишається відбиток. Твер-

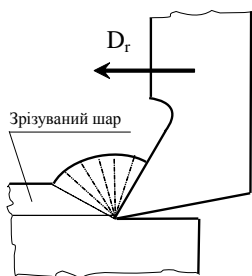


Рисунок 1.1 –
Проникання леза
інструмента в
заготовку

дість визначають за розмірами отриманого відбитка. Величина твердості знаходиться як відношення прикладеного навантаження до величини площі поверхні відбитка, тобто розмірністю твердості є відношення одиниці сили до одиниці площі – $1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па}$. Таку саму розмірність мають характеристики тиску, міцності та модуля пружності. Позначення твердості залежить від методу вимірювання: HB – при вдавненні сталеві кульки, або HBW – твердосплавної (метод Бріннеля); HR із зазначенням шкали (A, B або C) відповідно HRA, HRB або HRC (метод Роквелла); HV (метод Віккерса). Вибір відповідного методу вимірювання твердості (одиниці твердості) визначається в першу чергу властивостями випробуваного матеріалу. Наприклад, метод Бріннеля (HB) застосовують для не-термооброблених сталей, метод Роквелла – для загартованих сталей (HRC) і твердих сплавів (HRA), метод Віккерса (HV) – для високотвердих матеріалів, наприклад, твердих сплавів і найчастіше надтвердих матеріалів. Наближені співвідношення чисел твердості за Бріннелем, Роквеллом і Віккерсом подані в Додатку А.

Для ефективного різання бажано мати співвідношення $H_i/H_m \geq 2-3$. Чим вища твердість інструментального матеріалу, тим ефективніша обробка більш твердого оброблюваного матеріалу. Однак збільшення твердості інструментального матеріалу H_i , як правило, супроводжується зростанням його крихкості, а тому для різних марок інструментальних матеріалів існує певне (оптимальне) відношення H_i/H_m . У середньому при виборі інструментального матеріалу для різального інструменту його твердість беруть не менш ніж в 1,4–1,7 раза вищою за твердість оброблюваного матеріалу.

1.2. Висока міцність

Висока міцність є однією з важливих вимог до інструментального матеріалу. Якщо висока твердість матеріалу робочої частини інструмента не забезпечується необхідною міцністю, то це призводить до поломки інструмента і викрашування різальних кромки. Тому бажано, щоб інструментальний матеріал поєднував високу твердість із високою опірністю стисканню та вигину і мав високу межу витривалості й ударної в'язкості.

Примітки:

1. Ударна в'язкість a_n є характеристикою в'язкості металу. Це відношення роботи руйнування до площі поперечного перерізу зразка в місці випробування (надрізу). Ударна в'язкість – це інтегральна характеристика, що складається з роботи зародження тріщини і роботи, яка затрачається на її поширення. Одиницею вимірювання ударної в'язкості є Дж/см², МДж/м² або кГ·м/см²

Крім того, інструментальний матеріал повинен опиратися появі втомних і термовтомних тріщин (тобто мати високу тріщиностійкість) в екстремальних умовах, що характеризують процес різання: великі тиски (до $2 \cdot 10^4$ МПа) і високі температури (до 1173К (900°C) і більші).

Як правило, до основних міцнісних характеристик інструментальних матеріалів відносять межу міцності на згин σ_z та ударну в'язкість a_n .

2. У цьому посібнику прийняті позначення вказаних величин відповідно до ДСТУ 4130-2002, який на сьогодні ще не відмінено і є більш вживаним у технічних документації і літературних джерелах, ніж новий стандарт ДСТУ EN 10002-5:2006. Відповідність позначень вказаного ДСТУ 4130-2002 новому ДСТУ EN 10002-5:2006 наведена у Додатку Б.

1.3. Висока теплостійкість

Під час різання металів унаслідок перетворення механічної енергії в теплову виділяється значна кількість тепла, і різальна частина інструмента нагрівається. Відомо, що зі збільшенням температури нагрівання матеріалу, у т.ч. й інструментального, його твердість зменшується (рис. 1.2).

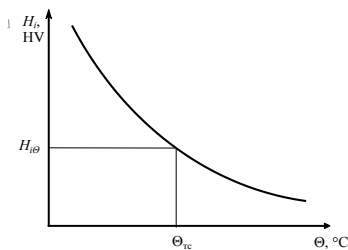


Рисунок 1.2 – Зменшення твердості інструментального матеріалу зі збільшенням температури нагрівання

Отже, через інтенсивне розігрівання контактні поверхні леза інструмента можуть втрачати свою вихідну твердість (табл. 1.1), розм'якшуватися й, отже, значно швидше зношуватися. Тому інструментальний матеріал повинен

мати високу теплостійкість, тобто здатність зберігати свої фізико – механічні властивості, зокрема високу твердість, при температурах різання, які можуть досягати температур плавлення оброблюваних матеріалів.

Таблиця 1.1 – Гаряча твердість інструментальних матеріалів (HRA)

Матеріал	Температура, °C						
	20	200	400	600	800	1000	1200
Мінералокераміка ЦМ-332	92	91	90	89	85	82	80
Твердий сплав Т15К6	90	89	85	80	75	70	60
Швидкорізальна сталь	84	83	80	72	50		
Інструментальна нелегована сталь	83	77	55				

Теплостійкість є одним із найважливіших показників якості інструментального матеріалу, тому що для інструмента важлива не лише вихідна твердість, а й те, як ця твердість зберігається при нагріванні інструмента в процесі різання за прийнятих умов обробки, і забезпечується необхідне (задане) співвідношення H_i/H_M . Збільшення рівня теплостійкості інструментального матеріалу дозволяє йому працювати з більшими швидкостями різання (табл. 1.2).

Таким чином, під теплостійкістю інструментального матеріалу розуміють його здатність зберігати при нагріванні твердість, достатню для здійснення процесу різання.

Теплостійкість у процесі різання характеризують так званою критичною температурою $\Theta_{тс}$ (див. рис. 1.2). Це максимальна температура, яка встановлюється в процесі різання залежно від прийнятих умов обробки, при якій інструмент ще здатний «різати», тобто твердість інструментального матеріалу при температурі $\Theta_{тс}$ повинна бути щонайменше більшою за твердість оброблюваного матеріалу $H_{i\Theta}/H_M > 1,0$.

Таблиця 1.2 – Теплостійкість інструментальних матеріалів і допустима ними швидкість різання

Матеріал	Теплостійкість, K (°C)	Допустима швидкість при різанні конструкційних

		сталей (типу сталі 45), м/хв
Інструментальна нелегована (вуглецева) сталь	473–523 (200 – 250)	5–15
Легована інструментальна сталь	623–673 (350–400)	15–30
Швидкорізальна сталь	873–823 (600–650)	40–60
Тверді сплави:	1073–1373 (800–1100)	100–300
- група ВК	1173–1273 (900–1000)	150–200
- групи ТК і ТТК	1273– 373 (1000–1100)	150–250
- безвольфраміві	1073–1173 (800–900)	100–300
- з покриттям	1273–1373 (1000–1100)	200–300
Кераміка	1473–1523 (1200–1250)	400–600

Для швидкорізальної сталі теплостійкість іноді називають червоностійкістю, тому що при нагріванні швидкорізальної сталі до критичних температур, при яких починається зміна кольору (свічення) сталі, і лезо інструмента ще має здатність зберігати необхідну для різання твердість. Наприклад, швидкорізальна сталь Р18 має темно-червоний колір при температурі 600–620°C, яку й беруть для неї гранично допустимою.

1.4. Висока зносостійкість

Інструментальний матеріал повинен мати високу зносостійкість, тобто мати хорошу опірність стираючій (абразивній) дії з боку оброблюваного матеріалу при підвищеній температурі, що проявляється в опорі інструментального матеріалу контактній утомі і видаленню його частинок із контактних ділянок поверхонь леза інструмента. Необхідною умовою забезпечення високої зносостійкості інструментального матеріалу є наявність у ньому достатньої кількості частинок більш твердих, ніж частинки, що містяться в оброблюваному матеріалі. Зносостійкість матеріалу залежить від його твердості, міцності й теплостійкості, зростаючи при їхньому збільшенні.

1.5. Високі теплопровідність і теплоємність

Важливою умовою нормальної роботи інструмента є зниження ймовірності появи локальних термічних напружень на контактних площадках леза. Відомо, що рівень температури в зоні контакту леза інструмента зі стружкою та оброблюваною

деталлю значною мірою визначається умовами відведення від цієї зони тепла, яке виділяється в процесі різання, у т.ч. і від теплофізичних властивостей інструментального матеріалу – теплопровідності й теплоємності.

Примітки:

1 Теплопровідність – один із видів теплообміну, при якому перенесення енергії у формі теплоти в нерівномірно нагрітому середовищі має атомно-молекулярний характер. Відповідно до закону Фур'є вектор q густини теплового потоку при теплопровідності пропорційний і протилежний за напрямком градієнту температури θ : $q = \lambda \text{grad } \theta$, де λ Вт/(м К) – коефіцієнт теплопровідності, який залежить від хімічної природи середовища та його стану.

2 Теплоємність – відношення кількості теплоти δQ , яка надається тілу (системі) при нескінченно малій зміні його стану в якому-небудь процесі, до відповідної зміни температури θ цього тіла: $C = \delta Q/d\theta$, Дж/К. Теплоємність залежить від хімічного складу і стану тіла, а також від процесу повідомлення тілу теплоти. Відношення теплоємності C до маси тіла M називається питомою теплоємністю c : $c = C/M$, Дж/(кг·К)

Таким чином, інструментальний матеріал повинен мати достатню теплопровідність і теплоємність. У загальному випадку, чим більший коефіцієнт теплопровідності λ і питома теплоємність c інструментального матеріалу, тим за інших однакових умов унаслідок поліпшення умов відведення тепла від зони різання температура різання буде нижчою, а зносостійкість інструмента вищою.

1.6. Сприятливі фрикційні й адгезійні властивості

Ця вимога є необхідною умовою досягнення високих різальних властивостей інструмента.

Фрикційні властивості інструментального матеріалу (у парі з оброблюваним) визначаються величиною середнього коефі-

цієнта тертя, який при різанні може досягати 1,0 і більше. Середній коефіцієнт тертя при різанні складається із двох частин: механічної (деформаційної) і адгезійної. На відміну від механічної складової для умов зовнішнього тертя, характерного для переважної більшості деталей машин, яка є константою контактуючих пар, тобто не залежить від умов контактування, а лише, відповідно до молекулярно-механічної теорії тертя, залежить від молекулярно-атомних шорсткостей поверхонь, при різанні деформаційна, так як і адгезійна, складові середнього коефіцієнта тертя є величинами змінними. Значення цих складових значною мірою обумовлені умовами різання (геометричними параметрами леза, подачею, швидкістю різання тощо), тобто тепловим і напруженим станом системи. Крім того, адгезія (схоплювання або злипання внаслідок міжмолекулярної взаємодії поверхонь, що контактують) великою мірою визначається фізико-хімічною активністю інструментального матеріалу стосовно оброблюваного, яка тим більша, чим більша їх «спорідненість». Наприклад, температура злипання (адгезії) сталі зі швидкорізальною сталлю значно менша, ніж із чистими карбідами (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Температура злипання (адгезії) чистих карбідів, твердих сплавів і швидкорізальної сталі зі сталлю ($\sigma_b = 600$ МПа)

Порядковий номер	Матеріал	Температура злипання, °С
1	Карбід вольфраму WC	1000
2	Карбід титану Ti	1125
3	Твердий сплав BK	625
4	Твердий сплав TK	775
5	Швидкорізальна сталь	575

Тому бажано, щоб кристалохімічні властивості інструментального матеріалу істотно відрізнялися б від відповідних властивостей оброблюваного матеріалу. Ступінь такої відмінності сильно впливає на інтенсивність фізико-хімічних процесів (адгезійно-втомних, корозійно-окиснених і дифузійних) і, відповідно, на зношування контактних площадок інструмента.

У загальному випадку, чим менший (більший) коефіцієнт тертя і вища (нижча) температура злипання з оброблюваним ма-

теріалом, тим для заданих умов можна вважати інструментальний матеріал більш (менш) якісним.

1.7. Технологічність

Інструментальний матеріал повинен мати хороші технологічні властивості, що забезпечують оптимальні умови виготовлення з нього інструментів. Наприклад, для інструментальних сталей є сприятливі особливості термічної обробки (мала чутливість до перегрівання і знеуглецювання, хороші загартованість і прожарювання, мінімальні деформування та утворення тріщин при загартуванні тощо); хороша оброблюваність тиском і різанням, зокрема, хороша шліфіваність після термічної обробки (без пригарів). Оброблюваність при шліфуванні – «шліфіваність» – одна з найважливіших технологічних властивостей, що визначає не лише особливості технології виготовлення інструментів, але і його експлуатацію (при переточуваннях).

У деяких випадках до інструментальних матеріалів може ставитися вимога збереження протягом певного часу високої гостроти леза (малі ρ), яка визначається величиною радіуса округлення різальної кромки ρ (у нормальній січній площині). Ця вимога є особливо важливою для процесів обробки з малими товщинами зрізів a , таких процесів, як: протягування, розгортання, нарізання різи плашками і мігчиками, шліфування та ін. Взагалі величина мінімального радіуса округлення різальної кромки ρ може дорівнювати умовному радіусу зерна в структурі інструментального матеріалу (рис. 1.3). При більших значеннях величини ρ можуть не тільки істотно зростати сили різання і крутні моменти, що може призводити до поломки інструмента, але й при несприятливому співвідношенні a/ρ , особливо при $a \ll \rho$, утворення стружки стає взагалі неможливим (рис. 1.4).

Примітка. Залежно від умов обробки для утворення стружки необхідно мати відношення $a/\rho > 0,3-0,5$

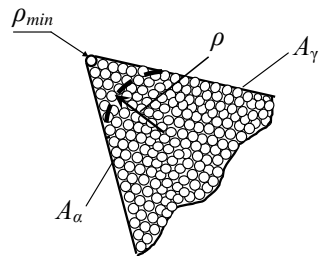


Рисунок 1.3 – Схема формування радіуса округлення різальної кромки ρ при різанні

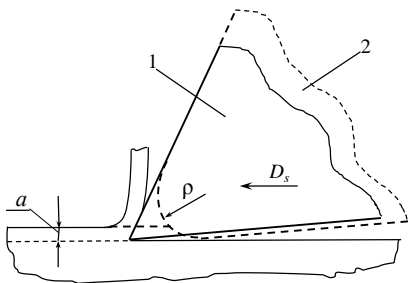


Рисунок 1.4 – Лезо інструмента при $\rho=0$ (1) і $\rho>0$ (2)

заданих умов обробки величина ρ визначальною мірою залежить від фізико-хіміко-механічних властивостей інструментального матеріалу (його структури, в'язкості, міцності, твердості, тріщиностійкості, величини зерен тощо).

Велика кількість різноманітних інструментів, які використовуються у промисловості, вимагає відповідної витрати інструментальних матеріалів. Тому до інструментального матеріалу може ставитися вимога економічності, тобто він повинен бути відносно недорогим (за інших однакових умов) і забезпечувати для заданих умов мінімально можливу собівартість обробки. Ця вимога може забезпечуватися (за виконання всіх інших вимог), наприклад, зменшенням питомої ваги інструментального матеріалу, застосуванням прогресивних, у першу чергу енергозберігаючих методів його одержання і сучасних зміцнювальних технологій, відсутністю в його складі рідких або гостродефіцитних і, відповідно, дорогих елементів тощо. Наприклад, наявність у складі швидкорізальної сталі сталі Р18 великої кількості вольфраму робить її, незважаючи на відносно хороші «різальні» властивості, часто економічно недоцільною. Саме тому ця марка швидкорізальної сталі має зараз у промисловості обмежене застосування. І, навпаки, у наш час все більше застосування знаходять безвольфрамові тверді сплави, що характеризуються не лише відсутністю в їхньому складі вольфрамівмісних елементів, але й значно меншою (в 1,5–2,0 рази) питомою вагою порівнянно із традиційно використовуваними в інструментальному виробництві металокерамічними твердими сплавами (ВК, ТК і ТТК).

Разом із цим величина ρ для більшості інструментальних матеріалів, які є полікристалічними, формується в перші секунди початку процесу різання залежно від міцності зв'язків між окремими зернами (конгломератами зерен) і сил, що діють на різальний клин у процесі при заданих умовах обробки. Таким чином, для

Для деяких інструментальних матеріалів, зокрема для інструментальних сталей, важливими вимогами до мікроструктури є форма і структура перліту та наявність залишків цементитної сітки (вуглецеві й леговані інструментальні сталі) або карбідна однорідність (леговані інструментальні й швидкорізальні сталі).

1.8. Класифікація інструментальних матеріалів за їхніми властивостями

Фізико-механічні, теплофізичні і кристало-хімічні властивості інструментального матеріалу (табл. 1.4) сильно впливають на працездатність різального інструменту, а оптимальний вибір цих властивостей дозволяє у відомих межах керувати процесами зношення контактних площадок леза, знижувати інтенсивність їхнього зношення, трансформувати один вид зношення в інши. Наприклад, при сталих значеннях геометричних параметрів лез і режимів обробки підвищення твердості, теплостійкості, міцності, пасивності активних реагентів з навколишнього середовища стосовно оброблюваного матеріалу супроводжується зростанням зносостійкості контактних площадок леза і відповідним підвищенням працездатності інструмента. Відповідно до вимог, що ставляться до інструментального матеріалу, вибір властивостей і конкретної марки матеріалу варто робити з урахуванням умов обробки, які визначаються властивостями оброблюваного матеріалу й характером контактної взаємодії інструментального та оброблюваного матеріалів у процесі різання.

Складний взаємозв'язок між різними властивостями інструментального матеріалу і їхній зв'язок з умовами обробки не лише визначають ступінь його відповідності комплексу вимог до нього, але й значною мірою обумовлюють відносно вузьку сферу його практичного застосування.

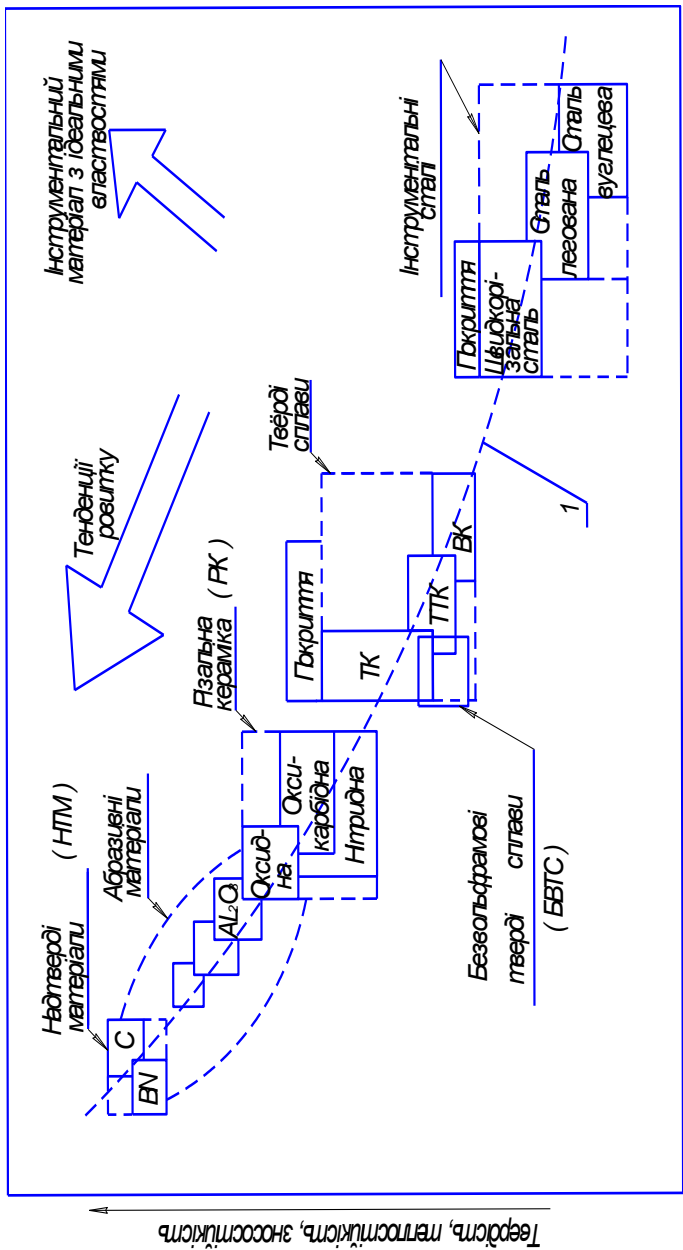
Таблиця 1.4 – Загальні характеристики інструментальних матеріалів та їхніх складових

Матеріал	Густина, г/см ³	Твердість, HRA (HRC)	Твердість HV, ГПа	Межа міцності при згині σ_z , МПа	Межа міцності при стиску, $\sigma_{ст}$, МПа	Ударна в'язкість $a_n \cdot 10^5$, Дж/м ²	Теплостійкість, °С	Теплопровідність λ , Вт/(м·К)	Модуль пружності, ГПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Інструментальні сталі:									
- інструментальна нелегована	7,81–7,83	82–83 (61-63)	–	1950–2300	до 3500	до 0,5	200–250	60–80	210
- легована інструментальна	7,82–7,83	83–84 (63–65)	–	2200–3400	до 3800	0,5–2,95	250–400	60–80	
- швидкорізальна	7,9–8,75	83–87 (63–70)	13–16	до 4000	до 4000	1–6	600–700	67,5–85,1	
Твердий сплав (вольфрам-молібденний)	11,1–14,8	88–92	17–24	до 2000	до 5900	24,5–58,8	800–1100	16,75–87,9	500–600
Мінералокераміка:									
- оксидна	3,6–4,0	90–94	30	до 950	до 3000	4,9–11,8	1200	4,2–21,0	400
- змішана (кермети)	4,4–4,7	до 95	19	до 980	до 5600	до 19,6	900–1100	25,1–83,7	350
Кубічний нітрид бору	3,45	–	60–80	до 1000	до 6500	–	1100–1300	25	720
Алмаз:									
- природний	3,01–3,56	–	100,6	210–490	2000	–	700–800	130–140	900
- синтетичний	3,48–3,54	–	86–100	до 300	до 3000	–	700–800	138,2–146,5	720–930
Електрокорунд	3,93–4,01	–	22 24	270	760	–	–	47	–
Карбід кремнію	3,16–3,99	–	27–35	100–150	1000–2000	–	1200–1300	37	360
Карбід бору	2,48–2,52	–	37–45	300	1800	–	500–700	38	296
Карбід вольфраму	15,0–15,4	–	21	560	2460	–	1300	50	722
Карбід титану	4,8–4,9	–	32	620	1380	–	1530	86,9	466
Карбід танталу	14,3–14,5	–	15,5–16,5	–	1050	–	1730	45	505
Кобальт	8,9	–	1,7	–	1250	–	–	70	207,5

За своїми фізико-хіміко-механічними властивостями інструментальні матеріали для лезових інструментів діляться на п'ять основних груп: інструментальні сталі (нелеговані (вуглецеві), леговані й швидкорізальні); металокерамічні тверді сплави (однокарбідні (ВК), двокарбідні (ТК), трикарбідні (ТТК), безвольфрамкові тверді сплави (БВТС)); різальна кераміка (РК) – оксидна, оксидно-карбідна й нітридна і надтверді матеріали (НТМ) на основі синтетичного алмазу (АС) і кубічного нітриду бору (КНБ).

На рис. 1.5 показано розташування основних груп інструментальних матеріалів за їх властивостями, а також тенденції їх розвитку (вдосконалення). З рисунка бачимо, що твердість і міцність інструментальних матеріалів – це властивості-антагоністи, тобто чим вища твердість матеріалу, тим нижчою є його міцність. Саме тому сфера та умова раціонального використання того або іншого інструментального матеріалу в різальному інструменті визначається відповідним набором його основних властивостей. Найпоширенішою із цих груп для лезових інструментів є швидкорізальна сталь, з якої виготовляється близько 60% такого інструменту. З металокерамічних твердих сплавів виготовляють близько 30% лезового інструменту, з інших груп матеріалів – приблизно 10%.

Інструменти з надтвердих інструментальних матеріалів (НТМ) на основі алмазу і кубічного нітриду бору або з різальної кераміки використовують переважно для чистової і суперчистової обробки виробів (у тому числі й з підвищеною твердістю оброблюваних поверхонь після повної термічної обробки) на високих і надвисоких швидкостях різання, але при досить обмежених перерізах зрізу. Це обумовлено тим, що інструмент, який оснащений пластинами з НТМ і РК, має високий запас пластичної міцності (високі показники за твердістю і теплостійкістю) при відносно невеликому запасі крихкої міцності (невисокі значення межі міцності при вигині, ударній в'язкості, тріщиностійкості).



Прочність на вигин, ударна в'язкість, тріщиностійкість

Рисунок 1.5 – Принципова залежність «твердість – міцність» інструментальних матеріалів

Інструменти, оснащені пластинами із твердого сплаву різних марок, мають досить вузьке службове призначення, що визначається відповідним поєднанням основних фізико-механічних властивостей кожної конкретної марки. Так, висококобальтові марки твердих сплавів, які мають більший запас крихкої міцності, найчастіше застосовується для чорнових операцій, а тверді сплави з високим процентним вмістом карбідів (WC, TiC, TaC та ін.), що мають великий запас пластичної міцності, використовують переважно для чистових операцій.

При обробці конструкційних сталей на малих і середніх швидкостях різання при поєднанні з середніми і більшими перерізами зрізів перевагу одержують інструменти з швидкорізальних сталей. Це пов'язане з відносно невеликим запасом пластичної міцності (середні значення твердості й теплостійкості) і їх великою крихкою міцністю, обумовленою тріщиностійкістю, витривалістю і високими значеннями ударної в'язкості й межі міцності при вигині. Аналіз основних напрямків удосконалення інструментальних матеріалів (див. рис. 1.5) дозволяє відзначити, що вони пов'язані і зростанням твердості, теплостійкості, зносостійкості при зниженні міцнісних характеристик, в'язкості і тріщиностійкості. Ці тенденції значною мірою не відповідають ідеї створення інструментального матеріалу з «ідеальними» властивостями, тобто з оптимальним поєднанням властивостей за твердістю, теплостійкістю, ударною в'язкістю, тріщиностійкістю, міцністю та ін. Очевидно, що рішення цієї проблеми повинно бути пов'язане з розробленням якогось композиційного інструментального матеріалу, у якого високі значення поверхневої твердості, теплостійкості, фізико-хімічної інертності до оброблюваного матеріалу поєднувалися б із досить високими значеннями об'ємної міцності при вигині, ударній в'язкості, межі витривалості.

У світовій практиці все більше застосування знаходять усілякі методи вдосконалення інструментальних матеріалів, особливо під час виробництва змінних багатогранних пластин (ЗБП) для механічного кріплення на різальному інструменті. У наш час уже розроблені особливо дрібнозернисті тверді сплави, нові ма-

рки надтвердих матеріалів, як правило, полікристалічної будови, кераміки (кермети, силініг та ін.), безвольфрамкових твердих сплавів і швидкорізальних сталей, створені методи міцнісної обробки пластичним деформуванням, а також хіміко-термічного, магнітно-імпульсного, лазерного зміцнення та ін. Особливе місце займають методи вдосконалення інструментальних матеріалів, спрямовані на зміну їх експлуатаційних (різальних) властивостей шляхом нанесення зносостійких покриттів.

Питання для самоперевірки

1. Перелічити основні вимоги до інструментальних матеріалів.
2. Що розуміють під «високою твердістю» і «високою міцністю» інструментальних матеріалів? Охарактеризуйте ці вимоги.
3. Охарактеризуйте вимоги до інструментальних матеріалів: «висока теплостійкість» і «висока зносостійкість».
4. Охарактеризуйте вимогу до інструментальних матеріалів: «сприятливі фрикційні та адгезійні властивості».
5. Поясніть, яку роль при різанні відіграють теплофізичні властивості (теплопровідність та питома теплоємність) інструментального матеріалу.
6. Охарактеризуйте вимоги до інструментальних матеріалів: «технологічність» і «економічність».
7. Дайте класифікацію (основні групи і підгрупи) інструментальних матеріалів.
8. Дайте графічну інтерпретацію класифікації інструментальних матеріалів за властивостями й охарактеризуйте тенденції (основні напрямки) вдосконалення інструментальних матеріалів.
9. Наведіть граничні значення твердості й теплостійкості різних груп інструментальних матеріалів.

Слова, скорочення, терміни в розділі 1

- Абразивне зношення** – зношування стиранням, тобто процес субмікрорізання (зняття стружки) зернами твердих абразивних матеріалів.
- Адгезія** – прилипання (злипання) або схоплювання в результаті міжмолекулярної взаємодії частин металу поверхонь, які контактують.
- АС** – алмаз синтетичний.
- БВТС** – безвольфрамкові тверді сплави.
- Дифузія** (від лат. diffusio – розлиття) – повільне проникнення однієї речовини (газу або рідини) в іншу при їхньому безпосередньому стиканні або через пористу перегородку.
- Індентор** – твердий наконечник будь-якої форми, що проникає у поверхню більш м'якого (порівнянно з ним) матеріалу.
- КНБ** – кубічний нітрид бору.
- Корозія** (від лат. corrosio – роз'їдання) – мимовільне руйнування твердих тіл, викликане хімічними й електрохімічними процесами, що розвиваються на поверхні тіла під час взаємодії із зовнішнім середовищем. Корозія металів (іржавіння заліза). Корозійному руйнуванню піддаються також бетон, будівельний камінь, дерево, деякі пластмаси та інші конструкційні матеріали.
- Реагент** (реактиви хімічні) – речовини, що застосовуються в лабораторіях для хімічного аналізу.
- РК** – рзальна кераміка.
- ЗБП** – змінні багатогранні пластини (для лезових інструментів).
- Сплав ВК** – металокерамічний однокарбідний (вольфрамо-кобальтовий); складається з карбідів вольфраму (WC) і кобальтової зв'язки (Co).
- Сплав ТК** – металокерамічний двокарбідний (титано-кобальтовий, вольфрамо-титано-кобальтовий); складається з карбідів вольфраму (WC), карбідів титану (TiC) і кобальтової зв'язки (Co).
- Сплав ТТК** – металокерамічний трикарбідний (титано-тантало-кобальтовий); складається з карбідів вольфраму (WC), титану (TiC), танталу (TaC) і кобальтової зв'язки (Co).

НТМ – надтверді матеріали.

Кельвін (К) – до 1968 р. іменувався як градус Кельвіна ($^{\circ}\text{K}$). Застосовується як одиниця Міжнародної практичної температурної шкали; одна з основних одиниць системи «СІ». $1 \text{ K} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Шкала Кельвіна – термодинамічна температурна шкала – це абсолютна шкала температур (початок відліку – абсолютний нуль температури). Одиниця термодинамічної температури – кельвін (К) – визначається як $1/273,16$ частина термодинамічної температури потрійної точки води.

Абсолютний нуль температури – розміщений на $273,16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ нижче температури потрійної точки води, тобто приблизно дорівнює $-273 \text{ }^{\circ}\text{C}$ за шкалою Цельсія.

Температура потрійної точки води – це температура співіснування льоду, води і пари; дорівнює $0,01 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($273,16 \text{ }^{\circ}\text{K}$).

2. ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ СТАЛІ

Сталі – це сплави заліза з вуглецем. Властивості будь-якої сталі (міцність, твердість, пружність, пластичність, в'язкість, зварюваність та ін.) насамперед залежать від вмісту вуглецю. Сталі, як і всі метали, є кристалічними речовинами. Якщо подивитися на свіжий злом сталевого виробу, то можна побачити, що поверхня злomu складається з великої кількості зерен. У деяких випадках зерна дуже дрібні й помітні лише при багаторазовому збільшенні, а в інших випадках зерна досить великі й помітні навіть простим оком. Кожне зерно, у свою чергу, складається з атомів, які, розташовуючись у строго визначеному порядку, утворюють так звану кристалічну ґратку. Для найпоширеніших промислових металів спостерігається утворення трьох типів кристалічних ґраток, від розміщення атомів у яких залежать їхні властивості: об'ємно центрована кубічна ОЦК (рис. 2.1 а), гранецентрована кубічна ГЦК (рис. 2.1 б) або гексагональна (рис. 2.1 в). Наприклад, Мо, W, V, Cr кристалізуються в системі ОЦК; Ni, Cu, Al, Pb - в системі ГЦК; Zn, Mg, Be, Cd - в гексагональній.

Примітка. В ОЦК довжина ребра куба $a=(2,87-8,89) \cdot 10^{-10}$ м; в ГЦК – $a=(3,6-4,9) \cdot 10^{-10}$ м; в гексагональній – $d=(2,26-3,2) \cdot 10^{-10}$ м, $c=(3,59-5,6) \cdot 10^{-10}$ м

Деякі речовини можуть мати не одну, а кілька різних кристалічних решіток. Так, наприклад, елемент вуглець існує в природі у вигляді вугілля, графіту і алмазу.

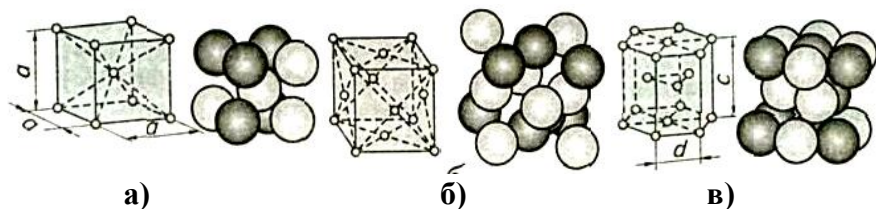


Рисунок 2.1 – Кристалічні ґратки:

- а) об'ємно центрована кубічна; б) гранецентрована кубічна;
в) гексагональна

Вугілля дуже пористе і м'яке, графіт трохи щільніший і твердіший (із графіту роблять серцевину олівців), алмаз же має найвищу твердість серед усіх відомих речовин. Така різниця у властивостях вугілля, графіту й алмазу пояснюється різним розміщенням атомів вуглецю в кристалічних ґратках у цих трьох речовинах.

Залізо має дві кристалічні решітки. Відповідно розрізняють: α -залізо (альфа-залізо Fe_α) (рис. 2.1 а) і γ -залізо (гама-залізо Fe_γ) (рис. 2.1 б).

При температурах 911 °С і вище 1392 °С існує α -залізо (Fe_α). При температурах від 911 °С до 1392 °С існує γ -залізо (Fe_γ). Перетворення α -заліза у γ -залізо у чистому залізі відбувається при 910 °С. У сталях перетворення α -заліза у γ -залізо починається раніше – при температурі 723 °С.

Різниця в кристалічній будові α -заліза і γ -заліза викликає різницю у їхніх властивостях. Так, густина γ -заліза більша за щільність α -заліза. Тому, незважаючи на нагрівання, у момент перетворення α -заліза в γ -залізо об'єм металу зменшується, виріб трохи «стискується». А при зворотному перетворенні γ -заліза в α -залізо, незважаючи на охолодження, об'єм збільшується. У γ -залізі може розчинитися значно більше вуглецю, ніж в α -залізі. В α -залізі вуглецю може розчинитися не більше 0,04%, а у γ -залізі його розчиняється до 1,7%. Сталі зі вмістом вуглецю 0,7-1,3% прийнято називати вуглецевими сталями і використовують їх, як правило, як інструментальних після відповідної термічної обробки – загартування.

При термічній обробці сталі, яка базується на перетворенні α -заліза у γ -залізо і на різній розчинності в них вуглецю, змінюється внутрішня будова – структура сталі. А від характеру структури залежать механічні і інші властивості сталі. У відпаленій сталі залізо знаходиться у формі α -заліза, що називається ферритом. Ферит дуже в'язкий і має невисоку твердість (НВ=60–80). Під мікроскопом ферит спостерігається у вигляді зерен неправильної форми.

У зв'язку з тим, що сталь – це сплав заліза з вуглецем, а вуглець в α -залізі практично не розчиняється, то в сталі він зна-

ходиться у вигляді хімічної сполуки із залізом – карбїду залїза. Ця хїмічна сполука вуглецю із залізом називається цементитом. Цементит – дуже крихка і тверда речовина. Його твердїсть – понад 65HRC (HB=700–750).

У правильно вїдпаленїй сталї цементит знаходиться або у вигляді тонких пластинок, або у вигляді дрібних зерен, рївно-мїрно розподїлених у феритї (рис. 2.2 а). У першому випадку структура зветься пластинчастим перлїгом, у другому випадку – зернистим перлїгом. Чим тоншї пластинки або меншї зерна цементиту, тим вища твердїсть перлїгу. Твердїсть пластинчастого перлїгу знаходиться у межах HB=190–290, твердїсть зернистого перлїгу – у межах HB=140–190. Вїдпалена вуглецева

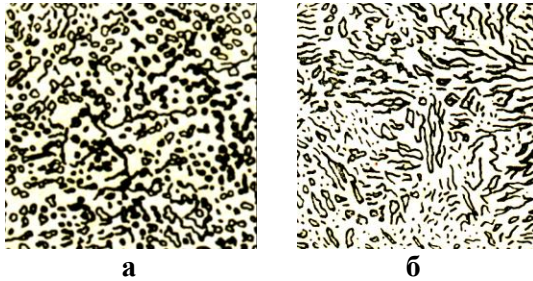


Рисунок 2.2 – Структура вїдпаленої (а) та загартованої (б) сталей

сталь із вмістом вуглецю 0,83% має у своїй структурї тільки перлїг. Сталь із вмістом вуглецю менше 0,83% має у своїй структурї поряд з перлїгом надлишковий ферит, а при вмісті вуглецю вище 0,83% у структурї сталї є надлишковий цементит у вигляді дрібних

включень або у вигляді тонкої сїтки по межах зерен.

При нагрїваннї до 723 °C структурних змін у сталї не вїдбувається. При 723 °C α -залїзо (ферит) починає перетворюватися в γ -залїзо. Інструмент для загартування нагрївають дещо вище – до 760–800 °C. Розчиннїсть вуглецю у γ -залїзі значно бїльша, нїж в α -залїзі. Тому цементит, який входить до структури перлїгу, починає енергїйно розчинятись у щойно утвореному γ -залїзі.

При високїй температурї рухливїсть атомів бїльша і вуглець рївномїрно розподїляється по всїй масї γ -залїза. Утворюється твердий розчин вуглецю в γ -залїзі – аустенїт. У вуглецевої сталї аустенїт стїйкий лише при високих температурах. Як-

що нагріту до високих температур сталь повільно охолоджувати, то перетворення підуть у зворотному порядку й аустеніт почне розпадатися. При 723 °С закінчиться перетворення γ -заліза в α -залізо, і буде знову отримано структуру відпаленої сталі.

При швидкому охолодженні (наприклад, при охолодженні у воді) відбувається загартування сталі. Процес розпаду аустеніту при цьому відбувається інакше. Під час загартування внаслідок дуже швидкого охолодження розпад аустеніту при температурі 723 °С не встигає відбутися. Аустеніт, як прийнято в цьому разі говорити, переохолоджується до температури 240–200 °С і його розпад відбувається при низьких температурах, коли рухливість атомів невелика. Атоми вуглецю вже не можуть виділятися із решітки α -заліза й утворювати зерна цементиту. Вуглець залишається примусово розчиненим у гратці α -заліза. Якщо звичайно в α -залізі може розчинитися не більше 0,04% вуглецю, то у цій ситуації його виявляється розчиненим до 1%. Ця структурна складова в загартованій сталі називається мартенситом (рис. 2.2б). Мартенсит має голчасту будову. Він має високу твердість (HV=650–700) і крихкість. Чим більше в сталі вуглецю, тим вища її твердість (рис. 2.3). Інструментальна сталь, на відміну від конструкційної, після загартування повинна мати твердість не менше 60 HRC

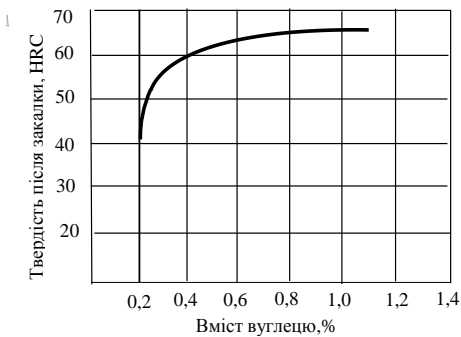


Рисунок 2.3 – Змінювання твердості загартованої сталі залежно від вмісту вуглецю

твердість не менше 60 HRC (62–65 HRC). Із графіка бачимо, що таку твердість можуть мати сталі зі вмістом вуглецю понад 0,6% і більше.

Надлишковий вуглець, насильно опинившись у кристалічній гратці α -заліза, створює в ній численні спотворення. Ці спотворення кристалічних граток, що приводять до зміни кристалічної будови сталі,

надають їй нових властивостей: високу твердість і високу крихкість.

При загартуванні виникають великі внутрішні напруження. Для зняття цих напружень, а також для зменшення крихкості відразу ж після загартування здійснюється відпускання. Якщо цього не зробити, то загартований інструмент може деформуватися (жолоблення) і в ньому можуть з'явитися тріщини. Спостерігалися навіть випадки, коли загартовані ввечері і не відпущені фрези на ранок виявлялися «розірваними» внутрішніми напруженнями на кілька частин.

Відпускання полягає в нагріванні загартованої сталі до відносно невисокої температури, витримці її при цій температурі і подальшому охолодженні. На відміну від загартування основне значення при відпусканні має не швидкість охолодження, а температура нагрівання і час витримки при ній. Як правило для інструментів з вуглецевих сталей застосовується відпускання при температурі 160–190 °С. При відпусканні відбуваються деякі зміни у властивостях мартенситу: твердість зменшується приблизно на дві одиниці, але при цьому дещо підвищується в'язкість і знімаються внутрішні напруження. При підвищенні температури відпускання понад 230 °С і збільшенні часу витримки з мартенситу починає виділятися вуглець, утворюючи зерна цементиту. Спочатку вони дуже дрібні, а з підвищенням температури відпалу стають усе крупніші. Мартенсит при цьому сильно збіднюється на вуглець, і його твердість знижується. Якщо загартовану сталь відпустити при температурі 650–700 °С, то процес може завершитись утворенням структури перліту з відповідним різким зниженням твердості сталі. Цей процес зміни структури загартованої сталі, який спостерігається при нагріванні, може відбутися і під час роботи інструмента, якщо режими різання встановлені такими, що різальна кромка сильно нагрівається. Відпал інструмента може також відбутися під час шліфування або заточення інструмента (пригари). Тому при виготовленні інструмента і під час його експлуатації необхідно стежити за тим, щоб різальна частина інструмента не перегрівалася вище допустимої для даного матеріалу температури.

При загартуванні серцевина виробу охолоджується порівняно повільно. Аустеніт у серцевині інструмента перетворюється не в мартенсит, а в більш м'які структурні складові. При цьому створюється інструмент із твердою поверхнею і в'язкою та м'якою серцевиною. Для деяких інструментів це є позитивною властивістю, наприклад, для мігчиків і розгортки, для ударного інструменту (зубила, клейма, пуансони) тощо. Для більшості ж інструментів, що вимагають високої твердості по всьому перерізу, неглибока загартованість виявляється шкідливою. Таким чином, вуглецеві інструментальні сталі мають відносно невелику глибину загартованості, до того ж неоднакову для різних плавки однієї і тієї самої марки сталі. Якщо ж ввести в інструментальну сталь усього тільки 0,5% хрому, то глибина загартованості збільшується й усувається брак через появу на поверхні інструмента м'яких плям, які часто спостерігаються в інструмента, виготовленого з вуглецевої сталі. Якщо хрому ввести в сталь понад 1%, то, крім збільшення глибини загартованості, стає можливим загартування в маслі з одержанням при цьому високої твердості. Загартування в маслі створює менші напруження в сталі, інструмент при цьому менше деформується і значно менше змінюються його розміри, що особливо важно під час виготовлення інструмента з нешліфованим профілем, наприклад мігчиків, плашок, різьових фрез.

Чому для легованих сталей стає можливим загартування в маслі, пояснюється тим, що легуючі елементи міцніше втримують атоми вуглецю в кристалічних ґратках заліза. Аустеніт легованих сталей стає стійким і навіть при більш повільному охолодженні в маслі аустеніт легованих сталей перетворюється в мартенсит, не встигаючи перетворитися в перліт. Деякі легуючі елементи, і насамперед вольфрам, сильно підвищують зносостійкість сталі. Пояснюється це тим, що вольфрам, як і деякі інші легуючі елементи (хром, ванадій, молібден), утворює з вуглецем хімічну сполуку – карбіди, що володіють досить високою твердістю. Твердість карбідів хрому, вольфраму і ванадію близька до твердості корунду. Якщо у твердій основі (мартенситі) рівномірно розподілені дрібні частинки ще більш твердої речовини (карбідів), то зносостійкість від цього зростає. Саме цим і

пояснюється більш висока зносостійкість легованих інструментальних сталей. Хром зменшує деформацію сталі при загартуванні. Проте особливо сприятливо впливає на зменшення деформацій при загартуванні спільна дія хрому і марганцю. Ванадій утворює з вуглецем дуже дрібні карбіди, які значно твердіше карбідів вольфраму. Виділяючись при відпалі, вони підвищують твердість, зносостійкість і теплостійкість сталі. Однак сталі, які містять багато ванадію, погано шліфуються. Тому вони мало придатні для виготовлення інструментів, що мають точний і складний фасонний профіль (різенарізні, зуборізні інструменти дрібних модулів тощо).

Ще більше впливає на підвищення теплостійкості сталі кобальт. На відміну від вольфраму і ванадію кобальт не утворює карбідів, але з мартенситу кобальтових сталей при відпалюванні виділяються надзвичайно дрібні й дуже тверді частинки сполук кобальту і заліза з вольфрамом, які й надають кобальтовій сталі більш високої теплостійкості. Кобальт найбільш сильно, порівняно з іншими елементами, підвищує різальні властивості сталі. Проте кобальтові сталі крихкі, погано куються і схильні до зневуглецювання. Нагрівання їх під загартування і відпал варто проводити із запобіжними заходами проти зневуглецювання.

За хімічним складом і ступенем легованості інструментальні сталі діляться на інструментальні нелеговані, леговані інструментальні та швидкорізальні сталі. Для різального інструменту переважно застосовують швидкорізальні сталі (леговані сталі із сумарним вмістом легуючих елементів до 30% і більше), а також у відносно невеликих кількостях заевтектоїдні вуглецеві сталі з вмістом вуглецю 0,7–1,3% (інструментальні нелеговані сталі) і середнім сумарним вмістом легуючих елементів (кремнію Si, марганцю Mn, хрому Cr, вольфраму W та ін.) від 1,0 до 3,0% (леговані інструментальні сталі).

Примітка. Деякі марки легованих інструментальних сталей можуть містити легуючих елементів до 10% і більше (X12M, X12Ф1, ШХ15 та ін.)

Основні фізико-механічні й технологічні властивості, а також сфери застосування найпоширеніших інструментальних сталей наведені у табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Основні фізико-механічні й технологічні властивості та сфери застосування найпоширеніших інструментальних сталей

Марка сталі	Густина, г/см^3	Твердість після відпалу, НВ	Після загартування і відпалу			Відсоток карбідної фази	Шліфова-ність ($K_{ш}$)	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Оброблюваність		Сфера переважного застосування
			σ_3 , МПа	$a_n \cdot 10^5$, Дж/м ²	HRC				$K_{обр}$	$K_{отс}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Інструментальні нелеговані сталі											
У7, У7А	7,83	≤ 187	< 2100	0,38	≥ 61	10,0–12,0	Хороша	200–220	1,2	1,2	Зубила, долота, стамески, леза ножиць для різання металів, рашпілі, сокири, колуни та ін.
У8, У8А	7,83	≤ 187	1950	-	≥ 61	11,0–13,0	Хороша	200–220	1,1	1,2	Зубила, борідки, кернери, леза ножиць для різання металів, пуанسونи для холодного штампування, рашпілі, сокири, колуни та ін.
У10, У10А	7,81	≤ 212	< 2380	0,2	≥ 61	14,0–16,0	Хороша	220–250	1,0	1,1	Мітчики ручні, розгортки малорозмірні, рашпілі, надфілі, пилки для обробки деревини, леза ножиць для різання металів, матриці для холодного штампування, гладкі калібри, сокири, колуни та ін.

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
У12, У12А	7,81	≤ 217	≤ 1720	0,2	≥ 62	17,0– 18,5	Хо- роша	220– 250	0,8	0,9	Мітчики ручні, мітчики машинні малорозмірні, плашки круглі й розгортки малорозмірні, рашпілі та ін.
Леговані інструментальні сталі											
Х	7,83	≤ 229	3200	0,5	≥ 62	14,5– 16,5	За- дов.	240– 250	0,5	0,9	Різці для обробки м'яких матеріалів з невеликою швидкістю, деталі гвинторізних головок, кернери, пильні ланцюги, штампи висаджувальні, токарні, довбальні й стругальні різці, вимірювальний інструмент: кінцеві міри довжини, гладкі й різеві калібри та ін.
9ХС	7,83	≤ 241	< 2200	0,25	≥ 62	12,5– 14,0	За- дов.	240– 250	0,5	0,9	Плашки круглі, розгортки ручні, свердла, фрези, ін. інструменти для обробки м'яких металів, корпуси свердел і зенкерів, оснащених пластинками твердого сплаву, штампи для листового штампування та ін.
ХВГ	7,83	≤ 2550	< 3400		≥ 61	14,0– 16,0	Задов.	200– 220	0,5	0,8	Різеві калібри, подовжені інструменти: протяжки та інший інструмент із більшим відношенням довжини до діаметра або товщини

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X6ВФ	7,83	≤ 229	3150		≥ 60	12,0–14,0	Задов.	400–500	0,5	0,9	Різнакатний інструмент (ролики і плашки), дереворізальний інструмент, ручні ножівкові полотна, штампи, ножі для різання металу та ін.
X12Ф1	7,83	≤ 255	3040	2,95	≥ 62	15,0–17,0	Задов.	490–510	0,3	0,8	Різнакатний інструмент (ролики і плашки), штампи для холодного штампування, рубанкові й фуганкові ножі та ін. інструмент для обробки деревини і неметалевих матеріалів
XВСГФ	7,83	≤ 255	3200		≥ 61	14,0–15,5	Задов.	200–220	0,5	0,8	Плашки круглі, розгортки ручні та ін. інструмент, виготовлений зі сталі 9ХС
11ХФ	7,82	217	3410	2,7	≥ 63	14,5–16,0	Задов.	240–250	0,6	0,9	Для мітчиків та ін. різального інструменту діаметром до 30 мм охолодженням при загартуванні в гарячих середовищах
X12Ф1	7,83	≤ 255	3040	2,95	≥ 62	15,0–17,0	Задов.	490–510	0,3	0,8	Різнакатний інструмент, штампи для холодного штампування, рубанкові і фуганкові ножі та ін. інструмент для обробки деревини і неметалевих матеріалів
Швидкорізальні сталі											
P18	8,75	255	2900–3100	3,0	63	–	Хороша (1,0)	620	0,5	1,0	Усі види різального інструменту при обробці вуглецевих нелегованих конструкційних сталей

Продовження табл. 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P6M5	8,15	255	3300— 3400	4,8	64	—	Хо- роша (0,8)	620	0,5	1,0	Те саме, що й для сталі P18, переважно для виготовлення різенарізного інструменту, а також для інструменту, що працює з ударними навантаженнями
P9K5	8,25	269	2500	0,7	64	—	По- ниж. (0,7)	630	0,3	0,70	Для різних різальних інструментів при обробці нержавіючих, жароміцних і високотвердих сталей
P6M5Ф3	8,15	269	3300— 3400	4,8	65	—	Хо- роша (0,8)	640	0,4	0,65	Для чистових і напівчистових різальних інструментів (фасонні різці, розгортки, протяжки, фрези та ін.) при обробці нелегованих і легованих конструкційних сталей
P6M5K5	8,15	269	3000	2,75	65	—	Хо- роша (0,8)	630	0,4	0,75	Для чорнового і напівчистового різального інструменту при обробці поліпшених легованих, а також нержавіючих сталей

Примітки.

1. Теплостійкість оцінюється температурою відпалу протягом 4 год., після якого твердість сталі становитиме 58 HRC.
2. $K_{\text{ошр}}$ і $K_{\text{отс}}$ – коефіцієнти оброблюваності сталі в стані поставки відповідно швидкорізальним і твердосплавним різцями.
3. Шліфованість оцінюється при шліфуванні сталі у термічно обробленому стані.

2.1. Інструментальні нелеговані сталі

Раніше інших матеріалів для виготовлення різальних інструментів почали застосовувати інструментальні нелеговані сталі (вуглецеві інструментальні сталі). До 70-х років XIX століття ці сталі були єдиним матеріалом для виготовлення металорізальних інструментів. Усі інструменти, починаючи від напилків і закінчуючи фрезами, виготовлялися з вуглецевих сталей. На сьогодні найбільше застосування знаходять сталі марок У7, У7А, ..., У12, У12А. Їх хімічний склад (табл. 2.2) регламентується ДСТУ 3833–98 (ГОСТ 1435–99).

Інструментальні нелеговані сталі позначаються буквою У, за якою йде цифра, що характеризує середній масовий вміст вуглецю у сталі в десятих частках відсотків, помножене на 10. Так, у сталі У7 вуглецю міститься близько 0,7%, у сталі У10 – близько 1% (табл. 2.2). Переважне застосування для різальних інструментів мають інструментальні нелеговані сталі з буквою А в кінці (У7А, У8А, ..., У12А), що відповідає високоякісним сталям зі зниженим вмістом шкідливих домішок (фосфору (до 0,025%) і сірки (до 0,018%)). Крім заліза і вуглецю ці сталі містять кремній (0,17–0,33%) і марганець (0,17–0,33% – якісні і 0,17–0,28% високоякісні).

Примітки:

1. У сталях У8Г і У8ГА наявність марганцю – 0,33–0,58% (див. табл. 2.2).

При розкритті питання про склад сталі його можна розглядати спрощено, тобто достатньо вказати кількість *основних* елементів, у т.ч. і легуючих, без урахування будь-якої кількості добавок або домішок. Наприклад, при розгляді складу сталі достатньо зазначити: У7–0,7% вуглецю та заліза (99,3%); ХВГ – по 1% вуглецю, хрому, вольфраму і марганцю (див. розд. 0) та заліза (96%); Р6М5–1% вуглецю, 6% вольфраму (див. розд. 0), 5% молібдену та 88% заліза. Мікроструктура інструментальних нелегованих сталей оцінюється за ДСТУ 3833-98 (ГОСТ 1435–99) з допомогою 10 (бали №1–№10) еталонів мікроструктури перліту (рис. 4.1 а–в) і 5-бальної дворядної шкали (бали №1–№5) залишків цементитної сітки (рис. 4.1 г–е).

Таблиця 2.2 – Хімічний склад нелегованих і легованих інструментальних сталей

Марка сталі	Масова частка, %						
	Вуглець	Марганець	Молібден	Ванадій	Кремній	Вольфрам	Хром
1	2	3	4	5	6	7	8
Інструментальні нелеговані сталі							
У7, У7А	0,65–0,74	0,17–0,33	–	–	0,17–0,33	–	–
У8, У8А	0,75–0,84	0,17–0,33 0,17–0,28	–	–	0,17–0,33	–	–
У8Г, У8ГА	0,80–0,90	0,33–0,58	–	–	0,17–0,33	–	–
У9, У9А	0,85–0,94	0,17–0,33 0,17–0,28	–	–	0,17–0,33	–	–
У10, У10А	0,95–1,09	0,17–0,33 0,17–0,28	–	–	0,17–0,33	–	–
У12, У12А	1,10–1,29	0,17–0,33 0,17–0,28	–	–	0,17–0,33	–	–
Леговані інструментальні сталі							
Х	0,95–1,10	0,15–0,45	–	–	0,10–0,40	–	1,30–1,65

Продовження табл. 2.2

1	2	3	4	5	6	7	8
9XC	0,85– 0,95	0,30–0,60	–	–	1,20– 1,60	–	0,95– 1,25
XBG	0,90– 1,05	0,80–1,10	–	–	0,10– 0,40	1,20–160	0,90– 1,20
X6BΦ	1,05– 1,15	0,15–0,40	–	0,50– 0,80	0,15– 0,35	1,10–1,50	5,50– 6,50
11XΦ	1,05– 1,15	0,40–0,70	–	0,15– 0,30	0,15– 0,35	–	0,40– 0,70
X12Φ1	1,25– 1,45	0,15–0,40	–	0,70– 0,90	0,15– 0,35	–	11,00– 12,50
XBCΓΦ	0,95– 1,05	0,60–0,90	–	0,05– 0,15	0,65– 1,00	0,60–0,80	0,05– 1,10
7XΓ2BMΦ	0,68– 0,75	1,80–2,30	0,50–0,80	0,10– 0,25	0,20– 0,40	0,55–0,90	1,50– 1,80
9X5BΦ	0,85– 1,00	0,15–0,40	–	0,15– 0,30	0,10– 0,40	0,80–1,20	4,50– 5,50
12X1	1,15– 1,25	0,30–0,60	–	–	0,15– 0,35	–	1,30– 1,65

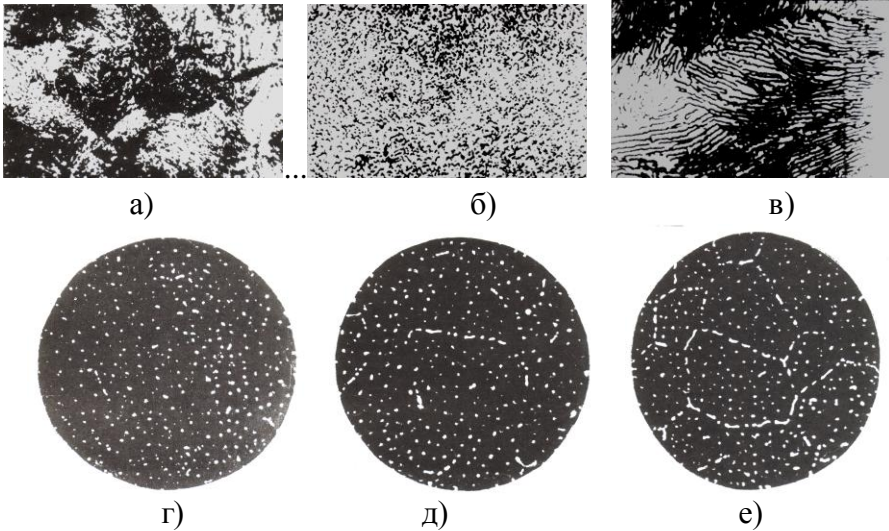


Рисунок 2.4 – Шкали для оцінки мікроструктури вуглецевої інструментальної сталі: форми перліту (а – в) і цементитної сітки (г – е)

У шкалі для оцінки форми перліту бал 1 (а) відповідає складу від 80% до 100% дрібно-пластинчастого сорбітоподібного перліту, бал 4 (б) – від 80% до 100% зернистого перліту, бал 10 (в) – понад 90% до 100% крупно-пластинчастого перліту.

Примітка. За ДСТУ 3833–98 (ГОСТ 1435–99) форми перліту, що відповідають балам 1 і 10, не допускаються для всіх марок інструментальних нелегованих сталей. Для сталей У10, У10А, У12 і У12А додатково не допускаються форми перліту, що відповідають балам 2 і 9

Шкала для оцінки цементитної сітки містить два ряди можливих еталонів цементитної сітки, які відрізняються розмірами елементів у ній. Кожен ряд має по 5 еталонів. 1-й ряд – крупноелементна сітка (середній відносний діаметр елементу приблизно дорівнює 0,045 мм); 2-й ряд – дрібноелементна сітка (діаметр елемента – менше 0,025 мм). Бал 1 (г) відповідає практично рівномірному розподілу цементитних часток і повній відсутності залишків цементитної сітки (не допускається). Бал 3 (д) відповідає структурі з наявністю ланцюжків цементитних часток у вигляді обривків слабо вираженої сітки. Бал 5 (е) – ланцюжки це-

ментитних часток утворюють сітку із замкнутими елементами. Відповідно до ДСТУ 3833–98 (ГОСТ 1435–99) цементитна сітка в мікроструктурі (бали 4 і 5) не допускається.

Характерною рисою інструментальних нелегованих сталей є їх неглибока прогартованість: висока твердість спостерігається лише в поверхневих шарах.

На сьогодні при використанні інструментів на металорізальних верстатах нелеговані вуглецеві сталі мають обмежене застосування внаслідок відносно невисоких режимів різання, які допускають їхні різальні властивості. Разом з тим для ручних інструментів, як правило, застосовуються саме ці інструментальні сталі.

До недоліків інструментальних нелегованих вуглецевих сталей належить також і необхідність з метою отримання потрібної твердості різкого охолодження при загартуванні (охолодження у воді), що приводить, як правило, до значних внутрішніх напружень і деформацій (жолоблення) інструмента.

2.2. Леговані інструментальні сталі

Леговані інструментальні сталі за своїм хімічним складом відрізняються від високоякісних інструментальних нелегованих сталей наявністю одного або декількох легуючих елементів, що позначаються у марках літерами українського алфавіту: хрому (Х), вольфраму (В), ванадію (Ф), кобальту (К), молібдену (М), кремнію (С), марганцю (Г) та ін. Початок промислового використання легованих інструментальних сталей відмічається з останньої третини ХІХ століття.

Примітка. Інструментальні леговані сталі позначаються числом, що характеризує масову наявність вуглецю у сталі в десятих частках відсотка (якщо цифра відсутня, наявність вуглецю становить близько 1%), за яким ідуть літери відповідно до легуючих елементів, і числа, що позначають вміст того чи іншого елемента у відсотках (якщо цифра відсутня, то це відповідає 1% наявності зазначеного елемента). Так, у сталі 9ХС наявність вуглецю становить 0,9%, хрому і кремнію по 1%; у сталі Х12Ф1 наявність вуглецю становить 1%, хром – 12%, ванадію – 1%.

Мікроструктура легованих інструментальних сталей оцінюється за ГОСТ 5950–73 структурою перліту (шкала 1), карбідною неоднорідністю для різних груп сталей (шкали 2 і 3) і карбідною сіткою (шкала 4). Шкала 1 містить 10 мікрофотографій (10 балів) можливих мікроструктур відпаленої або високовідпущеної сталі. Мікроструктура балів 1–5 – це структури зернистого перліту з розмірами зерен цементиту менше 10 мкм (рис. 2.5 а), балів 6–10 – структури зернистого перліту з постійно зростаючою кількістю пластинчастого перліту (за площею). Наприклад, у мікроструктурі, яка відповідає 6-му балу, наявність

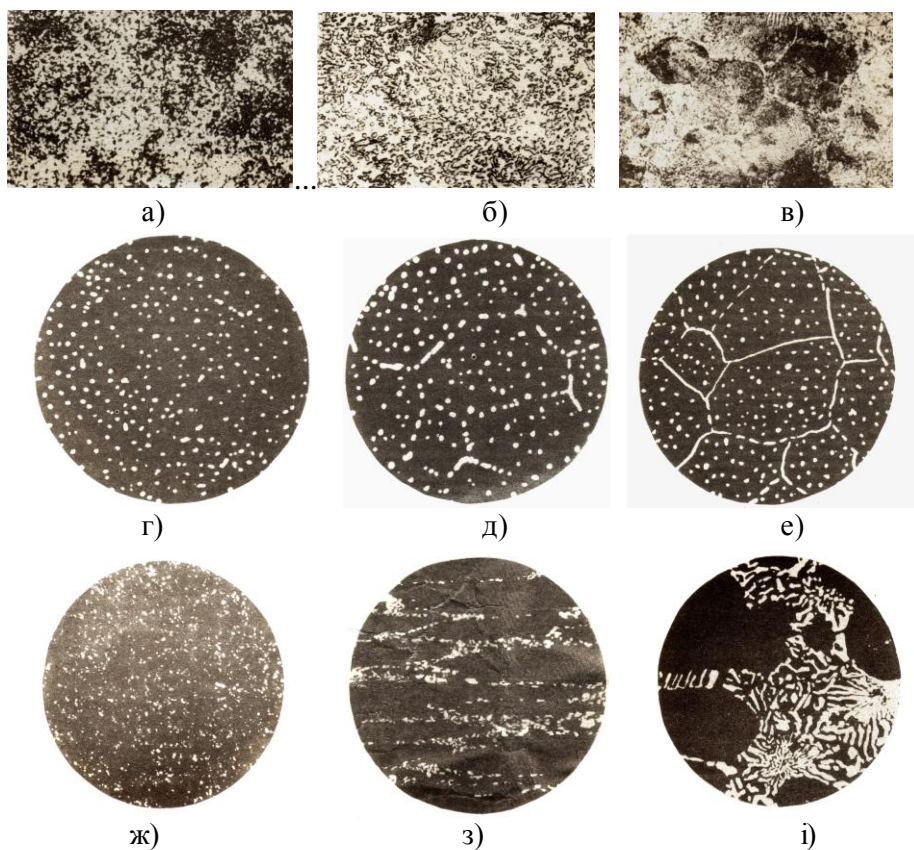


Рисунок 2.5 – Шкали для оцінки мікроструктури легованої інструментальної сталі: структури перліту (а – в), карбідної сітки (г – е) і карбідної неоднорідності (ж – і)

пластинчастого перлігу – до 10% (рис. 2.5 б), а 10-му – 100% (рис. 2.5 в). Оцінка карбідної сітки проводиться по 6 – бальній шкалі. Бал 1 (рис. 2.5 г) відповідає практично рівномірному розподілу карбідних часток і повній відсутності залишків карбідної сітки. Бал 4 (рис. 2.5 д) відповідає структурі з наявністю ланцюжків цементитних часток у вигляді обривків слабо вираженої сітки. Бал 6 (рис. 2.5 е) - ланцюжки карбідних часток утворюють сітку із замкнутими елементами.

Оцінка карбідної неоднорідності (карбідна строчечність (рядковість)), нерівномірне скупчення карбідів на окремих ділянках і т.і.) інструментальних легованих сталей після термічної обробки (загартування – відпуск) проводиться по 10 – бальній шкалі.

Бал 1 відповідає рівномірному розподілу карбідів (рис. 2.5 ж). Бали 2–9 характеризують мікроструктури, які збільшуються по мірі збільшення бала полосчастості (смужкуватості), строчечності (рядковості), деформованістю сітки і наявністю ділянок карбідної евтектики.

Наприклад, бал 6 відповідає структурі з деформованою сіткою евтектичних карбідів (рис. 2.5 з), а бал 10 – литої сталі (рис. 2.5 е). Більшість марок гарячекатаної, кутої і каліброваної легованої інструментальної сталі повинні відповідати наступним нормам: зернистий перліг – балам 1–6; залишки карбідної сітки - балам 3–4; карбідна неоднорідність – балам 4–6.

Марки інструментальних легованих сталей та їх хімічний склад регламентуються ГОСТ 5950–2000. Для різальних інструментів найчастіше використовуються низьколеговані сталі марок Х12М, В2Ф, Х6ВФ, ХВСГ, ХВГ, 9ХС та ін.

2.3. Швидкорізальні сталі

З'явившись на самому початку ХХ століття, швидкорізальні сталі й сьогодні ще є одними з основних матеріалів для виготовлення різального інструменту (до 60%), незважаючи на те, що інструменти із твердого сплаву, кераміки і НТМ забезпечують більш високі продуктивність обробки і зносостійкість.

Швидкорізальні сталі відрізняються від легованих інструментальних наявністю в них значно більшої кількості (до 30% і

більше) карбїдоуворювальних елементів (вольфраму, ванадію, молібдену та ін.), які значно покращують рїзальні властивості стали.

Примітка. У позначенні швидкорїзальної сталі літера Р означає, що сталь швидкорїзальна, а наступна за літерою цифра – вміст середньої масової частки вольфраму W у відсотках. Інші букви позначають легуючі елементи: М – молібден Мо, Ф – ванадій V, К – кобальт Со, А – азот N. Цифри, що йдуть за цими літерами, означають середню масову частку відповідного елемента у відсотках. У позначенні марки сталі не вказують масову частку: хрому (при будь-якій масовій частці), молібдену (до 1%), ванадію (до 2%), вуглецю (1%) Якщо ж вміст елементів перевищує зазначені межі, то вони обов'язково наявні в позначенні швидкорїзальної сталі. Наприклад, швидкорїзальна сталь марки 11РЗАМЗФ2, крім деяких елементів у зазначених межах (хром) і заліза, містить близько 1,1% вуглецю, 3% вольфраму, 1% азоту, 3% молібдену і 2% ванадію.

Щоб додати сталі властивість високої теплостійкості (червоностійкості), необхідно затримати процес виділення карбїдів із мартенситу, що призводить до його збїднення вуглецем і зниженню твердості. Це забезпечується більшою кількістю легуючих елементів, які міцно втримують атоми вуглецю, утворюючи леговані карбїди, які починають виділятися з мартенситу при більш високій температурі. У швидкорїзальній сталі карбїди починають виділятися з мартенситу при температурі понад 450°, але виділяються вони спочатку в надзвичайно дрібному – дисперсному – вигляді, і падіння твердості не відбувається. Лише при температурі понад 600° утворюються великі карбїди і твердість сталі починає значно падати. Проте одного підбору хімічного складу, виявляється, ще недостатньо для одержання сталі з високою теплостійкістю. Для цього ще необхідна особлива термічна обробка сталі.

Особливість термічної обробки швидкорїзальної сталі полягає в тому, що нагрівання під загартування відбувається до дуже високих температур (1260–1300 °С).

Така висока температура нагрівання під загартування спричинена прагненням розчинити в аустеніті якнайбільше легованих карбідів. Чим вища температура, тим більша кількість карбідів розчиняється в аустеніті. Якщо температура нагрівання під загартування буде занижена, то більша кількість карбідів залишиться у вільному вигляді поза розчином. Сталь буде зносостійкою, але з низькою теплостійкістю. Залежність стійкості інструмента T від температури нагрівання під загартування Θ_3 показана на рис. 2.6.

Розчинення легованих карбідів у аустеніті збагачує аустеніт, і мартенсит, що виходить потім з аустеніту, – вуглецем і легуючими елементами. Завдяки збагаченню вуглецем мартенсит виходить твердим, а внаслідок збагачення легуючими елементами він стає більш стійким, тому що, як уже було зазначено, легуючі елементи міцно втримують атоми вуглецю в мартенситі.

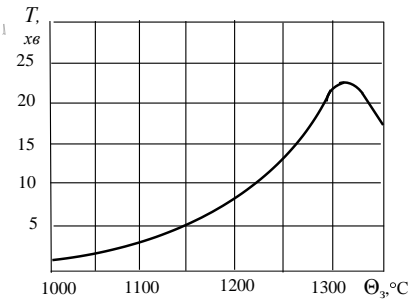


Рисунок 2.6 – Графік зміни різальних властивостей швидкорізальної сталі залежно від температури загартування

Верхня межа температур обмежується двома факторами: 1) оплавленням різальної кромки; 2) зростанням зерен аустеніту, що приводить до одержання грубозернистого мартенситу.

Зростання зерна сталі є вкрай небажаним явищем, тому що сталь із крупним зерном має меншу в'язкість і підвищену крихкість. Чим більше в сталі вольфраму і ванадію, тим сталь менше схильна до зростання зерна. Тому сталь Р18, що містить приблизно 18% вольфраму та 1,2% ванадію, має найбільш широкий інтервал (проміжок) гартівних температур і менш «примхлива» до коливання температури при термічній обробці.

Швидкорізальна сталь відносно погано проводить тепло, тому вона дуже чутлива до різких змін температури. Щоб зменшити перепад температур при нагріванні, загартування складно-

го інструменту проводять із двома підігрівками: перше підігрівання виконується в електропечі до температури 450–500 °С, а потім інструмент переносять до соляної ванни, де відбувається друге підігрівання до температури 800–850 °С. І лише після цього в наступній соляній ванні виконується остаточне нагрівання до температури 1260–1300 °С.

Швидкорізальна сталь – самогартівна сталь, тобто вона одержує високу твердість навіть при охолодженні на повітрі. Однак більш високі різальні властивості вона одержує при охолодженні в маслі. Саме тому швидкорізальну сталь гартують з охолодженням її в маслі.

У процесі загартування аустеніт швидкорізальної сталі перетворюється в мартенсит. Унаслідок великої стійкості левова-ного аустеніту він не встигає весь перетворитися в мартенсит. Частина аустеніту залишається нерозкладеною у вигляді так званого залишкового аустеніту. Таким чином, після загартування аустеніт швидкорізальної сталі складається з мартенситу, невеликої кількості карбідів, які не розчинилися, і залишкового аустеніту.

Твердість швидкорізальної сталі після загартування дорівнює 61–65 HRC. Твердість аустеніту значно нижча, ніж мартенситу, тому бажано весь аустеніт перетворити в мартенсит. Це завдання виконує відпал. Відпал швидкорізальної сталі варто робити негайно після загартування.

Відпал має на меті: 1) перевести залишковий аустеніт у мартенсит (цей мартенсит називається вторинним) і 2) зняти внутрішні напруження, що виникають у процесі загартування. На відміну від вуглецевої сталі відпал швидкорізальної сталі не знижує твердість, а збільшує її за рахунок виділення карбідів і перетворення залишкового аустеніту у вторинний мартенсит. Вторинний мартенсит має більшу теплостійкість, ніж первинний, тому що утворюється він із більш стійкого залишкового аустеніту. Під час відпалу залишковий аустеніт зазнає ніби вторинного загартування.

Наприклад, для сталі P18: температура відпалу дорівнює 550–570 °С, тривалість витримки при цій температурі становить

близько години, потім здійснюється охолодження на повітрі.

Для більш повного перетворення залишкового аустеніту в мартенсит необхідно робити багаторазовий відпал (для сталі Р18 – дво- або трикратний). Після відпалу швидкорізальна сталь має твердість 62–65 HRC і набуває ще більш високої теплостійкості.

Для цілого ряду швидкорізальних сталей характерним є наявність надлишкових карбідів, при великій кількості яких може також спостерігатися значна карбідна неоднорідність (рис. 2.7), яку для швидкорізальних сталей характеризують за двома шкалами карбідним балом від 1 до 8 (ГОСТ 19265–73).

Шкала 1 застосовується для сталі марок Р18, Р12Ф3, Р18К5Ф2, Р9М4К8. Шкала 2 – для марок Р9, Р6М5, Р6М5Ф3, 11Р3АМ3Ф2, Р9К5, Р6М5К5, Р2АМ9К5.

Бал 1 відповідає за рівномірний розподіл карбідів у тонкій смугастій структурі з короткими розірваними смугами або скупченнями карбідів шириною до 2 мм (для високовольфрамових сталей) і 1 мм (для низьковольфрамових і вольфрамомолібденових сталей). Бал 8 відповідає структурі з малодеформованою розірваною сіткою і

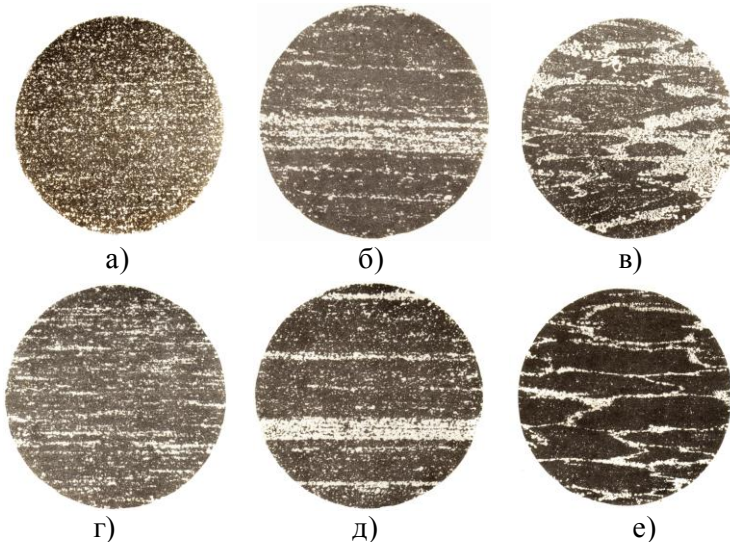


Рисунок 2.7 – Шкали для оцінки карбідної неоднорідності швидкорізальної сталі за шкалами 1 (а – в) і 2 (г – е):
а, г – бал 1; б, д – бал 5; в, е – бал 10

скупченнями карбідів шириною до 2,5 мм (для високовольфрамкових сталей) і 1,8 мм (для низьковольфрамкових і вольфрамомолібденових сталей). При цьому під смугою розуміють скупчення карбідів, довжина яких більше або дорівнює 5-кратній ширині, і дві смуги, що розміщені поруч, беруть приймаються за одну, якщо відстань між ними менше ширини більш вужчої смуги.

Карбідна неоднорідність викликає нерівномірний розподіл у поперечному перерізі інструменту легуючих елементів після його загартування та відпалу і сприяє виникненню гартівних тріщин. Унаслідок цього інструмент зі швидкорізальної сталі з великою карбідною неоднорідністю має знижені стійкість, крихку міцність і набуває схильності до викрашування лез. Зменшенню бала карбідної неоднорідності швидкорізальної сталі сприяє зменшення в її складі вольфраму, введення в нього молібдену, кількаразове проковування (для литих сталей) та ін.

Марки і хімічний склад швидкорізальних сталей регламентуються ДСТУ 19265 – 73 (табл. 2.3).

Примітка. У всіх марках швидкорізальних сталей, окрім зазначених у табл. 2.3 елементів, міститься: по 0,2–0,5% марганцю і кремнію, 0,6% нікелю, 0,25% міді, по 0,03% фосфору і сірки.

Швидкорізальні сталі умовно можна розділити на дві групи: нормальної продуктивності (помірної теплостійкості) і підвищеної продуктивності (підвищеної теплостійкості).

До сталей **нормальної продуктивності (теплостійкості)** відносять вольфраміву Р18 і вольфрамомолібденову Р6М5 сталі. Молібден – це хімічний аналог вольфраму, і на структурні перетворення у швидкорізальній сталі впливає так само, як і вольфрам. Молібден – більш сильнодіючий легуючий елемент, який забезпечує швидкорізальній сталі ту саму теплостійкість, що й вольфрам, якщо співвідношення Мо:W за вагою зазначених елементів становить 1:1,5.

Таблиця 2.3 – Марки і хімічний склад швидкорізальних сталей

Марка сталі	Масова частка, %						
	Вуглець	Хром	Вольфрам	Ванадій	Кобальт	Молибден	Азот
Сталі нормальної продуктивності (помірної теплостійкості)							
P18	0,73–0,83	3,80–4,40	17,00–18,50	1,00–1,40	н. б. 0,50	н. б. 1,00	–
P6M5	0,82–0,90	3,80–4,40	5,50–6,50	1,70–2,10	н. б. 0,50	4,80–5,30	–
Сталі підвищеної продуктивності (підвищеної теплостійкості)							
11P3AM3Φ2	1,02–1,12	3,80–4,30	2,50–3,30	2,30–2,70	н. б. 0,50	2,50–3,00	0,05–0,10
P6M5Φ3	0,95–1,05	3,80–4,30	5,70–6,70	2,30–2,70	н. б. 0,50	4,80–5,30	–
P12Φ3	0,95–1,05	3,80–4,30	12,0–13,0	2,50–3,00	н. б. 0,50	н. б. 0,50	–
P18K5Φ2	0,85–0,95	3,80–4,40	17,0–18,50	1,80–2,20	4,70–5,20	н. б. 1,00	–
P9K5	0,90–1,0	3,80–4,40	9,00–10,00	2,30–2,70	5,00–6,00	н. б. 1,00	–
P6M5K5	0,94–0,92	3,80–4,30	5,70–6,70	1,70–2,10	4,70–5,20	4,80–5,30	–
P9M4K8	1,0–1,10	3,00–3,60	8,50–9,50	2,30–2,70	7,50–8,50	3,80–4,30	–
P2AM9K5	1,0–1,10	3,80–4,40	1,50–2,00	1,70–2,10	4,70–5,20	8,00–9,00	0,05–1,10
Сталі високої теплостійкості							
B11M7K23	0,10	–	11,00	0,50	23,00	7,00	–
B14M7K25	0,10	–	14,00	0,50	25,00	7,00	–
3B20K20X4Φ	0,25	4,00	20,00	1,00	20,00	–	–

Примітка. На вимогу споживача виготовляють сталі марок P6M5 і P6M5Φ3 з легуванням азотом (масова частка азоту від 0,05 до 0,10%). У цьому випадку позначення марок P6AM5 і P6AM5Φ3

2. Н.б. – не більше

Тому для підвищення теплостійкості у вольфрамомолібденовій сталі Р6М5 відносний (вольфрам – молібден) вміст молібдену становить 40–50%, а вольфраму, відповідно, 60–50%. Заміна у швидкорізальній сталі вольфраму молібденом дещо знижує їхню теплостійкість, але за міцністю (σ і a_n) вони перевищують сталь Р18 (див. табл. 2.1).

Ці сталі мають твердість у загартованому стані 63–64 HRC, межу міцності при вигині 2900–3400 МПа, ударну в'язкість 2–4,8 Дж/м² і теплостійкість 600–620 °С. Вольфрамомолібденові сталі більш пластичні і краще куються, а їхня карбідна неоднорідність на 2 бали нижча, ніж у сталі Р18. Дещо менша теплостійкість і більша механічна міцність вольфрамомолібденових сталей визначають і сферу їхнього застосування. Зокрема, сталь Р6М5 доцільно застосовувати при менших швидкостях різання, але з більшими перерізами зрізуваного шару, тобто при більш важкому силовому режимі.

Зазначені сталі внаслідок їхньої високої пластичності придатні для виготовлення інструментів методами пластичного деформування. При виготовленні різальних інструментів на сьогодні найбільше поширення зі сталей нормальної продуктивності має молібденова швидкорізальна сталь марки Р6М5, завдяки не лише зниженому (порівняно, наприклад, зі сталлю Р18) складу дорогого і дефіцитного вольфраму, але й кращим показникам за деякими основними «різальними» властивостями: менша густина, що так само робить її більш економічною; більша міцність при вигині σ ; більша ударна в'язкість a_n (див. табл. 2.1); більша висока пластичність (табл. 2.4). Разом з тим на відміну від сталі Р18 вона більш схильна до перегрівання і знеуглецювання, що призводить і до більш високих вимог до технології виготовлення і відновлення (заточення) інструментів в цієї сталі. На сьогодні обсяг виробництва сталі Р6М5 досягає 80% від усього обсягу випуску швидкорізальних сталей. Вона використовується при обробці конструкційних сталей, чавунів, кольорових металів, дерева, пластмас та інших матеріалів.

Сталі підвищеної продуктивності (теплостійкості) характеризуються підвищеним вмістом ванадію (ванадієві сталі) і кобальту (кобальтові сталі).

Таблиця 2.4 – Технологічні властивості швидкорізальних сталей

Марка сталі	Пластичність при температурі, °С				Схильність до перегрівання	Схильність до знеуглецювання
	900	1000	1100	1200		
A11P3MФ2	5,0	5,7	6,6	5,5	Так	Підвищена
P6M5	9,5	9,4	7,4	5,2	«	«
P6M5K5	5,5	7,1	6,5	5,56	«	«
P9K5	6,1	7,5	6,1	5,7	«	«
P9M4K8	4,9	6,8	7,1	5,6	«	«
P12Ф3	4,4	7,6	6,8	6,2	«	Задовільна
P18	4,0	5,1	5,6	4,9	Немає	«

Примітка. Пластичність $\nu=0,628n$, де n – число обертів, на які закрутився зразок при випробуванні

Серед *ванадієвих швидкорізальних сталей* найбільше застосування одержала марка P6M5Ф3. Збільшення вмісту ванадію в мартенситі сталі підвищує її вторинну твердість, теплостійкість (див. табл. 2.1) та опір малим пластичним деформаціям. Значне зменшення вольфраму (порівняно зі сталлю P18) компенсується збільшенням ванадію. Тому ванадієві сталі більш тверді, теплостійкі й зносостійкі, ніж сталі P18 і P6M5. Твердість ванадієвих сталей може досягати 67 HRC, а теплостійкість – до 640–650°C. При цьому густина сталі P6M5Ф3 (8,15 г/см³) менша за густину швидкорізальної сталі P18 (8,75 г/см³), що робить її більш економічною як за рахунок зменшення кількості вольфраму, так і за рахунок зменшення питомої ваги, що дозволяє при однаковій масі одержати приблизно на 10% більшу (при однаковому діаметрі) довжину, наприклад, катаних прутків. Крім того, менша кількість вольфраму майже на 2 бали зменшує карбідну неоднорідність.

Разом з тим поряд із високою зносостійкістю сталі з підвищеним вмістом ванадію мають гіршу шліфованість через наявність більш твердих і менш теплопровідних карбідів ванадію (VC). Твердість останніх не уступає твердості зерен електрокорундового шліфувального круга (Al₂O₃). Крім того, виділення карбідів ванадію при відпалюванні деяких ванадієвих ста-

лей може призводити до деякого зниження їхньої міцності й в'язкості (наприклад, у сталі Р18Ф2), тобто робити їх менш міцними порівняно зі сталлю Р18.

За шліфованістю всі швидкорізальні сталі залежно від вмісту ванадію можна розділити на 4 групи.

Група 1. Вміст ванадію – до 1,4% і відносна шліфованість – 1,0. До цієї групи входить сталь Р18.

Примітка. При оцінці швидкорізальної сталі за критерієм «оброблюваність при шліфуванні» за одиницю взята шліфованість сталі Р18 як така, що має найкращу шліфованість.

Група 2. Вміст ванадію – 1,7–2,2% і відносна шліфованість 0,5–0,95. До цієї групи входять сталі Р6М5, Р6М5К5, Р2АМ9К5 та ін.

Група 3. Вміст ванадію – 2,3–3,3% і відносна шліфованість 0,3–0,5. До цієї групи входять сталі 11РЗАМЗФ2, Р6М5Ф3, Р12Ф3, Р9М4К8 та ін.

Група 4. Вміст ванадію – більше 4% і відносна шліфованість 0,2–0,3. До цієї групи входять сталі Р12Ф4К5, Р14Ф4, Р9Ф5 та ін.

Сталі зі зниженою шліфованістю схильні до пригарів, тобто до зміни структури приповерхневих куль сталі після шліфування або заточування, появи вторинного загартування або зон вторинного відпалу зі зниженою твердістю.

Наслідком пригарів може бути значне зниження стійкості інструменту.

Однак проблема «шліфованості» високованадієвих швидкорізальних сталей може бути успішно вирішена застосуванням при заточуванні і доведенні різальних інструментів абразивних кіл із зернами з НТМ на основі кубічного нітриду бору (КНБ).

Ванадієві швидкорізальні сталі знаходять застосування для інструментів нескладних форм в умовах чистового і напівчистового різання матеріалів, які мають підвищені абразивні властивості.

На противагу вольфраму, ванадію, молібдену і хрому кобальт у сталі карбідів не утворює. Однак кобальт – елемент,

який значно збільшує твердість і теплостійкість, що пояснюється утворенням у її структурі інтерметалідів у дисперсному стані. **Кобальтові сталі** є одними з найбільш теплостійких швидкорізальних сталей. Надто коштовною властивістю кобальту є його підвищена теплопровідність, що, як правило, супроводжується значно меншим (за інших однакових умов) рівнем температури різання. Шліфованість кобальтових сталей краща, ніж ванадієвих. До недоліків кобальтових сталей потрібно віднести знижену, порівняно з ванадієвими сталями, механічну міцність і підвищену крихкість (див. табл. 2.1). Наявність кобальту також дещо збільшує карбідно-інтерметалідну неоднорідність. Крім того, кобальтова сталь схильна до знеуглецювання (див. табл. 2.4) і є однією з найбільш дорогих: її вартість приблизно вдвічі перевищує вартість сталі P18. Однак унаслідок високих теплостійкості й зносостійкості вартість обробки інструментами з кобальтових сталей нижча, ніж при використанні багатьох інших швидкорізальних сталей. Як правило, **кобальтові швидкорізальні сталі** використовуються для обробки жароміцних і нержавіючих сталей і сплавів, а також конструкційних сталей підвищеної міцності. Період стійкості інструментів із таких сталей у 3-5 разів вищий, ніж зі сталей P18 і P6M5. Серед кобальтових швидкорізальних сталей найбільше застосування одержала марка P6M5K5 завдяки сприятливому сполученню високих різальних властивостей (див. табл. 2.4) зі зниженим вмістом вольфраму.

2.4. Основні тенденції вдосконалювання інструментальних сталей

Необхідно зазначити, що за останні кілька десятиліть істотних змін у сортаменті марок нелегованих і леггованих інструментальних сталей практично не відбулось, однак спостерігається стійка тенденція зниження їхньої частки в загальному обсязі використовуваних інструментальних матеріалів.

Для швидкорізальної сталі, на відміну від нелегованої і леггованої інструментальних сталей, в останні 15–20 років спостерігається значна зміна марочного складу, що пов'язано як з розширенням номенклатури оброблюваних матеріалів і підвищен-

ням вимог до інструментів, так і з удосконаленням технологій виробництва сталей та їх термічної обробки.

Основні зміни в номенклатурі швидкорізальних сталей можна звести до таких:

- збільшення випуску (до 10–20% від загального обсягу) швидкорізальних сталей підвищеної продуктивності;
- заміна вольфрамових сталей новими комплексно легованими вольфрамомолібденованадієвими і вольфрамомолібденованадієкобальтовими сталями (сталями високої теплостійкості);
- створення і використання «надшвидкорізальних» сталей високої вторинної твердості (68–70 HRC) і теплостійкості (640–650 °С), а також сталей з інтерметалідним зміцненням і теплостійкістю 680–700 °С;
- розроблення найбільш раціональних складів швидкорізальних сталей, призначених для виробництва методами порошкової металургії (порошкових швидкорізальних сталей);
- розроблення нових економно легованих швидкорізальних сталей.

2.4.1. Швидкорізальні сталі підвищеної продуктивності

Останніми роками проводяться роботи для поліпшення різальних властивостей сталей нормальної продуктивності. Одним з напрямків є підвищення вмісту вуглецю з 0,8 до 1,0% у сталях типу Р6М5 і Р8М3. Розроблені марки сталей 10Р6М5 та 10Р8М3 вигідно вирізняються більш широким інтервалом гартівних температур (1160–1220 °С), що дозволяє цілеспрямовано змінювати властивості сталі при термообробці. Ці швидкорізальні сталі мають на 20–30% зносостійкість більшу, ніж у сталі Р6М5 та Р18, і дають можливість «різати» загартовані сталі твердістю до HRC 30. Наприклад, кінцеві фрези зі сталі 10Р6М5 мають стійкість при обробці конструкційних сталей на 50% вищу, ніж фрези зі сталі Р6М5. Стійкість протяжок зі сталі 10Р8М3 на 30% вища, ніж зі сталі Р18. Перспективним напрямком поліпшення різальних властивостей швидкорізальних сталей нормальної продуктивності є їхнє додаткове легування цирконієм, азотом,

ванадієм, кремнієм та іншими елементами. Наприклад, для виготовлення свердел, зенкерів, розгорток, фрез, мітчиків застосовується сталь Р6М5Ц, легована цирконієм. Успішно застосовуються розгортки при обробці широкої номенклатури матеріалів від жароміцних і титанових сплавів до вуглецевих сталей і неметалевих матеріалів, виготовлені зі сталі Р3М3Ф3Б2 (ЕП785Б), легованої ванадієм і ніобієм. Сталь Р6М5Ф3 використовується для виготовлення протяжок на багатьох автозаводах. Стійкість цих протяжок на 30% вища, ніж зі сталі Р18. Проходять промислові випробування сталь Р6М5Ф2С, легована кремнієм, і сталі АР6М5 та А11Р3М3Ф2, леговані азотом.

2.4.2. Швидкорізальні сталі високої теплостійкості

Сталі високої теплостійкості характеризуються зниженим вмістом вуглецю (до 0,3%), але досить більшою кількістю легуючих елементів – В11М7К23, В14М7К25, 3В20К20Х4Ф (табл. 2.3). На відміну від зміцнення карбідами, що характерно для швидкорізальних сталей, зміцнення цих сталей реалізується при дисперсійному твердінні інтерметалідами типу $(\text{Fe}, \text{Co})_{7 \times} (\text{W}, \text{Mo})_6$. Їхні високі теплостійкість і зносостійкість визначаються підвищенням рівня температур, які приводять до фазових перетворень, і великою опірністю коагуляції інтерметалідної фази. Вони мають твердість 69–70 HRC і теплостійкість 700–720 °С. Найбільш раціональна сфера їхнього використання – різання важкооброблюваних матеріалів і титанових сплавів. В останньому випадку період стійкості інструментів зі сталей високої теплостійкості залежно від оброблюваного матеріалу та умов обробки може бути в 60 разів вищим, ніж зі сталі Р18, і в 8–15 разів вищим завдяки своїй значно більшій міцності (до 2500 МПа), ніж із твердого сплаву ВК8 (див. табл. 2.1).

Значними недоліками цих сталей є їх менша, порівняно із традиційно застосовуваними швидкорізальними сталями, міцність при вигині й відносно погана оброблюваність у відпаленому стані при виготовленні інструменту. Разом з тим, зважаючи на те, що ці сталі містять відносно невелику кількість ванадію

(див. табл. 2.3), вони краще обробляються шліфуванням у загартованому стані, що дозволяє ефективно їх застосовувати в тих випадках, коли визначальне значення має критерій «оброблюваність при шліфуванні», наприклад, під час виготовлення різьоруючих інструментів.

2.4.3. Швидкорізальні оцадливо леговані сталі

У зв'язку з усе більше зростаючою дефіцитністю вольфраму та молібдену – основних легуючих елементів, які використовуються під час виробництва традиційних швидкорізальних сталей, – усе ширше застосування знаходять оцадливо леговані марки. Серед сталей цього типу найбільше застосовується під час виробництва різального інструменту сталь 11P3AM3Ф2, тому що вона має досить високі показники за твердістю (HRC 63–64), міцністю ($\sigma_b=3400$ МПа) і теплостійкістю (до 620 °С).

Сталь 11P3AM3Ф2 досить технологічна в металургійному виробництві, однак через гіршу шліфованість її застосування обмежене, як правило, інструментами простої форми, які не потребують великих обсягів абразивної обробки (пилки по металу, різці тощо).

Поряд зі сталлю 11P3AM3Ф2 за різальними властивостями ближче всіх до сталі P6M5 стоять малолегована вольфрамом сталь P2M5 та безвольфрамова сталь 11M5Ф (1,06% С; 5,5% Мо; 4,0% Cr; 1,5% V). Остання належить до нового класу заевтектоїдних швидкорізальних сталей на відміну від традиційних – ледебуритних. Нагрів під загартування дозволяє розчинити всі карбіди Me_6C , що неможливо для ледебуритних сталей, унаслідок чого забезпечуються легованість і властивості сталі в загартованому стані приблизно на рівні відповідних показників сталі P6M5.

2.4.4. Порошкові швидкорізальні сталі

Найбільш ефективні можливості підвищення якості швидкорізальної сталі, її експлуатаційних властивостей і створення нових різальних матеріалів з'явилися при використанні порошкової металургії.

Порошкова швидкорізальна сталь характеризується однорідною дрібнозернистою структурою, рівномірним розподілом карбідної фази, зниженою реформованістю в процесі термічної обробки, хорошою шліфованістю, більш високими технологічними і механічними властивостями, ніж сталь аналогічних марок, отриманих за традиційною технологією. Порошкові швидкорізальні сталі мають найменший бал карбідної неоднорідності, що є одним з головних їхніх переваг під час виготовлення великорозмірного різального інструмента, наприклад, спіральних свердел, які одержані при традиційно застосовуваному технологічному процесі методом вишліфовування стружковідвідних канавок.

Технологічна схема одержання порошкових швидкорізальних сталей така:

- водяне або газове розпилення рідкого струменя швидкорізальної сталі в порошок;
- засипання і дегазація порошка в циліндричний контейнер;
- нагрівання і кування (або прокатка) контейнерів у прутки;
- остаточне обдирання (точіння) залишків контейнера з поверхні прутків.

Примітка. Виготовлення інструмента з водорозпиленних порошоків дешевше, однак якість металу нижча через велику окисленість порошкових часток. Тому для високоякісного металу використовується порошок, отриманий розпиленням азотом.

Основною перевагою порошкової технології є різке зменшення розмірів карбідів, що утворюються під час кристалізації злитка у виливниці. Таким чином, «порошинка», що отримана газовим розпиленням, і є тим мікрозлитком, у якому не утворюються великі карбіди.

Промислове виробництво порошкових швидкорізальних сталей на початку 80-х років минулого століття було спрямоване, як правило, на виготовлення марок, які є за складом аналогом швидкорізальних сталей, що одержуються за традиційною технологією. Разом з тим нова технологія дозволяє істотно змінити

схему легування інструментальної сталі з метою спрямованого підвищення тих або інших експлуатаційних характеристик, що визначають стійкість інструмента.

Основні приклади розроблення нових складів порошкової швидкорізальної сталі зводяться до можливості:

- уведення до складу до 5–7% (за масою) ванадію і значного у зв'язку із цим збільшення об'ємної частки (до 15%) карбідів у сталі і, відповідно, підвищення зносостійкості без погіршення шліфваності;

- підвищення вмісту вуглецю порівнянно зі стандартним вмістом вуглецю у швидкорізальних сталях, тобто введення вуглецю з «пересиченням» (до 1,7%), що дозволяє одержати значну кількість карбідів ванадію і високу вторинну твердість після загартування з відпалом;

- заміни частини вуглецю азотом, який уводять шляхом азотування порошку безпосередньо перед операцією «компактування», тобто перед засипанням порошку в циліндричний контейнер.

Завдяки використанню нової технології одержання швидкорізальної сталі був розроблений цілий ряд марок, які дозволили істотно вдосконалювати технологічні процеси в інструментальному виробництві й підвищити працездатність різальних інструментів. Нині в Україні відповідно до ГОСТ 28369–89 випускаються порошкові швидкорізальні сталі таких марок: Р7М2Ф6–МП, Р6М5Ф3–МП, Р9М2Ф5ДК6–МП, Р12МФ5–МП та ін. Порошкові швидкорізальні сталі, незалежно від вмісту ванадію, належать до груп інструментальних сталей з відносно доброю шліфваністю.

2.4.5. Карбідосталі

Технологія порошкової металургії також використовується для одержання карбідосталей, які за своїми властивостями можуть бути класифіковані як проміжні між швидкорізальними сталями і твердими сплавами. Карбідосталь відрізняється від звичайної швидкорізальної сталі високим вмістом карбідної фази (в основному карбідів титану), що досягається шляхом змішування порошку швидкорізальної сталі й дрібнодисперсних

частинок карбїду титану. Пластичним деформуванням спресованої порошкової сумїшї одержують заготовки необхідної форми. Вміст карбїдної фази в карбїдосталї коливається від 30 до 70%, у тому числі вміст Ti, наприклад, у карбїдосталї P6M5 – KT20 становить 20%. У відпаленому стані її твердість становить HRC 40–44, а після загартування і відпалу – HRC 68–70. Теплостійкість карбїдосталей становить 650–690°C, а міцність при вигинанні $\sigma_B=1500–2000$ МПа.

При використанні як матеріалу для рїзального інструменту карбїдосталь забезпечує підвищення стійкості не менш ніж у 1,5–2 рази не лише порівнянц з аналогічними марками, які одержують за звичайною технологією виробництва, а й порошковими сталями. Наприклад, виробничі випробування показали, що при точінні сталі 45, жароміцної сталі EI–787 і жароміцного сплаву ЖС6КП стійкість рїзцїв з карбїдосталї P6M5–KT20 вища порівняно зі стійкістю рїзцїв з порошкової сталі P6M5K5 відповідно в 1,5–2, 1,5 та 2,5 рази. Найбільш ефективно застосування карбїдосталей при обробці важкооброблюваних матеріалів, зокрема, жароміцних і високоміцних сталей і сплавів.

До недоліків карбїдосталей можна віднести відносно низьку пластичність при високих температурах і гіршу, порівняно зі звичайними порошковими сталями, шліфованість. Питома продуктивність шліфування інструмента з карбїдосталї приблизно в 5–7 разів нижча, ніж інструмента зі звичайної порошкової сталі. Внаслідок цього карбїдосталі доцільно використовувати тільки при виготовленні профілів, форма і розміри яких близькі до готового інструменту, або у вигляді пластин для рїзального інструменту збірної конструкції. У ряді випадків карбїдосталь є повноцінним замінником твердих сплавів, особливо при виготовленні інструментів із формотворними кромками, наприклад, рїзально-деформуючих протяжок.

2.5. Одержання інструментальних сталей методом СВ-синтезу

2.5.1. Сутність процесу самопоширюваного високотемпературного синтезу

Самопоширюваний високотемпературний синтез (СВС) – це різновид горіння. Явище СВС було вперше виявлене у 1967 р. радянськими вченими А. Г. Мержановим, І. П. Боровинською і В. М. Шкіро під час вивчення горіння спресованих циліндричних зразків, які складаються із суміші порошоків титану та бору. Якщо зразок підпалити, наприклад, розпеченою вольфрамовою ниткою, то по суміші почне поширюватися хвиля горіння. Інтерес полягає в тому, що у цьому процесі полум'я відсутнє, тобто немає газоподібних продуктів згорання. Хвиля горіння поширюється за декілька секунд на відміну від пічних методів плавки високоякісних тугоплавких сполук, на які потрібні години. Крім того, для процесу СВС не потрібне складне, дороге обладнання. Температура горіння при проведенні СВС процесу 1500–4000 °С, а також висока швидкість горіння 0,5–15 см/с.

Звичайно синтез тугоплавких сполук проводять у спеціальних печах при температурах 1000–1500 °С. Для таких процесів ці температури все-таки низькі і, незважаючи на тривалу багатогодинну витримку, дуже важко доводити реакції до кінця, у зв'язку з чим одержані сполуки завжди забруднені вихідними речовинами і проміжними продуктами. Крім того, продуктивність печі невелика, а витрати електроенергії величезні.

Саме тому почали шукати нові способи одержання тугоплавких сполук. Були використані: газофазне осадження, синтез у низькотемпературній плазмі, в ударній хвилі. Однак найбільш простим і ефективним став новий метод, який базується на закономірностях горіння конденсованих систем. Цей метод одержав назву «самопоширюваний високотемпературний синтез» (див. додаток Г). Наведені вище переваги роблять процес СВС найбільш застосовним для спікання кераміки, кермету, твердих сплавів, покриттів тощо.

Суть СВС полягає в такому: в тонкому приповерхневому шарі ініціюється екзотермічна реакція, внаслідок якої виділяється тепло, що завдяки теплопередачі прогріває сусідні шари і збуджує в них реакцію. В результаті утворюється фронт реакції (фронт горіння), що мимовільно поширюється по речовині (шихті) з великою швидкістю, розігріваючи суміш і переводячи вихідні реагенти в продукти горіння (синтезовані матеріали). Переваги СВС очевидні: відсутність витрат на електроенергію для нагрівання шихти до високих температур, оскільки працює тепло, що виділяється в процесі самої реакції.

До сім'ї продуктів, одержання яких СВ-синтезом доцільне як з погляду їхнього технічного рівня, так і з економічних міркувань, можна віднести насамперед дисперсні порошкові матеріали. Розвиток інтегральних технологій СВС вимагає, крім того, проведення робіт зі створення спеціалізованого технологічного обладнання, яке у найбільшій мірі відповідає концепції універсальності.

У СВ-синтезі спотерігається існування двох видів механізму взаємодії, які обумовлені типом діаграми стану, утвореного компонентами реакційної системи, розчинністю компонентів у твердій і рідкій фазах, а також співвідношенням потоків кінетичного (розтікання) і хімічного (фазоутворення) транспортування речовини в реакційній зоні. При хімічній взаємодії поверхні тугоплавкого компонента з легкоплавким відбувається специфічне тепловідведення від поверхні частки в зону із рухомою межею плавлення. Залежно від кінетичних та теплових параметрів отримані якісно різні режими розігріву: режим з максимумом, автоколивальний розігрів і режим монотонного зростання температури.

2.5.2. Одержання монолітної структури металу методом СВС

У процесі досліджень стало зрозуміло, що синтез хімічних сполук є найпростішим із завдань, які розв'язуються методом СВС. Також виявилось, що метод дозволяє безпосередньо одержувати багато необхідних продуктів із заданою структу-

рою. Виявилося, що основні параметри продуктів (співвідношення і відносні положення фазових складових, розмір кристалічних зерен, розподіл домішок, пористість і т.д.) можуть змінюватися в дуже широких межах при варіюванні умов проведення процесу. Метод СВС дозволяє одержувати найрізноманітніші продукти (порошки, спечену кераміку, пористі та литі вироби, полікристалічні литі матеріали, плівки, волокна, композити тощо). Вже зараз на пілотних і промислових установках цим методом виготовляють велику кількість перспективних і важливих матеріалів, включаючи абразиви і тверді сплави, технічну кераміку, нітридні феросплави, матеріали з ефектом пам'яті форми, вогнетриви, каталізatori, електротехнічні та електронні матеріали, тощо.

Завдяки високим температурам і швидкостям процесів, що проходять, у хвилях горіння проявляються ефекти самоочищення, самовідпалу і самозагартування одержуваних продуктів, унаслідок чого СВС-матеріали (навіть при однаковому хімічному складі) можуть значно перевершувати за якістю аналогічні матеріали, які одержують традиційними й іншими загальновідомими методами.

СВС – порошки мають більш високу чистоту (виходячи з наявності компонентів, що не прореагували, та інших домішок) і більш однорідний розподіл кристалічних зерен за розмірами. Вони можуть бути отримані у вигляді агломератів або монокристалів, причому монокристалічні порошки можуть мати дуже високу дисперсність (їхня питома поверхня становить близько 10–20 м²/г), що робить їх досить перспективним матеріалом для подальшого спікання. Порошки-агломерати також мають багато спеціальних застосувань, одним з разючих прикладів чого може служити їх використання в абразивних пастах.

Структурна міцність СВС – матеріалів (тобто міцність, обумовлена заданою структурою) вища, ніж у аналогів, які одержані звичайними методами, що пояснюється меншим вмістом домішок, що звичайно концентруються уздовж межі зерен і послаблюють зчеплення між зернами кристалічної структури.

Структурна міцність на вигин СВС – сплавів на 200–400 МПа вища, ніж у звичайних.

Використання методу СВС для одержання продукції високої якості вимагає подальших досліджень у сфері макрокінетики процесів горіння, тому що, подібно до інших науково-технічних завдань, метод простий у використанні, але складний для вивчення. Труднощі полягають у необхідності правильного вибору шихти, яка у процесі реакції повинна виділяти тепло, що, однак, обмежує вибір реагентів.

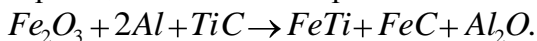
2.5.3. СВ-синтез інструментальної сталі з оксиду заліза, алюмінію і карбіду титану

Як уже було сказано, карбідосталі займають проміжне місце між швидкорізальними сталями і твердими сплавами. У більшості ці сталі, які розроблені на основі карбіду титану та інструментальних сталей і технологія їхнього одержанняг. добре відомі. Проте професором АлтДТУ Євтушенко О.Т. розроблені способи одержання карбідосталі з відходів ковальського виробництва (окалини) на основі заліза і карбіду титану. Карбід титану є сполукою, сукупність фізико-хімічних характеристик якого робить його унікальним зміцнювачем тих сплавів, що за своїми властивостями належать до інструментальних сталей.

Карбідосталі поєднують твердість і зносостійкість із хорошими механічними властивостями, які дають можливість проводити їхню термічну обробку для одержання необхідних властивостей.

У лабораторних умовах був проведений експеримент щодо одержання інструментальної сталі методом СВС у шихті суміші з порошків окалини Fe_2O_3 , алюмінію Al і карбіду титану TiC.

Хімічна реакція визначається рівнянням



Тривалість процесу одержання такого легованого сплаву в режимі термосинтезу (рис. 2.8) становить залежно від маси шихти 20–120 с.

Експериментально встановлено, що оптимальною кількістю залізної окалини Fe_2O_3 є 74–76 мас. % термітної суміші (терміту), тому що саме при такій кількості відбувається повне розплавлення окалини. У цьому випадку реакція йде бурхливо, з достатньою температурою і кількістю тепла для того, щоб вступив у реакцію карбід титану.

Оптимальною кількістю карбіду титану у термітній суміші є 15–20 мас. %. При такій кількості TiC підвищується швидкість і температура горіння, збільшується кількість тепла, виходить компактний металевий злиток феротитану і карбіду заліза із твердістю до 55 HRC. При меншому вмісті TiC реакція проходить без потрібного збільшення температури, швидкості горіння і кількості тепла, а при більш високому вмісті карбіду титану реакції горіння взагалі не відбувається.

Застосування високоінформативних засобів діагностики дає дослідникам можливість переведення некерованих або слабкерованих термохімічних реакцій до розряду керованих.

Для проведення експерименту вихідна шихта (суміш Fe_2O_3 , Al і TiC) засипалась або у сталеве оснащення, що має прямокутний отвір для установки в ньому тримачів кварцевого скла, через яке реєструється температура за яскравістю світіння



Рисунок 2.8 – Самопоширюваний високотемпературний синтез інтерметаліду

поверхні шихти, або вихідну шихту розміщують у кварцеву склянку.

За результатами експериментів (табл. 2.5) і характером розміщення точок побудовані залежності твердості сплаву (HRC) і швидкості поширення фронту горіння (у м/с) від кількісного вмісту карбіду титану (у мас. %) у шихті (рис. 2.8).

Таблиця 2.5 – Значення твердості сплаву, швидкості поширення і максимальної температури фронту горіння для кількісного вмісту карбиду титану в шихті

X (мас., %)	Y (HRC)	V (м/с)	T °C
0	10	0,15	1580
5	15	0,12	1290
10	48	0,11	1265
20	60	0,07	1170

Примітка. Злитки, які одержували, мали невелику пористість, тому для виготовлення високоякісного металообробного інструменту необхідна їх подальша обробка.

Зі збільшенням вмісту карбиду титану в шихті (рис. 2.9) твердість сплаву збільшується, а швидкість фронту горіння зменшується за нелінійним законом, причому зміна характеристик відбувається практично при тому самому значенні маси карбиду титану в шихті (8–10 мас, % терміту). Підвищення твердості сплаву, очевидно, пов'язане з підвищенням концентрації вуглецю до еквіатомного рівня.

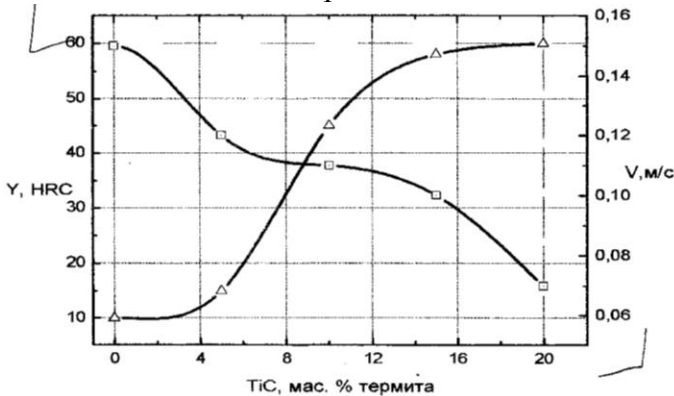


Рисунок 2.9 – Залежність твердості сплаву сталі Y(Δ) і швидкості фронту горіння V(□) від маси карбиду титану

З отриманих термограм (рис. 2.10) бачимо, що температура в процесі взаємодії має явно нестационарний характер, періоди зростання змінюються періодами стабілізації і навіть зниженням, тому що реакційна комірка зазначає ряд перетворень.

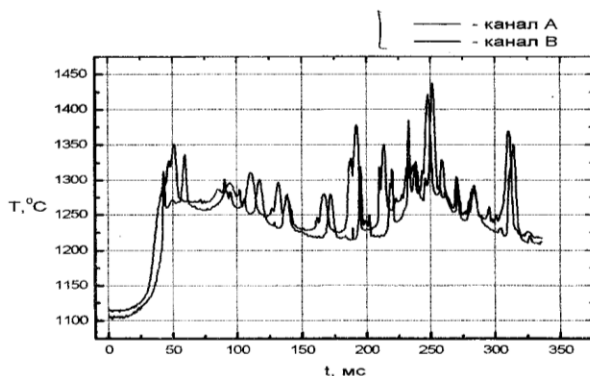


Рисунок 2.10 – Термограми реакції СВ-синтезу інструментальної сталі у двох точках (відстань між каналами на поверхні шихти – 0,015 м)

Екзотермічні ділянки змінюють ділянки з ендотермічним розпадом.

Максимальна температура слабо залежить від початкової температури і складу терміту. СВС – інструментальна сталь на основі карбіду титану має одночасно властивості хімічної сполуки і твердого розчину, які визначаються режимами горіння, характером та енергією зв'язку, а також особливостями кристалічної гартки і структури, причому тверді розчини можуть бути як розчинами впровадження, так і розчинами заміщення.

Уведення легуючих елементів впливає на міцність, твердість, пластичність, жаростійкість і зносостійкість інструментальних сталей. Виявлено, що всі легуючі елементи або розчиняються в залізі, утворюючи інтерметаліди, або вигорають, бо оскільки температура їхнього плавлення значно менша за температуру фронту горіння.

TiC- карбід титану у СВС – процесі розпадається на Ti й активний вуглець, що у сполученні із залізом утворює сталь, причому вміст вуглецю в сталі пропорційний кількості TiC (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Залежність вмісту вуглецю від кількості терміту

TiC, % терміту*	5	10	15	20
C,%	0,3	0,5	0,6	0,7

Термітна суміш (терміг) – Fe₂O₃ (80 %) – Al (20 %).

Таблиця 2.7 – Твердість (HRC) СВС- сплаву системи Fe₂O₃ – Al –Ti* залежно від температури відпалу

TiC Мас., % терміту	Режим термічної обробки T ^o C		
	Загартування**	Відпал до 550*	Відпал до 750*
10	48	10	—
15	56	25	12
20	60	36	14

Примітки:* - Оксид заліза Fe₂O₃-80 мас. % і алюміній Al-20 мас. % утворюють термітну суміш (терміт).

** - Загартування виконувалося відразу після закінчення СВС - процесу.

Таблиця 2.8 – Вміст вуглецю і титану (%) у СВС – сплаві Fe₂O₃ – Al –Ti-15 мас. % терміту залежно від режиму охолодження

Режим охолодження	На повітрі	У воді
C	1,65	1,42
Ti	0,38	0,28

2.6. Короткі рекомендації щодо вибору інструментальних сталей

Вибір інструментальних сталей для конкретних умов різання визначається великою кількістю факторів. Цей вибір не є однозначним, тому що кожна група (підгрупа) сталей представлена декількома марками. Визначальною умовою є вид обробки, властивості оброблюваного матеріалу і режими різання, а для деяких видів інструментів – і технологічні особливості сталі. Основні фізико – механічні й технологічні властивості, а також сфери застосування найпоширеніших інструментальних сталей подані в табл. 2.1.

Інструменти з нелегованих інструментальних сталей мають достатню твердість після загартування (60–62 HRC), але теплостійкість їх невелика, тому що при порівняно невисоких температурах (200–250 °C) їхня твердість різко зменшується до критичних значень. Тому інструментальні нелеговані сталі застосовуються, головним чином, для ручної обробки зі швидкос-

тями не більше 5–10 м/хв, тобто для ручних різальних та ударних інструментів, які працюють в умовах, що не викликають розігріву різальної кромки або робочої частини до температур вище 190–220 °С: зубила, стамески, пилки, ножівкові полотна, малорозмірний різальний інструмент, мігчики ручні, розвертки малорозмірні, рашпілі, надфілі, пилки для обробки деревини, напилки, шабери тощо.

Вуглецеві сталі – хороший матеріал для інструментів, призначених для чистових робіт, тому що дозволяють одержати завдяки високій міцності дуже тонке лезо інструмента (малі β) і чисту поверхню оброблюваного виробу. Цьому сприяє і висока гострота різальних кромки в інструментів, виготовлених з інструментальних нелегованих сталей ($\rho = 2\text{--}5$ мкм).

Різальні властивості легованих інструментальних сталей приблизно такі самі, які мають інструментальні нелеговані сталі. Тому для підвищення режимів різання немає рації застосовувати більш дорогі леговані інструментальні сталі замість вуглецевих. Разом з тим леговані інструментальні сталі мають краще застосування для інструментів, які не повинні деформуватися при загартовуванні (наприклад, сталь марки ХВГ – для «довгих» протяжок і розверток), для інструментів, які повинні глибоко прожарюватися (наприклад, сталь марки 11ХВ – для великорозмірних мігчиків і свердел), а також для інструментів, які повинні мати більш високу твердість і зносостійкість (наприклад, сталь марки 9ХС, яка зберігає різальні властивості при нагріванні до 250 °С, – для фрез, зенкерів та ін. різального інструменту).

У загальному випадку леговані інструментальні сталі мають більш високі технологічні властивості – кращі загартовуваність і прожарюваність, меншу схильність до жолоблення, і їхня теплостійкість дорівнює 250–350 °С. Тому вони використовуються як для виготовлення деяких видів ручних інструментів (наприклад, розверток), так і для інструментів, призначених для обробки на верстатах з відносно невисокими швидкостями різання (до 15–20 м/хв) і які мають підвищену зносостійкість в умовах, що не викликають розігріву різальної кромки або робо-

чої частини: свердла, мігчики, плашки, протяжки, розвертки та ін. Деякі марки легованих інструментальних сталей (Х6ВФ, Х12Ф1) можуть застосовуватися для виготовлення різальних інструментів, які повинні мати теплостійкість до 400 °С: ножі рубаночні і фуганкові, фрези та інший інструмент для обробки деревини і неметалічних матеріалів. Гострота різальних кромок – $\rho = 10\text{--}15$ мкм.

Широке використання швидкорізальних сталей для виготовлення багатьох інструментів, особливо складнопрофільних, визначається поєднанням високих значень твердості (до 70 HRC) і теплостійкості (до 700° С) при відносно високому рівні крихкої міцності й в'язкості, які значно перевищують відповідні значення для твердих сплавів (див. табл. 1.4). Крім того, швидкорізальні сталі мають досить високу технологічність, тому що досить добре обробляються тиском і різанням у відпаленому стані, і задовільною шліфваністю у загартованому. Швидкорізальні сталі дозволяють одержувати досить гострі різальні кромки ($\rho = 20\text{--}30$ мкм), що забезпечує використання інструментів із цих інструментальних матеріалів для процесів обробки, які характеризуються відносно невеликими товщинами зрізів ($a = 0,02\text{--}0,05$ мм), таких як розвертка, протяжка, шевер та ін.

Швидкорізальні сталі застосовуються для виготовлення практично всіх видів лезових різальних інструментів для обробки (чорнової, напівчистої і чистої) широкої номенклатури матеріалів (конструкційних сталей і сплавів, у т.ч. високоміцних, корозійностійких, нержавіючих; чавунів; кольорових металів і сплавів тощо) при швидкостях різання до 50–60 м/хв: фасонних різців, спіральних (гвинтових) свердел, зенкерів, розверток, протяжок, фрез (циліндричних, осьових, кінцевих, фасонних, черв'ячних, шліцевих тощо), різеутворювальних інструментів (мігчиків, плашок, гвинторізних головок), зуборізних довбачів, шеверів та ін.

Для обробки конструкційних матеріалів з міцністю менше 600–700 МПа (кольорові метали, наприклад, сплави на алюмінієвій основі; відпалені сталі; сірі чавуни та ін.) рекомендуються

швидкорізальні сталі нормальної продуктивності, наприклад сталь Р6М5.

Для обробки конструкційних матеріалів з підвищеною міцністю (більше 1000 МПа), а також важкооброблюваних матеріалів (нержавіючі й жароміцні сталі та сплави, титанові сплави, поліпшені сталі з підвищеною твердістю та ін.) рекомендуються швидкорізальні сталі підвищеної теплостійкості (продуктивності).

Застосування швидкорізальних сталей підвищеної теплостійкості рекомендують і для обробки стандартних конструкційних матеріалів у тих випадках, коли вимагається значне підвищення стійкості інструмента або продуктивності обробки (швидкості різання). У першому випадку використовують високованадієві сталі, у другому – кобальтові. У порівнянні зі сталями нормальної теплостійкості ванадієві й кобальтові сталі допускають більш високі швидкості різання, але через знижену міцність інструменти повинні працювати при менших перерізах зрізу. Менша теплопровідність ванадієвих сталей порівнянні з кобальтовими робить вигідним їхнє застосування при різанні з відносно невисокими швидкостями різання, при яких температура різання не перевищує 400 °С. У цьому випадку ванадієві сталі мають значно більшу зносостійкість, ніж сталь Р18. Навпаки, кобальтові сталі доцільно застосовувати при відносно високих швидкостях різання, коли висока теплопровідність зазначених сталей стає особливо корисною. При обробці мартенситних конструкційних сталей (наприклад, 34ХНЗМ, 20Х13, 40 Х13 та ін.) із сорбітною структурою продуктивність інструментів з кобальтових сталей не набагато вища, ніж із ванадієвих. При різанні ж аустенітних сталей (наприклад, 12Х18Н10Т, 37Х12Н8М8МФБ та ін.) і сплавів, що мають низьку теплопровідність (наприклад, на нікелевій і титановій основах), висока теплопровідність кобальтових сталей має вирішальне значення, і за продуктивністю ці сталі значно перевершують ванадієві.

Вплив роду інструментальної сталі на швидкість різання кількісно враховують поправок швидкісним коефіцієнтом K_{Vn} , середні значення якого для інструментальних сталей при оброб-

ці конструкційних вуглецевих сталей і чавунів наведені в табл. 2.9.

Таблиця 2.9 — Значення поправок швидкісних коефіцієнтів залежно від марки інструментальної сталі

Марка сталі	B12A	9XC	P18	P6M5	P9F5	P9K5	P12F3
Коефіцієнт K_{VH}	0,5	0,6	1,0	1,0	1,08	1,1	1,15

Класифікація швидкорізальних сталей за властивостями і службовим призначенням подана на рис. 2.11. При виборі марки швидкорізальної сталі варто мати на увазі, що в межах кожної групи більшу міцність мають сталі, леговані молібденом, а більш високу теплостійкість — вольфрамом. Наприклад, при використанні кобальтових сталей для роботи в умовах ударних навантажень рекомендується сталь типу P6M5K5, тому що вона має найбільшу міцність серед кобальтових сталей. У тих випадках, коли від інструмента потрібна висока зносостійкість й експлуатаційна надійність (наприклад, для інструмента, що працює в умовах автоматизованого виробництва), найбільш доцільно для його виготовлення застосовувати сталі з підвищеним вмістом ванадію, у тому числі леговані кобальтом.

Серед технологічних властивостей, що впливають на вибір марки швидкорізальної сталі, варто виділити зносостійкість і шліфуємість. Оброблюваність швидкорізальних сталей при шліфуванні (див. розд.2.3) — одна з найважливіших властивостей, що визначає не лише різальні можливості інструменту, а й ефективність його роботи та експлуатації. «Оброблюваність при шліфуванні» у ряді випадків може виявитися вирішальним фактором під час вибору марки сталі для певних видів інструментів, наприклад різецьовувальних, для виготовлення яких рекомендується використовувати швидкорізальні сталі з вмістом ванадію не більше 1,3%, наприклад P18, тобто сталі першої групи (група 1) шліфованості (див. розд. 2.3).

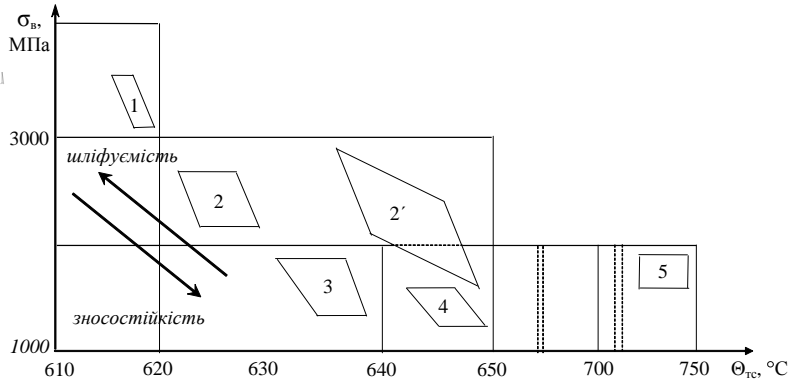


Рисунок 2.11 – Класифікація швидкорізальних сталей по властивостях – межі міцності на вигин $\sigma_{\text{в}}$ й теплостійкості $\Theta_{\text{тс}}$ – і службовому призначенню:

- 1 – область застосування інструмента для обробки конструкційних матеріалів з $\sigma_{\text{в}} < 900$ МПа (Р6М5, Р12, Р18);
- 2 – обробка конструкційних сталей на підвищених швидкостях різання, чистова і напівчистова обробка нержавіючих і жароміцних сталей і сплавів ((Р6М5Ф3, Р12Ф3, Р14Ф4, Р2М9Ф3К3, Р6М5К5, 10Р6М5К5);
- 3 – обробка матеріалів із твердістю HRC < 45–50, що не іржавіють, і жароміцних сталей і сплавів, конструкційних сталей на підвищених швидкостях різання (Р7М4Ф2К8, Р9М4К8, Р12М3Ф2К8, Р8М3К6С);
- 4 – чистова і напівчистова обробка високоміцних, нержавіючих та інших спеціальних сталей і сплавів (Р12Ф4К5, Р10Ф5К5, Р12Ф4М3К10, Р12М2Ф4К10); 5 – чистова обробка спеціальних сталей і сплавів (В11М7К23, 3В20К20Х4Ф, В14М7К25); 2 – порошкові швидкорізальні сталі і карбідосталі

Питання для самоперевірки

- 1 Охарактеризуйте особливості кристалічної будови інструментальних сталей і вплив вуглецю на їх основні (різальні) властивості.
- 2 Охарактеризуйте вплив легуючих елементів на властивості інструментальних сталей.

- 3 Наведіть марки, хімічний склад та основні (різальні) властивості нелегованих (вуглецевих) інструментальних сталей.
- 4 Охарактеризуйте сфери застосування нелегованих (вуглецевих) інструментальних сталей.
- 5 Охарактеризуйте критерії оцінки карбідної неоднорідності легованих інструментальних сталей.
- 6 Наведіть марки, хімічний склад та основні (різальні) властивості найбільш застосовуваних легованих інструментальних сталей.
- 7 Охарактеризуйте сфери застосування легованих інструментальних сталей
- 8 Охарактеризуйте відмігні риси, у тому числі термообробки, швидкорізальних сталей, що забезпечують їхню підвищену твердість, теплостійкість (червоностійкість) і зносостійкість.
- 9 Наведіть марки, хімічний склад, основні (різальні) властивості та сфери застосування швидкорізальних сталей нормальної продуктивності.
- 10 Наведіть марки, хімічний склад, основні (різальні) властивості та сфери застосування швидкорізальних сталей підвищеної продуктивності (теплостійкості).
- 11 Охарактеризуйте основні тенденції вдосконалення швидкорізальних сталей підвищеної продуктивності.
- 12 Наведіть марки, хімічний склад, основні (різальні) властивості та сфери застосування швидкорізальних сталей високої теплостійкості.
- 13 Наведіть марки, хімічний склад, основні (різальні) властивості та сфери застосування ошадливо легованих швидкорізальних сталей.
- 14 Наведіть марки, хімічний склад, основні (різальні) властивості та сфери застосування порошкових швидкорізальних сталей.
- 15 Наведіть марки, хімічний склад, основні (різальні) властивості та сфери застосування карбідосталей.

- 16 Наведіть і охарактеризуйте графічну інтерпретацію класифікації швидкорзвальних сталей за їх властивостями і службовим призначенням.
- 17 Охарактеризуйте сутність процесу СВС-технології.
- 18 Чим обумовлюється підвищена структурна міцність СВС-матеріалів стосовно сталі, отриманої традиційною плавкою.
- 19 Наведіть склад шихти при СВ-синтезі інструментальної сталі (карбідосталі) з оксиду заліза (окаліни) і рівняння хімічної реакції.
- 20 Дайте графічну інтерпретацію залежності твердості карбідосталі від швидкості реакції і процентного вмісту TiC у шихті при СВ-синтезі.
- 21 Дайте пояснення одержання сталі при додаванні в термітну суміш карбиду титану в процесі СВ-синтеза.

Слова та скорочення в розділі 2

Гетерогенний, гетерогенна система – макроскопічно неоднорідна система, що складається з різних за своїми властивостями частин, розмежованих поверхнями розділу.

Імпрегнування (від лат. *impraegnare* – наповнювати) – просочування тканини (вовняної, бавовняної та ін.), деревини та ін. спеціальними розчинами або емульсіями.

Інварний (інвар – від латинського *invariabilis* – незмінний) – магнітний сплав Fe (основа) з Ni (36 %), що має малий температурний коефіцієнт лінійного розширення.

Коалесценція (від лат. *coalesce* – зростаюся, з'єднуюся) – злиття крапель рідини або пухирців газу при їхньому зіткненні. Відбувається під час випадання атмосферних опадів у вигляді дощу й роси, руйнування пін і емульсій, нанесення лакофарбових покриттів методом розпилення.

Компактування при СВС – поєднання процесу горіння із пресуванням гарячих продуктів синтезу.

Конденсований продукт (конденсація) – перехід речовини з газоподібного стану в рідкий або твердий.

Макрокінетика (що приводить у рух) – розділ механіки, що поєднує статику і динаміку.

Релаксація (від лат. *relaxatio* – ослаблення) – процес установаження термодинамічної рівноваги (повного або часткового) у фізичній системі, що складається з великої кількості частинок.

СВС – високотемпературний синтез, що самопоширюється.

Стехіометрія (першооснова) – учення про кількісні співвідношення між масами речовин, що вступають у хімічну реакцію. Містить правила складання хімічних формул і рівнянь. Ґрунтується на законах Авогадро, Гей-Люссака, кратних відносин, збереження маси еквівалентів.

СТІМ – синтетичний твердий інструментальний матеріал.

Фронт горіння – «тверде горіння» – тобто горіння не за принципом окислювання речовини киснем, а за принципом синтезу – хімічної реакції з виділенням великої кількості тепла – горіння без полум'я.

Шихта – суміш матеріалів у певній пропорції (рудні концентрати, флюси та ін.) для переробки в металургійних печах, а також суміш металевих і абразивних порошоків у порошковій металургії та процесам СВС.

Екзотермічна реакція (суміш) – реакція термічна (наприклад, горіння), при якій з реагуючої системи в навколишнє середовище виділяється теплота.

Екструзія (від пізньолатинського *extrusion* – виштовхування) полімерів – спосіб виготовлення профільованих виробів великої довжини із пластмас і гум. Полягає в безперервному видавлюванні розм'якшеного матеріалу через отвір певного перерізу. Здійснюється в екструдері, найчастіше в шнековому (черв'ячному). Застосовується у виробництві труб, плівок, автомобільних камер.

Ендотермічний розпад – есимічна реакція, при якій реагуюча система поглинає теплоту з навколишнього середовища, наприклад, розкладання вапняку на окис кальцію і вуглекислий газ.

3. ТВЕРДІ СПЛАВИ

На сьогодні тверді сплави є одними із основних інструментальних матеріалів, що забезпечують високопродуктивну обробку матеріалів різанням. Зараз загальна кількість твердосплавного інструменту, який застосовується в механообробному виробництві, становить більше 30%, причому цим інструментом знімається до 70% стружки, тому що швидкість різання, яка застосовується при обробці цим інструментом, у середньому в 2–5 разів вища, ніж для швидкорізального інструменту.

Тверді сплави з литих карбідів з'явилися у 1907 р. Ці сплави – сталі – внаслідок високої крихкості не набули великого поширення для виготовлення металорізальних інструментів. У 1925 р. з'явилися тверді сплави нового типу – металокерамічні. Перший сплав цього типу називався «відіа», що в перекладі українською мовою означає «як алмаз». Сплави металокерамічного типу порівняно з литими сплавами мають значно меншу крихкість. У Радянському Союзі виробничий випуск першого металокерамічного твердого сплаву, який пізніше одержав назву «победит» («переможе»), почався у 1930 р. Ці тверді сплави мають відносно високу твердість. За твердістю вони поступаються тільки алмазу, карбїду бору, карбїду кремнію, дещо карборунду і корунду. Їхня твердість (в одиницях, що відповідають твердості загартованих сталей) не менше 70–80 HRC, у той час як твердість традиційно застосовуваних загартованих швидкорізальних сталей знаходиться в межах 62–65 HRC. Така висока твердість дозволяє обробляти металокерамічними сплавами вибілений чавун, загартовану сталь, скло, мармур та інші тверді матеріали. Особливо цінують у твердих сплавах те, що високу твердість вони зберігають до температур 800–1100 °С, що дозволяє різко збільшити швидкості різання. Із застосуванням твердих сплавів швидкості різання порівняно з інструментами зі швидкорізальних сталей збільшилися до 5–8 разів. У наш час при токарній обробці деяких конструкційних матеріалів досягнута швидкість різання понад 1000 м/хв, при фрезеруванні звичайними швидкостями вважаються швидкості 100–300 м/хв.

Поява твердосплавних інструментів викликала різке збільшення потужності та швидкохідності верстатів.

Тверді сплави не є сталлями, тому що вони не містять заліза. Розглянуті сплави складаються із твердих карбідів, цементованих зв'язувальним металом. Основними компонентами сучасних твердих сплавів є карбіди вольфраму WC, карбіди титану TiC, карбіди танталу TaC, карбонітриди титану TiCN та ін., дрібні частки (зерна) яких з'єднані за допомогою порівняно м'яких і менш тугоплавких зв'язок із кобальту (Co) та нікелю (Ni) у суміші з молібденом (Mo).

Примітка. Фізико-механічні властивості чистих металів, у т.ч. Ti, Ta, W, Co, Ni, Mo та ін., подані в додатку Б

Сучасні традиційно застосовувані тверді сплави за складом і сферами застосування можна розділити на чотири групи: **вольфрамокобальтові** (WC-Co) – однокорбідні тверді сплави (група ВК); **титановольфрамокобальтові** (WC-TiC-Co) – двокорбідні тверді сплави (група ТК); **титанотанталовольфрамокобальтові** (WC-TiC-TaC-Co) – трикорбідні тверді сплави (група ТТК); безвольфрамові тверді сплави (на основі TiC і TiCN з різними зв'язками). На сьогодні найбільше застосування знаходять марки твердих сплавів, які належать до груп ВК, ТК і ТТК. Усі марки твердих сплавів, що належать до цих груп, обов'язково у своєму складі містять кобальт і карбіди вольфраму. Кобальт як зв'язувальна речовина визначає міцність твердого сплаву і його різальні властивості: чим більше кобальту, тим твердий сплав міцніший, але його різальні властивості (у першу чергу твердість, теплостійкість, зносостійкість) при цьому знижуються, тому що зменшується в ньому вміст карбідів.

Тверді сплави виготовляються методами порошкової металургії або, як її інакше називають, металокераміки. Звідси й походить назва сплавів – металокерамічні. На рис. 3.1 показано схему виготовлення твердих сплавів двох видів: вольфрамокобальтових (ВК) і титановольфрамокобальтових (ТК). Перші сплави складаються з карбідів вольфраму і кобальту. Другі, крім карбідів вольфраму, мають у своєму складі ще карбіди титану.

Вихідними продуктами для виготовлення цих твердих сплавів служать порошки вольфраму, діоксида титану, кобальту і сажі.

Для одержання карбіду вольфраму в електричній трубчастій вугільній печі прожарюють суміш вольфраму із сажею. Печ є вугільною або графітовою трубою, через яку пропускають електричний струм. При проходженні електричного струму стінки труби розжарюються, забезпечуючи високу температуру в печі. Суміш вольфраму із сажею в графітових «човниках» поміщають усередину труби і нагрівають до температур 1400–1500 °С. При цьому вольфрам вступає в хімічне сполучення з вуглецем (сажею), утворюючи карбід вольфраму.

У таких самих печах одержують і титановольфрамові карбіди для сплавів ТК. Для цього у графітові човники утрамбовують суміш діоксида титану, сажі та карбідів вольфраму. При температурі 2000–2300 °С діоксид титану за наявності сажі пе-

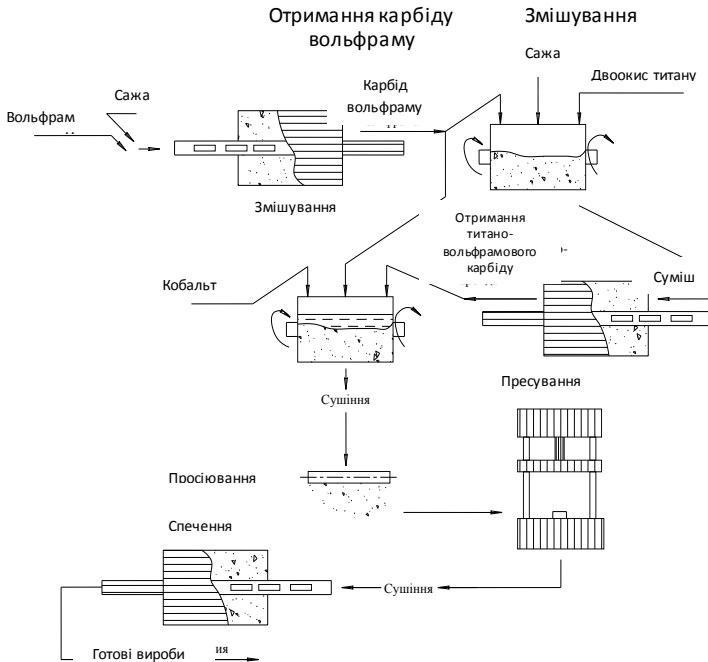


Рисунок 3.1 – Схема виготовлення твердих сплавів

ретворюється в карбід титану. В отриманому карбіді титану розчиняється карбід вольфраму, утворюючи складний титановольфрамований карбід $(Ti,W)C$. Після розмелювання і просіювання карбіди змішуються із цементуючим металом – кобальтом.

Примітка. Під час виготовленні твердих сплавів групи ВК утворені на першій операції карбіди вольфраму після розмелювання і просіювання надходять на операцію змішування з кобальтом

Змішування здійснюється в кульових млинах, головною частиною яких є обертові сталеві барабани. Внутрішню поверхню барабанів, щоб уникнути забруднення суміші залізом, футерують пластинками твердих сплавів.

У барабані знаходяться твердосплавні кулі різних діаметрів, які при обертанні барабана перемішують суміш.

Після цього йде пресування суміші в сталевих пресформах на гідравлічних або механічних пресах при тиску $1000\text{--}1200 \text{ кг/см}^2$, внаслідок чого вироби набирають необхідних форм і розмірів.

Заключною операцією виготовлення твердих сплавів є спікання, яке здійснюється у графітових трубчастих печах. Заготовки укладаються у графітові «човники» і пересипаються графітовою крупкою. Спікання виконується у два етапи: низькотемпературне ($700\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$), при якому із заготовок видаляється клеюча речовина (каучук), введена для поліпшення пресування, й остаточне спікання, у процесі якого сплав одержує свої високі різальні властивості. Температура остаточного спікання для сплавів ВК дорівнює $1390\text{--}1500 \text{ }^\circ\text{C}$, для сплавів ТК – $1450\text{--}1550 \text{ }^\circ\text{C}$.

У процесі спікання відбуваються складні структурні перетворення. З'являється рідка фаза, що заповнює всі пори, відбувається значна усадка сплаву, внаслідок чого сплав стає щільним. Дрібні карбіди розчиняються в кобальті. Основна маса кристалів зв'язується цим розчином. Через малу розчинність карбідів у кобальті зв'язка виявляється не дуже крихкою. Частинки карбідів вольфраму, що мали після розмелювання неправильну форму, ростуть, набираючи правильної грановану форми. На

відміну від них титановольфрамові карбіди мають округлу форму.

Необхідно зазначити важливу особливість титановольфрамових карбідів: у процесі росту при спіканні твердого сплаву вони можуть зростатися між собою з утворенням або суцільного карбідного каркаса («кістяка»), або великих об'ємних агрегатів, роз'єднаних між собою кобальтом і зернами WC (рис. 3.2 а).

У процесі спікання тверді сплави набувають своїх високих різальних властивостей і ніякої термічної обробки після цього не потребують.

Мікроструктура сплавів WC–Co в основному двофазна і складається із кристалів карбіду вольфраму та ділянок зв'язува-

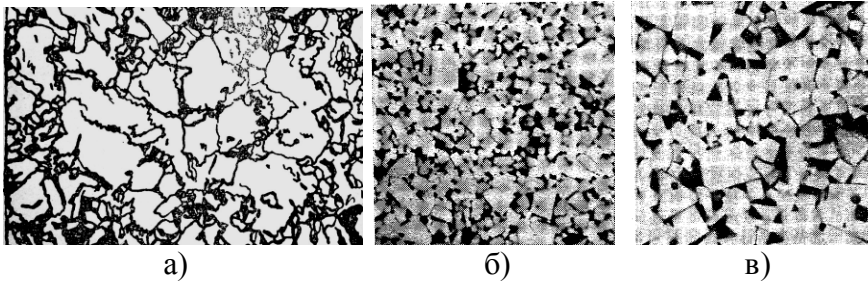


Рисунок 3.2 – Мікроструктура сплавів T15K6 (а) і BK8 (б, в) – б – середньозерниста; в – грубозерниста

льної фази (рис. 3.2 б, в), що складається з кобальту, у якому розчинені невеликі (зневажливо малі) кількості вольфраму і вуглецю. Структура сплавів WC–Co являє собою в основному зв'язуючу (кобальтову) матрицю із вкрапленими в неї зернами або малопротяжними агрегатами карбіду вольфраму, що значною мірою і визначає характер залежності їх міцності від вмісту кобальту та розміру зерен d (рис. 3.3, криві 1 і 2).

Сплави WC–Ti–Co за структурою бувають двофазні та трифазні (незважаючи на можливість наявності додаткових фаз – графіту і фази типу η). У першому випадку структура складається з округлених кристалів твердого розчину (Ti, W) C і сполучної фази (кобальту, насиченого невеликою кількістю вольфраму, титану і вуглецю). Для двофазних сплавів характерним (пе-

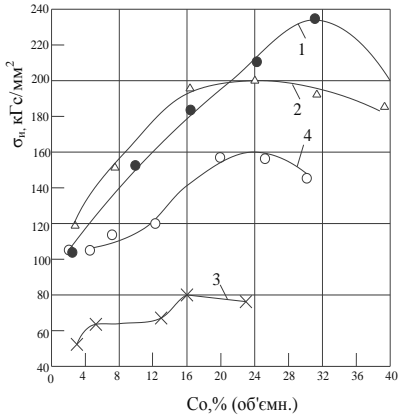


Рисунок 3.3 – Залежність межньої міцності при вигині (σ_n) сплавів WC – Co (1,2) і WC – Ti – Co (3,4) від вмісту кобальту при кімнатній температурі:

1– $d = 3,3$ мкм; 2– $d = 4,95$ мкм; 3– двофазні сплави з відношенням WC:Ti = 1:1 по масі; 4 – трифазний сплав T15K6

реважним) є наявність карбідних кістяків із зерен (Ti, W) C. У другому випадку (практично більш важливому, ніж у першому випадку) кількості Ti недостатньо для розчинення всього WC, і структура складається з овальних кристалів твердого розчину (Ti, W) C, кристалів вільного WC, більш-менш гранованої форми і зв'язувальні (кобальтової) фази. На рис. 3.4 показані мікрофотографії двофазного і трифазного сплавів. Саме відмінністю структур дво- і трифазних сплавів WC–Ti–Co обумовлюється відмінність як їх міцнісних показників (рис. 3.3, криві 3 і 4 – міцність при вигині двофазних твердих сплавів значно менша за міцність трифазних), так і характер їх руйнування.

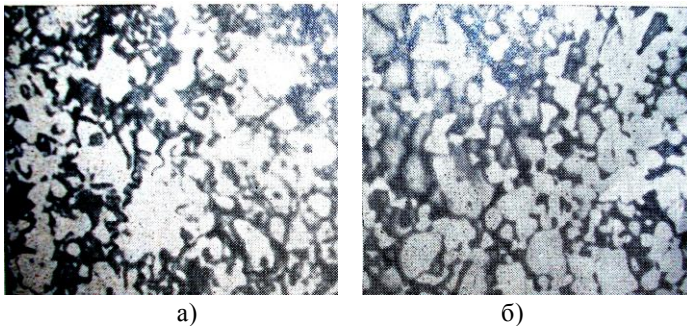


Рисунок 3.4 – Мікрофотографії сплавів WC – Ti – Co: а – двофазного; б – трифазного

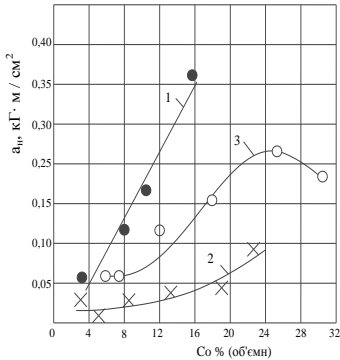


Рисунок 3.5 – Залежність ударної в'язкості сплавів WC – Co (1) і WC–Ti–Co (2,3) при кімнатній температурі від вмісту кобальту:

2 – двофазні сплави з відношенням WC:Ti = 1:1 за масою;

3 – трифазний сплав T15K6

міцності, оскільки пластична деформація відсутня або її роль досить обмежена (рис. 3.5, крива 2). Природно, що ударна в'язкість тут, на противагу сплавам WC–Co (рис. 3.5, крива 1), не пропорційна вмісту кобальту.

У трифазних сплавах WC–Ti–Co при малому вмісті кобальту можуть створитися сприятливі умови для утворення безперервного каркаса (кістяка) із зерен твердого розчину (Ti, W) C, як у двофазних сплавах. У цьому виразі межа міцності не буде залежати від вмісту кобальту, і на кривій 4 (рис. 3.3) повинна з'явитися горизонтальна площадка, як на кривій 3. Однак через зерна другої карбідної фази WC, що сприяють порушенню суцільності каркаса із зерен (Ti, W) C. Структура сплавів на цій ділянці, як правило, складається з великих агрегатів зерен (Ti, W) C, роз'єднаних кобальтом і карбідом вольфраму. Тому зі збільшенням вмісту кобальту на початковій ділянці кривої 4 спостерігається пологий підйом.

При вмісті у двофазних сплавах до 15% Co руйнівна тріщина проходить по карбідному кістяку із кристалів (Ti, W) C, і сплави руйнуються практично без пластичної деформації, тобто за рахунок відколу (крихке руйнування). У цьому діапазоні вмісту кобальту межа міцності при вигині у цих сплавів не залежить від його кількості (див. рис. 3.3, криву 4). Ця залежність трохи спотворюється лише при великому вмісті кобальту і, як показує експеримент, при високих температурах, коли істотну роль починає відігравати пластична деформація. Зрозуміло, що у двофазних сплавах WC–Ti–Co ударна в'язкість визначається в основному величиною межі

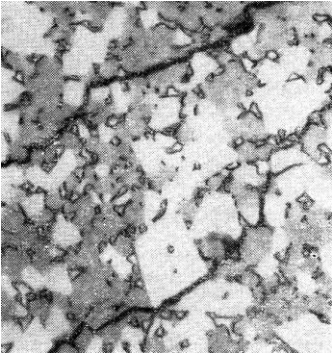


Рисунок 3.6 – Шлях руйнівної тріщини в сплаві Т15К6

На рис. 3.6 показано шлях тріщини в сплаві Т15К6. Тріщина в основному проходить по зернах твердого розчину (Ti, W) C , часто обгинаючи зерна WC (навіть відносно великі). Наявність у сплавах зі вмістом до 9% (за масою) Co досить великих агрегатів із зерен (Ti, W) C приводить до того, що межа міцності d мало залежить від температури. При об'ємному вмісті кобальту вище 12% крива стає більш крутою (див. рис. 3.3, крива 4).

Взагалі, за винятком дещо більш повільнішого підйому на початковій ділянці, крива 4 досить схожа на криву 2 для сплавів $WC-Co$ з великим розміром карбідних зерен. Це пояснюється схожістю як будови, так і механізму руйнування цих сплавів: тут і там тріщина проходить по карбідних зернах або агрегатах карбідних зерен і по розподіляючих їх кобальтових ділянках, що піддаються при руйнуванні пластичній деформації у шарі, який прилягає до поверхні зламу.

Мікроструктура трикарбідних твердих сплавів $WC-Ti-Ta-Co$, отриманих шляхом часткової заміни в сплавах $WC-Ti-Co$ карбиду титану карбідом танталу, аналогічна структурі двокарбідних сплавів. Різниця полягає лише в тому, що місце твердого розчину (Ti, W) C займає твердий розчин (Ti, Ta, W) C . Зерна того й іншого розчинів мають переважно округлу форму. Якщо кількість карбиду вольфраму в сплавах $WC-Ti-Ta-Co$ менша за межу розчинності, то структура двофазна, що складається із кристалів твердого розчину (Ti, Ta, W) C і зв'язувальної фази – твердого розчину вольфраму, титану і танталу в кобальті. Якщо ж кількість карбиду вольфраму в сплавах перевищує межу розчинності, то сплави трифазні, що складаються із кристалів твердого розчину (Ti, Ta, W) C , структурно вільного карбиду вольфраму і з'єднувальної фази на основі кобальту. Практично сплави $WC-TiC-TaC-Co$, що застосовуються, звичайно трифазні. Часткова заміна карбиду титану карбі-

дом танталу в трифазних сплавах WC–TiC–Co досить сприятлива для підвищення механічних властивостей цих сплавів: при кімнатній температурі підвищується статична й утомна міцність при вигині. Утомна ударна довговічність сплавів різко зростає при введенні карбіду танталу в сплави WC–TiC–Co зі вмістом Co більше 8%. Гранична пластична деформація при стисканні тих самих сплавів приблизно лінійно зростає зі збільшенням концентрації танталу в них.

Фізико-механічні й різальні властивості сплавів, що містять однакову кількість кобальту, значною мірою визначаються середнім розміром зерен карбідів. Розроблені технологічні процеси дозволяють одержувати тверді сплави, у яких середній розмір зерен карбідної складової може змінюватися від десятих часток мікрметра до 10–15 мкм. Розміри зерен карбідних фаз як у сплавах WC–Co, так і у сплавах WC–TiC–Co та WC–TiC–TaC–Co звичайно коливаються в межах від 1 до 3 мкм (див. рис. 3.2 б); товщина ділянок з'єднувальної (кобальтової) фази (зв'язки), видимих під мікроскопом, як правило 1–2 мкм. Рентгенівський аналіз сплавів WC–Co свідчить про те, що розміри зерен кобальтової фази набагато перевищують розміри зерен карбіду вольфраму і можуть досягати розмірів більше 100 мкм. Сплави з розмірами карбідів від 3 до 5 мкм (див. рис. 3.2 в) належать до крупнозернистих і позначаються літерою В (BK6–В), з розмірами карбідів від 0,5 до 1,5 мкм належать до дрібнозернистого і позначаються буквою М (BK6–М). У тому разі, коли 70% зерен мають розміри менш 1,0 мкм, сплави належать до особливо дрібнозернистих і позначаються буквами ОМ (BK6–ОМ). Сплави з меншими розмірами карбідної фази (ОМ) більш зносостійкі й теплостійкі, а також дозволяють заточувати більш гостру різальну кромку й дозволяють одержувати радіус округлення різальної кромки до $\rho=1,0\text{--}2,0$ мкм.

Спочатку із твердих сплавів виготовлялися лише крупногабаритні інструменти або порівняно дрібні інструменти простого профілю. Дрібні інструменти складного профілю (фрези, спіральні свердла і т.д.) із твердих сплавів ще піввіку тому практи-

чно не виготовлялись у зв'язку із труднощами пресування дрібних фасонних твердосплавних виробів. У 1956 р. Всесоюзним науково-дослідним інститутом твердих сплавів (ВНДІТС) був розроблений метод виготовлення дрібних фасонних інструментів з так званих пластифікованих заготовок твердого сплаву. У суміш, що йде на виготовлення твердого сплаву, вводиться пластифікатор, що забезпечує одержання заготовки – напівфабрикату, що легко піддається обробці різальними інструментами. Заготовки із пластифікованого твердого сплаву виконуються у вигляді дисків, циліндрів або брусків заданих розмірів. Міцність таких заготовок не більше 20 МПа. Для надання виробам необхідної форми заготовки обробляються на металорізальних верстатах з розмірами, що передбачають припуск на усадку при подальшому спіканні (20–25% у лінійних розмірах). Потім йде звичайне спікання. Різальні властивості інструментів, які отримані із пластифікованих заготовок, такі самі, як і в інструментів, виготовлених звичайним способом. З таких сплавів нині виготовляються, наприклад, дрібні інструменти для годинникового виробництва: фрези, у тому числі дрібномодульні дискові й черв'ячні, зенкери, розвертки, фасонні дискові різці та ін.

Тверді сплави як інструментальні матеріали мають чимало важливих властивостей, основними з яких є висока твердість (HRA 87–92), висока теплостійкість (до 800–1100 °С), велике значення модуля пружності ($E=500\text{--}700$ ГПа) та межа міцності при стиску ($\sigma_b=6000$ МПа). Відносно невисока міцність при вигині ($\sigma_f=1000\text{--}2500$ МПа) не є лімітованим фактором, тому що тверді сплави здатні зберігати досить високу твердість і чинити опір деформуванню при температурах, що виникають під час різання. У табл. 3.1 наведені склад і характеристики основних фізико-механічних властивостей твердих сплавів відповідно до ГОСТ 3882–74.

3.1. Вольфрамокобальтові тверді сплави (ВК)

Вольфрамокобальтові сплави (група ВК) складаються з карбиду вольфраму (WC) і кобальту (табл. 3.1). Сплави цієї групи розрізняються за кількістю кобальту, що міститься в них, і роз-

мірами зерен карбїду вольфраму. Для оснащення рїзального інструменту, як правило, застосовують сплави із вмістом кобальту 3–10%. В умовній позначці сплаву цифра показує процентний вміст кобальтової зв'язки. Наприклад, позначення ВК6 показує, що в ньому міститься 6% кобальту і 94% карбїдів вольфраму.

При збільшенні у сплавах вмісту кобальту в діапазоні від 3 до 10% межа міцності, ударна в'язкість і пластична деформація зростають, у той час як твердість і модуль пружності зменшуються.

Таблиця 3.1 – Склад і характеристики основних фізико-механічних властивостей твердих сплавів (ГОСТ 3882 – 74)

Сплав	Склад сплаву, %				Характеристики фізико-механічних властивостей		
	WC	TiC	TaC	Co	Межа міцності при вигині σ_3 , МПа (не менше)	Густина, $\times 10^{-3}$ кг/м ³ (г/см ³)	HRA (не менше)
1	2	3	4	5	6	7	8
Однокарбїдні тверді сплави на основі WC-Co (група ВК)							
ВК3	97	–	–	3	1176	15,0–15,3	89,5
ВК3-М	97	–	–	3	1176	15,0–15,3	91,0
ВК4-В	96	–	–	4	1470	14,9–15,2	88
ВК6	94	–	–	6	1519	14,6–15,0	88,5
ВК6-М	94	–	–	6	1421	14,8–15,1	90,0
ВК6-ОМ	92	–	–	6	1274	14,7–15,0	90,5
ВК6 - В	94	–	–	6	1666	14,6–15,0	87,5
ВК8	92	–	–	8	1666	14,4–14,8	87,5
ВК8-В	92	–	–	8	1813	14,4–14,8	86,5
ВК8-ВК	92	–	–	8	1764	14,5–14,8	87,5
ВК10	90	–	–	10	1764	14,2–14,6	87,0
ВК10-ХОМ	88	–	2	10	1470	14,3–14,7	89
ВК10 КС	90	–	–	10	1862	14,2–14,6	85,0
ВК11-В	89	–	–	11	1960	14,1–14,4	86
ВК11-ВК	89	–	–	11	1862	14,1–14,4	87
ВК15	85	–	–	15	1862	13,9–14,4	86

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
ВК20	80	–	–	20	2058	13,4–13,7	84
ВК20 -КС	80	–	–	20	2107	13,4–13,7	82
Двокарбідні тверді сплави WC–TiC–Co (група ТК)							
Т30К4	66	30	-	4	980	9,5-9,8	92,0
Т15К6	79	15	-	6	1176	11,1-11,6	90,0
Т14К8	78	14	-	8	1274	11,2-11,6	89,5
Т5К10	85	6	-	9	1421	12,4-13,1	88,5
Трикарбідні тверді сплави TiC–WC–TaC–Co (група ТТК)							
ТТ7К12	81	4	3	12	1666	13,0-13,3	87,0
ТТ8К6	84	8	2	6	1323	12,8-13,3	90,5
ТТ10К8Б	82	3	7	8	1617	13,5-13,8	89,0
ТТ20К9	67	9,4	14,1	9,5	1470	12,0-13,0	91,0
Т8К7	83	7,5	0,5	7	1519	12,8-13,1	90,5

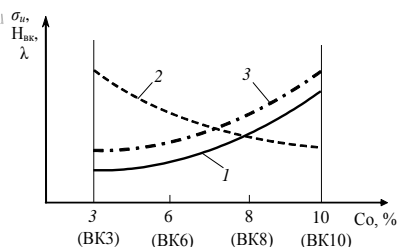


Рисунок 3.7 – Вплив кобальту на властивості твердого сплаву групи ВК:

- 1 – міцність при вигині σ_i ;
- 2 – твердість $H_{вк}$;
- 3 – теплопровідність λ

Зі зростанням вмісту кобальту підвищуються теплопровідність сплавів та їх коефіцієнт термічного розширення (рис. 3.7).

Примітка. Збільшення вмісту у твердому сплаві кобальту (зменшення кількості карбідів) істотно погіршує його зносостійкість.

З усіх існуючих твердих сплавів сплави групи ВК при однаковому вмісті кобальту мають більш високу ударну в'язкість і межу міцності при вигині, а також кращу тепло- й електропровідність. Однак стійкість цих сплавів до окислювання і корозії значно нижча. Крім того, вони мають велику схильність до захоплення зі сталеву стружкою при обробці різанням (див. табл. 1.3). Фізико-механічні властивості сплавів визначають їхню ривальну здатність у різних умовах експлуатації: зі збільшенням вмісту кобальту в сплаві його стійкість під час різанні знижується, а експлуатаційна міцність зростає.

3.2. Титановольфрамкобальтові тверді сплави (ТК)

Сплави групи ТК складаються із зерен карбіду вольфраму складних титановольфрамкових карбідів (Ti, W)C й зв'язувальної кобальтової фази, що становить твердий розчин вольфраму і вуглецю в кобальті (склад зв'язки той самий, що й у сплаві групи ВК).

Хімічний склад зерен (Ti, W)C по їхньому перерізу неоднорідний: усередині зерна більша концентрація карбіду вольфраму, зовні – карбіду титану. Велика твердість сплавів ТК визначена більшою твердістю зерен (Ti, W)C порівняно із зернами WC, однак одночасно сплави ТК є і більш крихкими через підвищену крихкість карбідів (Ti, W)C. Ця особливість визначає і кращу сферу використання сплавів ТК для обробки сталевих заготовок, тому що термодинамічно більш стійкі карбіди (Ti, W)C менш схильні до дифузійного розчинення в залізі (при підвищених швидкості різання та температурі), а температура захоплення карбідів (Ti, W)C із залізом значно вища (при середніх швидкості різання і температурі), ніж у карбідів WC. Тому при обробці сталевих виробів на середній і високій швидкостях різання контактні площадки інструмента, оснащеного пластинами зі сплаву групи ТК, краще чинять опір адгезійно-вугонному і дифузійному видам зношування порівняно з інструментом зі сплаву ВК.

Таким чином, сплави групи ТК призначені, головним чином, для оснащення інструментів для обробки різанням сталей в умовах утворення зливної стружки. Порівняно зі сплавами групи ВК вони мають більшу стійкість до окислювання, твердість та жароміцність, але у той же час менші теплопровідність і електропровідність, а також модуль пружності. Титановольфрамкові сплави порівняно з вольфрамковими мають здатність більшою мірою опиратись утворенню «лунки» зношування на передній поверхні під впливом безупинно ковзної по ній зливної стружки і високої температури. Здатність сплавів групи ТК чинити опір зношуванню під впливом ковзної стружки пояснюється також і тим, що температура захоплення зі сталлю у сплавів цього типу вища (див. табл. 1.3), ніж у сплавів на основі WC–Co, що до-

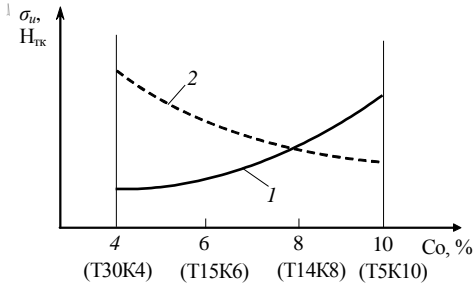


Рисунок 3.8 – Вплив кобальту на властивості твёрдого сплаву групи ТК:

- 1 – міцність при вигині σ_i ;
- 2 – твердість H_{TK}

твёрдих сплавах групи ТК коливається від 4 до 10%, карбідів титану – від 5 до 30% (див. табл. 3.1).

Теплопровідність сплавів групи ТК істотно нижча, а коефіцієнт лінійного термічного розширення вищий, ніж у сплавів групи ВК. Відповідно змінюються і різальні властивості сплавів: при збільшенні вмісту кобальту знижується твердість сплавів і, відповідно, їхня зносостійкість при різанні, а при збільшенні вмісту карбиду титану знижується експлуатаційна міцність (рис. 3.8). Тому такі сплави, як Т30К4 і Т15К6, застосовують для чистової і напівчистової обробки сталі з більш високою швидкістю різання і відносно невеликими навантаженнями на інструмент. У той же час сплави Т5К10 і Т5К12, що містять більшу кількість кобальту, призначені для роботи в тяжких умовах з більшими перерізами зрзу, у т.ч. і при ударних навантаженнях, зі зниженою швидкістю різання.

3.3. Титанотанталовольфрамкобальтові твёрді сплави (ТТК)

Промислові танталовмісні твёрді сплави складаються із трьох основних фаз: твёрдого розчину карбідів титану, вольфраму і танталу ($TiC-TaC-WC$), а також карбиду вольфраму (WC) і кобальтової зв'язки (табл. 3.1).

Легування сплавів ТТК карбідами танталу сприяє формуванню дрібнозернистих структур, а крихкість карбиду (Ti, Ta, W)C істотно нижча за крихкість карбиду (Ti, W)C. Таким чином,

зволяє застосовувати більш високі швидкості різання при обробці сталі та істотно підвищувати при цьому стійкість інструмента.

У сплавів на основі $WC-TiC-Co$ (група ТК) так само, як і у сплавів на основі $WC-Co$ (група ВК), ударна в'язкість, межі міцності при стиску і вигині зростають зі збільшенням вмісту кобальту (рис. 3.8). Вміст кобальту у

сплави групи ТТК мають більш високу міцність, краще втримують карбіди зв'язкою. Крім того, сплави ТТК порівняно зі сплавами ТК завдяки наявності в них карбіду танталу мають менший коефіцієнт термічного розширення, дещо більшу теплопровідність, мають знижену схильність до високотемпературної повзучості, що істотно підвищує межу втоми сплавів ТТК при циклічному навантаженні й термовпливі, а також термостійкість і стійкість до окислювання та корозії при підвищеній температурі. Тому інструмент, оснащений різальними пластинами ТТК, особливо ефективний при переривчастій обробці, наприклад, при фрезеруванні, при чорновій обробці (різання з ударами і нерівномірним припуском, обробка поковок по кірці й литих заготовок за наявності твердих поверхневих включень тощо) та ін.

Уведення у сплав домішок карбіду танталу поліпшує їх фізико-механічні й експлуатаційні властивості, що виявляється у збільшенні міцності при вигині як при кімнатній температурі (20 °С), так і при температурах 600–800 °С. Сплав, який містить карбід танталу, має також і більш високу твердість, у тому числі і при 600–800 °С. Таким чином, при високих температурах карбід танталу підвищує твердість, термостійкість, а отже, і зносостійкість сплавів, про що свідчать порівняльні випробування стійкості різців при точінні сталей Г13Л і ЭИ 481. При обробці сталі Г13Л зі швидкістю різання 30 м/хв, подачею 0,21 мм/об і глибиною різання 2 мм були отримані такі відносні стійкості: для сплаву Т5К10–100%; Т15К6–65%; ВК8–80%; ТТ10К8–120%. При обробці сталі ЭИ481 (37Х12Н8Г8МФБ) зі швидкістю різання 60 м/хв, при подачі 0,3 мм/об і глибині різання 2 мм були отримані наступні відносні стійкості: для Т5К10–100%; Т15К6–216%; ТТ10К8А–280%; ТТ10К8Б–500%.

Таким чином, збільшення у сплаві вмісту карбіду танталу підвищує його стійкість при різанні, особливо завдяки меншій схильності до лункоутворення і руйнування під дією термоциклічних і втомних навантажень.

3.4. Безвольфрамові тверді сплави (БВТС)

У зв'язку з дефіцитністю вольфраму і кобальту промисловість випускає безвольфрамові тверді сплави, які складаються з карбідів, карбонітридів і нітридів титану на основі нікелю з різними добавками, найчастіше молібдену. Склад і характеристики фізико-механічних властивостей безвольфрамових твердих сплавів, регламентованих ДСТУ 26530–85, наведені в табл. 3.2.

Основу технології виробництва БВТС становлять операції пресування у вакуумі при 1360 °С або гаряче ізостатичне пресування (ГП) у середовищі азоту при 1000–1300 °С і тиску 0,2 МПа.

Установлено, що ГП у середовищі азоту сприяє підвищенню твердості й зносостійкості БВТС, а також їхній опірності руйнуванню при термічних ударах.

Таблиця 3.2 – Склад і характеристики фізико-механічних властивостей безвольфрамових твердих сплавів

Сплав	Склад, %				ρ , г/см ³
	Карбід титану	Карбонітрид титану	Нікель	Молібден	
КНТ16	–	74	19,5	6,5	5,5–6,0
ТН20	79	–	15	6,0	5,5–6,0

Продовження таблиці 3.2

Сплав	λ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	σ_z , МПа (не менше)	НРА (не менше)
КНТ16	12,6–21,0	8,5-90	1200	89
ТН20	8,4–14,7	8,5-90	1050	90

За твердістю БВТС знаходяться на рівні вольфрамовмісних сплавів, але за міцнішими характеристиками й особливо за модулем пружності їм поступають. Крім того, вони мають підвищену крихкість. Твердість БВТС за Віккерсом при підвищених температурах у діапазоні температур до 800 °С дещо нижча, ніж

твердість вольфрамовміснючого сплаву Т15К6. Найбільша термостійкість у сплаву КНТ16. У сплаві ТН20 вона значно нижча.

Істотною перевагою БВТС є їхня підвищена стійкість проти високотемпературної корозії та окислювання. Необхідно також відзначити, що тверда складова БВТС (карбіди, карбонітриди і нітриди титану) має меншу розчинність у залізі й підвищену хімічну інертність порівняно з WC, що забезпечує інструменту із БВТС підвищену зносостійкість, особливо в умовах корозійно-окисного і дифузійного зношування. Щодо цього інструмент не лише не поступається інструменту з титанофольфрамокарбидного сплаву, а й у деяких випадках перевершує його. Наприклад, в умовах чистової і напівчистової обробки деталей зі сталей безвольфрамові тверді сплави, основою яких є карбід або карбонітрид титану (див. табл. 3.2), мають значно більшу стійкість, ніж вольфрамовмісні тверді сплави групи ТК, тому що вони взаємодіють зі сталлю менш інтенсивно, ніж складний карбід (Ti,W)C. При дифузійному характері зношення його швидкість, що обумовлена швидкістю розчинення карбідних зерен у сталі, більшою мірою залежить від хімічних властивостей сплаву, ніж від його твердості, пов'язаної, зокрема, із зернистістю.

Нагрів інструменту із БВТС на установках ТВЧ, які звичайно застосовуються під час паяння інструменту, погіршує його експлуатаційні характеристики. Тому для різання із БВТС виготовляють в основному змінні непереточувані пластини (ЗНП).

У зв'язку й зниженою теплопровідністю найбільшу стійкість БВТС мають у разі застосування не тригранних, а чотири-, п'яти- і шестигранних ЗНП. Оптимальними геометричними параметрами пластин при цьому є передній кут $\gamma=10^\circ$, задній кут $\alpha=8-10^\circ$, радіус при вершині $r_v=0,8$ мм.

3.5. Короткі рекомендації для вибору твердих сплавів

Рекомендовані галузі застосування твердих сплавів для обробки різанням за ГОГСТ 3882–74 подані в табл.3.3.

Тверді сплави на основі WC–Co рекомендують переважно для обробки сірих, модифікованих і вибілених чавунів, кольоро-

вих металів і їхніх сплавів, склопластиків та інших подібних матеріалів, що дають коротку сипку стружку надламу.

Маючи високу міцність, сплави WC—Co краще чинять опір пульсуючому високому навантаженню, що спостерігається в даних умовах обробки. Переважаючим видом зношування в цьому випадку є адгезійно-втомне, а при обробці білих чавунів і склопластиків — абразивне, при яких важливим фактором, що визначає стійкість інструмента, є не лише вміст кобальту в сплаві, а й розміри зерен фази WC.

Чим вища твердість оброблюваного матеріалу, тим істотніший вплив зернистості твердого сплаву на стійкість інструмента. Ці закономірності й покладені в основу практичних рекомендацій з раціонального застосування конкретних марок сплавів. Наприклад, з наведених у табл. 3.1 і 3.3, сплав BK3 із вмістом карбідів вольфраму 97% є одним із найбільш зносостійких, але й найменш міцних твердих сплавів (кобальту всього 3%). Тому він рекомендується для чистової обробки з максимально припустимою швидкістю різання, але з малими подачею і глибиною різання.

Таблиця 3.3 — Рекомендовані галузі застосування твердих сплавів для обробки різанням за ДСТ 3882—74

Сплав	Застосування для
1	2
BK3	— для чистового точіння з малим перерізом зрізу, остаточного нарізування різьблення, розгортання отворів та інших аналогічних видів обробки сірого чавуну, кольорових металів та їхніх сплавів і неметалевих матеріалів (гуми, фібри, пластмаси, скла, склопластиків і т.ін.). Різання листового скла
BK3-M	— для чистової обробки (точіння, розточування, нарізування різі, розвертання) твердих, легованих і вибілених чавунів, цементованих і загартованих сталей, а також високоабразивних неметалевих матеріалів

Продовження табл. 3.3

1	2
BK6	— для чорнового і напівчорнового точіння, попереднього нарізування різі токарними різцями, напівчистового фрезерування суцільних поверхонь, розсвердлення і розточування отворів, зенкерування сірого чавуну, кольорових металів та їх сплавів і неметалевих матеріалів
BK6-M	— для напівчистої обробки жароміцних сталей і сплавів, нержавіючих сталей аустенітного класу, спеціальних твердих чавунів, загартованого чавуну, твердої бронзи, сплавів легких металів, абразивних неметалевих матеріалів, пластмас, паперу, скла, обробки загартованих сталей, а також сирих вуглецевих і легованих сталей при тонких перерізах зрізу на досить малих швидкостях різання
BK6-OM	— для чистої та напівчистої обробки твердих, легованих і вибілених чавунів, загартованих сталей і деяких марок нержавіючих високоміцних і жароміцних сталей та сплавів, особливо сплавів на основі титану, вольфраму і молібдену (точіння, розточування, розвертання, нарізування різі, шабріння)
BK8	— для чорнового точіння при нерівномірному перерізі зрізу і переривчастому різанні, струганні, чорнового фрезерування, свердління, чорнового розсвердлювання, чорнового зенкерування сірого чавуну, кольорових металів та їх сплавів і неметалічних матеріалів, обробки нержавіючих, високоміцних і жароміцних важкооброблюваних сталей і сплавів, у тому числі сплавів титану
BK10-XOM	— для свердління, зенкерування, розвертання, фрезерування та зубофрезерування сталі, чавуну, деяких важкооброблюваних матеріалів і неметалів цільнотвердосплавним, дрібнорозмірним інструментом
BK15	— для різального інструменту під час обробки дерева
T30K4	— для чистої точіння з малим перерізом зрізу (типу алмазної обробки); нарізування різі й розгортання отворів у незагартованих і загартованих вуглецевих сталях

Продовження табл. 3.3

1	2
Т15К6	— для напівчорнового точіння при безперервному різанні, чистового точіння при переривчастому різанні, нарізування різі токарними різцями та обертovими головками, напівчистового і чистового фрезерування суцільних поверхонь, розсвердлювання і розточування попередньо оброблених отворів, чистового зенкерування, розгортання та інших аналогічних видів обробки вуглецевих і легованих сталей
Т14К8	— для орнового точіння при нерівномірному перерізу зрізу і безперервному різанні, напівчистового та чистового точіння при переривчастому різанні; чорнового фрезерування суцільних поверхонь; розсвердлювання литих і кутих отворів, чорнового зенкерування та інших подібних видів обробки вуглецевих і легованих сталей
Т5К10	— для чорнового точіння при нерівномірному перерізу зрізу і переривчастому різанні, фасонного точіння, відрізки токарними різцями; чистового стругання; чорнового фрезерування переривчастих поверхонь та інших видів обробки вуглецевих і легованих сталей, переважно у вигляді поковок, штамповок і відливків по кірці та окалині
ТТ7К1 2	— для важкого чорнового точіння сталевих поковок, штампувань і відливків по кірці з раковинами за наявності піску, шлаків та різних неметалевих включень при рівномірному перерізі зрізу і наявності ударів; усіх видів стругання вуглецевих і легованих сталей; важкого чорнового фрезерування вуглецевих і легованих сталей
ТТ10К 8Б	— для чорнової та напівчистої обробки деяких марок важкооброблюваних матеріалів, нержавіючих сталей аустенітного класу, маломагнітних сталей та жароміцних сталей і сплавів, у тому числі титанових
ТТ20К 9	— для фрезерування сталі, особливо фрезерування глибоких пазів та інших видів обробки, що ставлять підвищені вимоги до опору сплаву тепловим і механічним циклічним навантаженням
Т8К7	— для фрезерування важкооброблюваних чавунів

Сплави ВК8 і ВК10–ХОМ, що мають більший вміст кобальту, для чорнової обробки зі зниженою швидкістю різання і збільшеним перерізом зрізу, в т.ч. і в умовах ударних навантажень. Сплави WC–Co рекомендуються також для обробки важкооброблюваних високоміцних і жароміцних матеріалів, особливо сплавів на основі нікелю (NT) і титану (Ti). Сплави на основі NT, що мають високу міцність і значний опір повзучості при високих температурах, а також низьку теплопровідність, важко обробляються різанням. Під час виготовлення деталей із цих матеріалів у зоні контакту інструмента із заготовкою генеруються дуже високі температури і напруження, відбуваються схвачування і подальше відривання частинок твердого сплаву. Кращу стійкість у цих умовах показують осободрібнозернисті висококобальтові сплави групи ВК, й особливо леговані хромом, наприклад, ВК10–ХОМ

Тверді сплави на основі WC–TiC–Co рекомендують переважно для обробки сталей. Тверді сплави з невеликим вмістом кобальту (Т30К4, Т15К6) рекомендується застосовувати при високих швидкостях різання, коли утворюється зливна стружка. У цьому разі стружка контактує з передньою поверхнею інструмента в умовах значних температур і тисків, що приводить до інтенсивного утворення лунки зносу на передній поверхні лека внаслідок переважаючого дифузійного зношування. Складний розчин карбіду вольфраму в карбіді титану (Ti, W)C розчиняється в сталі при більш високій температурі і набагато повільніше, ніж карбід вольфраму. Крім того, наявність фази WC–TiC–Co сприяє зменшенню швидкості розчинення зерен карбіду вольфраму в сталі й цим знижує інтенсивність зношування.

Тверді сплави з відносно великим вмістом кобальту (Т5К10, Т14К8), як більш міцні, рекомендується застосовувати для чорнової обробки сталей з меншими швидкостями різання і збільшеними площами зрізу ($f=t \cdot S$), у т.ч. і в умовах ударних навантажень.

Тверді сплави на основі WC–TiC–TaC–Co рекомендують, головним чином, для тяжких умов різання важкооброблюваних

матеріалів із великими перерізами зрізу, коли на різальну кромку інструмента діють значні силові і температурні навантаження, а також для переривчастого різання, особливо фрезерування, які відрізняються змінним перерізом зрізу і циклічними термомеханічними навантаженнями на різальну частину інструмента, тобто коли лезо працює за циклом «різання – відпочинок». За такої схеми різання на робочих поверхнях інструмента можуть з'являтися численні короткі тріщини, які розташовані перпендикулярно до різальної кромки. Ці тріщини обумовлюються періодичним розширенням при нагріванні (під час частини циклу «різання») і стиском при охолодженні (під час частини циклу «відпочинок») поверхневого шару твердого сплаву. При подальшому своєму розвитку тріщини призводять до викришувань і відколів і стають головною причиною виходу інструмента з ладу.

Тому для оснащення фрезерного інструменту доцільно застосовувати тверді сплави, які найменш чутливі до термічної втоми і динамічних циклічних навантажень, у т.ч. і сплави, що містять у своєму складі карбід танталу, тобто сплави на основі WC–TiC–TaC–Co. Найбільшою крихкою міцністю серед сплавів ТТК, які рекомендують для обробки сталі в особливо несприятливих умовах (переривчасте точіння, стругання, чорнове фрезерування), має сплав ТТ7К12. Застосування його замість швидкорізальної сталі дозволяє підвищити швидкість різання в 1,5–2 рази.

Для операцій фрезерування рекомендуються також (див. табл. 3.2) сплави марок ТТ20К9 (для обробки сталі) і ТТ8К7 (для обробки важкооброблюваних чавунів). Твердий сплав ТТ8К7 можна рекомендувати також для чистового і напівчистового точіння, розточування і фрезерування сірого та ковкого чавунів, кольорових металів, безперервного точіння високоміцних і нержавіючих сталей, у т.ч. і термооброблених, і титанових сплавів.

Безвольфрамові тверді сплави мають переважне застосування для чистової і напівчистової обробки деталей, тобто з високими швидкостями різання і відносно невеликими перерізами

зрізу, як з вуглецевих, низьколегованих і конструкційних легуваних сталей замість твердих сплавів групи ТК, так і для обробки деталей з кольорових металів, сірих чавунів, поліетилену та ін. Рекомендовані області застосування безвольфрамкових твердих сплавів для обробки матеріалів різанням за ГОСТ 26530 - 85 подані в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 — Рекомендовані галузі застосування безвольфрамкових твердих сплавів за ГОСТ 26530 - 85

Сплав	Застосування для
ТН20	– для чистового і напівчистового точіння при безперервному різанні вуглецевих низьколегованих конструкційних сталей, кольорових металів на основі міді, низьколегованих сплавів нікелю, сірих чавунів і поліетилену; чистового і напівчистового торцевого фрезерування деталей із чавуну
КНТ16	– для напівчистового і напівчорнового точіння при безперервному різанні вуглецевих, низьколегованих і конструкційних сталей, кольорових металів на основі міді, низьколегованих сплавів нікелю, у тому числі при нерівномірному перерізі зрізу, чистового і напівчистового фрезерування деталей із сірого і ковкого чавунів, чистового фрезерування вуглецевих, низьколегованих і конструкційних легуваних сталей

Інструменти, що працюють при переривчастому різанні, наприклад фрези, доцільно виготовляти зі сплаву КНТ16 завдяки його підвищеній термостійкості. Середня «ламальна подача» (подача, при якій відбувається механічне руйнування леза) становить: для сплаву ТН20—0,3 мм/зуб; для сплаву КНТ16—0,54 мм/зуб. При виборі режимів різання під час фрезерування подача не повинна перевищувати цих значень, а глибина різання — 5мм.

Разом з тим сплав ТН20 має більшу зносостійкість. При точінні сталі 45 і сталі 40Х при $t=1\text{мм}$ і $S=0,2\text{мм/об.}$ стійкість

сплаву ТН20 вища за стійкість сплаву Т15К6 у всьому діапазоні швидкостей різання (від 200 до 600 м/хв).

БВТС не рекомендуються при обробці важкооброблюваних матеріалів, у т.ч. твердих чавунів і загартованих сталей.

Ефективність застосування БВТС залежить від правильності підготовки інструменту, вибору режимів різання та умов обробки. Пластини повинні мати високоякісну доводку різальних кромek й опорної поверхні та прилягати до опори без зазору для того, щоб не було вібрацій.

Оброблювана заготовка не повинна мати биття, яке перевищує половину припуску на обробку, а також слідів газового зварювання та шлакових включень.

З урахуванням низької теплопровідності БВТС, як правило, не рекомендується використання мастильно – охолодних рідин (МОР), однак у деяких випадках (різенарізування, проточка канавок, чистове точіння) допускається застосування охолодження.

Для запобігання катастрофічним поломкамк інструменту рекомендується робити примусовий поворот пластинки після обробки певного числа заготовок. Припустимий знос різців по задній грані – 1,5–1,8 мм. При фрезеруванні БВТС можна експлуатувати до зносу 2,5–3,0 мм по задній грані.

3.6. Класифікація сучасних твердих сплавів за міжнародним стандартам ISO 513-75 і визначення умов їхнього ефективного використання

При визначенні галузей застосування твердих сплавів звичайно використовують рекомендації Міжнародної організації стандартів ISO, які подані в ГОСТ 3882–74, що передбачають їхнє використання з урахуванням оброблюваних матеріалів і типу стружки, типу обробки (чистова, напівчистова, легка чорнова і чорнова), умов обробки (хороші, нормальні та важкі), а також видів обробки (точіння, розточування, фрезерування та ін.).

За ISO передбачається розподіл усіх оброблюваних матеріалів на три групи (табл.3.5): **P** (позначаються синім кольором),

М (жовтим) і **К** (червоним). До групи **Р** входять сталі й сталеве лиття, при обробці яких одержують зливну стружку.

До групи **М** входять нержавіючі сталі, титанові й жароміцні сплави, при обробці яких одержують стружку надламу та зливну.

Таблиця 3.5 – Класифікація оброблюваних матеріалів за ISO

Група за ISO (колір маркування)	Оброблюваний матеріал		Твердість, НВ	Марки – представники
1	2		3	4
Р (синій)	Вуглецеві сталі		125	08 кп; Ст 3; 20; 09Г2С, А12
			150	Ст 30; 35; 40; 45; 50,
			170	У7А; У8А; 60Г; 65Г, А40Г
	Леговані сталі	у стані поставки	180	20Х; 20ХН; 38ХА; 40Х; 12ХН2; 20ХН2М; 60С2ХФА
		загартовані й відпущені	300	
	Високолеговані і швидкорізальні сталі	після відпалу	200	Х12М; 5ХНМ; 3Х2В8Ф; 9ХС; ХВГ; Р18; Р6М5
		з підвищеною твердістю	350	
Сталеве лиття			180	20Л; 25Л; 35Л
М (жовтий)	Нержавіючі сталі	мартенситного класу	200	20Х13; 30Х13; 40Х13
		аустенітного класу	180	12Х18Н10Т; 17Х18Н9; 06Х18Н11
	Титанові сплави		400 МПа	ВТ1-00; ВТ3-1; ВТ5; ВТ14
	Жароміцні сплави		280	06ХН28МДТ; ХН32Т; ХН35ВТЮ; ХН32Т; ХН67ВТМІОЛ

Продовження табл. 3.5.

1	2		3	4
К (черво- ний)	Чавуни	Сірі	100 - 400	СЧ10; СЧ 20; СЧ 25; СЧ 35; СЧ45
		Ковкі	280	КЧ37-12; КЧ50-5
		Високоміцні	160	ВЧ35; ВЧ100
	Кольорові метали	Алюмінієві спла- ви	60	АМГ2, Д16,АЛЗ, ЛС63-1, Л96,
		Бронзи і латуні	90	Л96; Л80; Л63; ЛО70-1
	Матеріали з високою поверхневою твердістю	Загартована сталь	HRC 45-60	У8А; 60Г; 40Х; 60С2ХФА; 9ХС; ХВГ; Р18; Р6М5
Леговані зносо- стійкі і вибілені чавуни		HRC 40-50	ИЧХ; 28Н2; ЧН 15Д; ЧХ16	

До групи **К** входять чавуни, кольорові метали та їхні сплави, матеріали з високою поверхневою твердістю, при обробці яких одержують стружку надламу та елементну. Кожна група застосування ділиться на підгрупи, причому зі збільшенням індексу підгрупи від 01 до 40 (50) умови обробки стають більш жорсткими, починаючи від чистового різання і закінчуючи чорновим з ударами. Такий розгляд зручний для підбору марок рекомендованих твердих сплавів за їхніми властивостями. Чим більший індекс підгрупи застосування, тим нижчі потрібні зносостійкість твердого сплаву і припустима швидкість різання, але вища міцність (ударна в'язкість) та припустима подача і глибина різання (табл. 3.5).

Цифровий показник у марці твердого сплаву за ISO вказує на рівень його в'язкості й зносостійкості: чим більша цифра, тим вища в'язкість і нижча зносостійкість сплаву.

Таким чином, малі індекси відповідають чистовим операціям, коли від твердих сплавів потрібні високі зносостійкість і теплостійкість. Більші індекси відповідають чорновим операціям, тобто коли твердий сплав повинен мати високу міцність.

У зв'язку із цим кожна марка має свою кращу область застосування, у якій вона забезпечує максимальні працездатність сплаву і продуктивність обробки (табл. 3.6).

Швидкість різання, безперервність обробки, жорсткість системи ВПД, спосіб одержання заготовки (стан оброблюваної поверхні) дозволяють визначити умови обробки і сформулювати вимоги до основних властивостей твердого сплаву.

Галузі застосування твердих сплавів залежно від типу обробки представлені в табл. 3.6. З табл. 3.6 бачимо, що сфера використання марки твердого сплаву залежатиме від оброблюваного матеріалу, умов і типу обробки.

Умови обробки можуть бути *хороші, нормальні* і *важкі* (табл. 3.7).

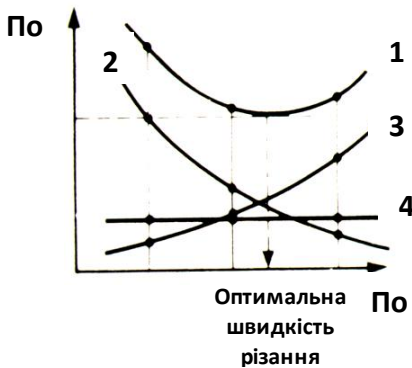


Рисунок 3.9 – Залежність витрат на обробку V_o від її продуктивності P_o (зімнання стружки в одиницю часу)

зносостійкістю.

ВАЖКІ – невисокі швидкості. Переривчасте різання. Товста кірка на відливках або поковках. Нежорстка система ВПД.

ХОРОШІ – високі швидкості. Безперервне різання. Попередньо оброблені заготовки. Висока жорсткість технологічної системи ВПД.

Вимоги до твердого сплаву – висока зносостійкість.

НОРМАЛЬНІ – помірні швидкості різання. Контурне точіння. Заготовки – поковки і відливки. Досить жорстка система ВПД.

Вимоги до твердого сплаву – висока міцність у сполученні з досить високою

Таблиця 3.6 – Галузі застосування твердих сплавів залежно від умов обробки

Позначення за ISO 513-75 (за ДСТ)	Оброблюваний матеріал і тип стружки, що знімається	Вид обробки та умови застосування	Зміна режиму різання	Зміна властивостей твердих сплавів
1	2	3	4	5
Група різання Р				
P01	Сталь, сталеве лиття, які дають зливну стружку	Чистове точіння, розточування, розгортання. Висока точність обробки і якість поверхні виробу. Відсутність вібрації під час обробки ($S=0,1 - 0,3$ мм/об; $t=0,5 - 2$ мм)		
P10	Сталь, сталеве лиття, які дають зливну стружку	Точіння, у тому числі по копіру, нарізання різі, фрезерування, розсвердловання, розточування ($S=0,2 - 0,5$ мм/об; $t=2 - 4$ мм)		
P20	Сталь, сталеве лиття, ковкий чавун і кольорові метали, які дають зливну стружку	Точіння, у тому числі по копіру, фрезерування, чистове стругання ($S=0,4 - 1,0$ мм/об; $t=4 - 10$ мм)		
P25	Сталь нелегована, низько - і середньолегована	Фрезерування, у тому числі глибоких пазів, інші види обробки, при яких у сплаві повинен бути високий опір тепловим і механічним навантаженням стругання ($S=0,4 - 1,0$ мм/об; $t=4 - 10$ мм)		
P30	Сталь, сталеве лиття, ковкий чавун, які дають зливну стружку	Чорнове точіння, фрезерування, стругання, робота в несприятливих умовах* ($S=1,0$ мм/про; $t=6 - 20$ мм)		
P40	Сталь, сталеве лиття, із включеннями піску і раковин, які дають зливну стружку і стружку надламу	Чорнове точіння, стругання, робота в особливо несприятливих умовах*		
P50	Сталь, сталеве лиття, із середньою або низькою міцністю, із включеннями піску і раковин, які дають зливну стружку і стружку надламу	Точіння, стругання, добання при особливо високих вимогах до міцності твердого сплаву у зв'язку з несприятливими умовами різання*. Для інструмента складної форми		

Продовження табл. 3.6

1	2	3	4	5
Група різання М				
M10	Сталь, сталеве лиття, високолеговані сталі, у тому числі аустенітні, жароміцні важкооброблювані сталі та сплави, сірий, ковкий і легований чавуни, які дають як зливну стружку, так і стружку надламу	Точіння, фрезерування ($S=0,2-0,5$ мм/об.; $t=2-4$ мм)		
M20	Сталеве лиття, аустенітні сталі, марганцовиста сталь, жароміцні важкооброблювані сталі та сплави, сірий і ковкий чавуни, які дають як зливну стружку, так і стружку надламу	Точіння, фрезерування ($S=0,4-1,0$ мм/об.; $t=4-10$ мм)		
M30	Сталеве лиття, аустенітні сталі, жароміцні важкооброблювані сталі та сплави, сірий і ковкий чавуни, які дають як зливну стружку, так і стружку надламу	Точіння, фрезерування, стругання, робота в несприятливих умовах* ($S=1,0$ мм/об.; $t=6-20$ мм)		
M40	Низьковуглецева сталь із низькою міцністю, автоматна сталь та інші метали і сплави, які дають як зливну стружку, так і стружку надламу	Точіння, фасонне точіння, відрізка переважно на вертатах-автоматах		
Група різання К				
K01	Сірий чавун, переважно високої твердості, алюмінієві сплави з великим вмістом кремнію, загартована сталь, абразивні пластмаси, кераміка, скло, які дають стружку надламу	Чистове точіння, розточування, фрезерування, шабрування ($S=0,1-0,3$ мм/об.; $t=0,5-2$ мм)		

Продовження табл. 3.6

1	2	3	4	5
K05	Леговані й вибілені чавуни, загартовані сталі, що не іржавіють, високоміцні й жароміцні сталі та сплави, що дають стружку надламу	Чистове й напівчистове точіння, розточування, розгортання, нарізування різблення ($S=0,2-0,5$ мм/об.; $t=2-4$ мм)		
K10	Сірий і ковкий чавуни переважно підвищеної твердості, загартована сталь, алюмінієві та мідні сплави, пластмаси, скло, кераміка, які дають стружку надламу	Точіння, розточування, фрезерування, свердління, шабрування		
K20	Сірий чавун, кольорові метали, абразивна пресована деревина, пластмаси, які дають стружку надламу	Точіння, фрезерування, стругання, свердління, розточування ($S=0,4-1,0$ мм/об.; $t=4-10$ мм)		
K30	Сірий чавун низької твердості й міцності, сталь низької міцності, деревина, кольорові метали, пластмаса, щільна деревина, які дають стружку надламу	Точіння, фрезерування, стругання, свердління, робота в несприятливих умовах*. Припустимо великі передні кути заточки інструмента ($S \geq 1,0$ мм/об.; $t=6-20$ мм)		
K40	Кольорові метали, деревина, пластмаси, які дають стружку надламу	Точіння, фрезерування, стругання. Припустимо великі передні кути заточки інструмента ($S \geq 1,0$ мм/об.; $t=6-20$ мм)		

* Робота зі змінною глибиною різання, з переривчастою подачею, з ударами, вібраціями, з наявністю ливарної кірки та абразивних включень в оброблюваному матеріалі.

Таблиця 3.7 – Галузі застосування твердих сплавів залежно від типу обробки

Умови обробки	ISO	Тип обробки			
		чистова	напівчистова	легка чорнова	чорнова
Хороші	P	P01-P10	P10-P25	P25-P30	P30-P35
	M	M10-M15	M15-M20	M20-M25	M25-M30
	K	K01-K05	K05-K10	K10-K15	K15-K20
Нормальні	P	P10-P25	P25-P30	P30-P40	P40-P50
	M	M15-M20	M20-M25	M25-M30	M30-M35
	K	K05-K10	K10-K15	K15-K20	K20-K25
Важкі	P	P30-P35	P35-P40	P40-P45	P45-P50
	M	M20-M25	M25-M30	M30-M35	M35-M40
	K	K10-K15	K15-K20	K20-K25	K25-K30

Таблиця 3.8 – Значення параметрів режиму різання для різних типів обробки

Параметри режиму різання	Тип обробки			
	чистова	напівчистова	легка чорнова	чорнова
Глибина t , мм	0,25-2,0	0,5-3,0	2,0-6,0	5,0-10,0
Подача S_0 , мм/об.	0,05-0,15	0,1-0,3	0,2-0,5	0,4-1,8

Вимоги до твердого сплаву – висока міцність.

Для правильного вибору марки твердого сплаву для реалізації процесу обробки в заданих умовах, окрім підгруп застосування необхідно знати також тип обробки (чистова, напівчистова, легка і чорнова), які наведені в табл. 3.8 і підрозділяються залежно від величин глибини різання (t , мм) і подачі (S_0 , мм/об.). Одними з найважливіших показників процесу обробки є її продуктивність **По** та собівартість (рис. 3.9, крива 1), яка значною мірою залежить від швидкості різання.

Примітка. Основними складовими в структурі собівартості є: витрати на обладнання та заробітну плату виробничників (рис. 3.9, крива 2); витрати на різальний інструмент (рис. 3.9, крива 3); одноразові витрати (рис. 3.9, крива 4)

Ураховуючи ту обставину, що швидкість різання з параметрів режиму різання найбільше впливає на стійкість інструменту, а відповідно, і на витрати на інструмент, що зростають зі збільшенням швидкості різання (крива 3), основним завданням при її призначенні повинне бути досягнення такої швидкості, яка б забезпечувала найменшу собівартість обробки. Цю швидкість різання, як правило, називають оптимальною швидкістю різання.

Приблизна відповідність вітчизняних і зарубіжних марок твердих сплавів класифікації ISO наведена в табл. 3.9.

Таблиця 3.9 – Відповідність вітчизняних і зарубіжних марок твердих сплавів

Група застосовності за ISO				Марки за ДСТ, ТУ або іноземних фірм				
Основна	Підгрупа	Твердість HRA	Колір	ГОСТ 3882-74	ТУ 48-19-308-80 (МКТС)	Твердість HV	Фірма «Коромант» «Coromant» (Швеція)	Фірма «Хертель» «Hertel» (ФРН)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
P	P01	96,5	синій	T30K4	MC101	1710 - 1890	F02; S1P	-
	P10	94,0		T15D06	MC111	1525 - 1675	GC415; S1P; S10T; GC015	-

Продовження табл.3.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	P20	92,3		T14K8	MC121	1475 - 1625	S2; GC120	P2F
	P25	89,5		TT20K9	MC137; MC2210	1485 - 1635	GC1025; SM; SMA	P2F
	P30	88,5		T5K10	MC131; MC1460	1430 - 1570	SM30; S30T	P2F GX
	P40	90,8		T5K10	MC146	1320 - 1460	S6	GX
	P50	-		TT7K12	-	-	R4	GX
М	M10	93,6	жовтий	TT8K7	MC212	1590 - 1680	R1P; H13A	KM1
	M20	93,1		TT10K8-Б	MC221	1530 - 1630	GC415; H13A; SH; GC015	KM1
	M30	91,8		BK10- XOM	-	-	S6; H10F	-
	M40	-		TT7K12	-	-	R4	-
К	K01	-	червоний	BK3; BK3M	MC301	1760 - 1940	H05	-
	K05	93,8		BK6-М	MC306	1665 - 1835	-	KM1
	K10	93,4		BK6-OM	MC313; MC3210	1505 - 1655	H10P; GC310	KM1; K20
	K20	88,5		BK6	MC318 MC321	1575 - 1725 1450 - 1600	SMA; HBA; H20	KM1; K20
	K30	87,5		BK8; BK8M	-	-	H20; HBA	-
	K40	87,5		BK15	-	-	-	-

Галузі рекомендованих твердих сплавів, що відповідають вимогам ГОСТ 3882-74 та ТУ 48-19-307-87, наведені в табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Рекомендовані області застосування твердих сплавів

Марка сплаву ГОСТ 3882-74 (ТУ 48-19-307-87)	Галузь застосування	
	основна група	підгрупа
1	2	3
T30K4 T15K6, (MC111) T14K8, (MC121) TT20K9, TT21K9, (MC137) T5K10, TT10K8-Б, (MC131) T5K12, TT7K12, (MC146) TT7K12	P	P01 P10 P20 P25 P30 P40 P50

Продовження табл.3.10

1	2	3
ВК60М, (МС313) ВК6М, ТТ8К6, (МС211) ТТ10К8-Б, МС221, (МС321) ВК10-М, ВК10-ХОМ, ВК8 ВК10-ХОМ, ТТ7К12, ВК15-ОМ, ВК15-ХОМ, (МС241, МС146)	М	М05 М10 М20 М30 М40
ВК3, ВК3-М, (МС301) ВК6-ОМ, ВК6-М, (МС306) ТТ8К6, ВК6-М (МС312, МС313) ВК4, ВК6, ВК8, ТТ8К7, (МС318, МС321) ВК8, ВК15, (МС347)	К	К01 К05 К10 К20 К30 К40

Примітка. Зносостійкість сплавів зростає знизу вгору, міцність – навпаки

За допомогою рекомендацій, наведених у табл. 3.6–3.10, можна швидко й ефективно підібрати марку твердого сплаву для різання практично будь-якого оброблюваного матеріалу в конкретних (заданих) умовах або визначити галузь раціонального використання того чи іншого твердого сплаву.

Примітка. Тверді сплави серії МС випускаються на Московському комбінаті твердих сплавів (МКТС) за технологією фірми «Sandvik Coromant». Позначення сплаву складається з лігер МС і тризначного (для пластин без покриттів) або чотиризначного (для пластин і покриттям карбідом титану) числа: перша цифра відповідає галузі застосування сплаву за класифікацією ISO (1 – обробка матеріалів, які дають зливну стружку; 2 – галузь обробки, яка відповідає галузі М; 3 – обробка матеріалів, які дають стружку надлому); друга і третя цифри характеризують підгрупу застосовності; четверта цифра – наявність покриття

Щодо безвольфрамкових твердих сплавів, які застосовують як матеріали, що не мають у своєму складі дефіцитних елементів, з їх дещо більшою, ніж у вольфрамомістких твердих сплавів, теплостійкістю, меншою схильністю до адгезії з оброблюваним матеріалом, можна відмітити, що вони цілком відповідають галузям застосування для ТН20 Р01–Р20 (чистова і

напівчистова обробка) і для КНТ16 Р20–Р30 (напівчистова і легка чорнова обробка).

БТВС особливо ефективні при обробці заготовок з великою площею оброблюваної поверхні за одну установку, коли припуск на обробку мінімальний, а різання здійснюється на відносно високих швидкостях різання з метою забезпечення високої чистоти обробленої поверхні й високої розмірної стійкості інструмента, тобто коли до обробленої деталі ставляється високі вимоги до точності розмірів та геометричної точності.

3.7. Основні тенденції вдосконалення твердих сплавів

На сьогодні номенклатура твердих сплавів постійно змінюється, причому останніми роками помітно підвищилася якість сплавів. Це пов'язано не лише з використанням виробниками більш досконалого виробничого і контрольного устаткування, а також більш прогресивних технологій, а й з необхідністю вирішення усе ще складної та актуальної проблеми обробки різанням важкооброблюваних матеріалів, наприклад, корозійностійких, жаро- і високоміцних матеріалів. Одним із перспективних шляхів вирішення цієї проблеми є застосування твердих сплавів групи ВК із осободрібнозернистою (розмір зерен до 1 мкм) і тонкою (ультрадрібнозернистою) гранулометричною (розмір зерен 0,2–0,5 мкм) структурами, так званих мікронних однокарбідних твердих сплавів. Ці сплави характеризуються підвищеною твердістю, в'язкістю, міцністю та зносостійкістю, також ефективні при обробці як із низькими, так і з високими швидкостями різання. У тяжких умовах різання (наприклад, обробка жароміцних сплавів) не лише звичайні, а й дрібнозернисті тверді сплави швидко зношуються, виникають відколи різальної кромки, зокрема і через «приварювання» карбиду вольфраму до стружки. У мікронних твердих сплавах утримання карбиду вольфраму кобальтом значно вище. Застосування мікронних твердих сплавів дозволяє також використовувати різальні пластини з більшими передніми кутами, що поліпшує умови обробки в'язких матеріалів, у тому числі й сплавів із високим вмістом

титану. Однокарбідні тверді сплави з тонкою структурою забезпечують і меншу шорсткість обробленої поверхні.

Примітка. Двокарбідні тверді сплави групи ТК через їхню підвищену крихкість із зерном дрібного та особливо дрібного розміру не виготовляють.

Використання твердих сплавів ультра- й осободрібнозернистої структури під час виробництва різального інструменту дозволяє при заточуванні й доведенні інструмента одержати радіус округлення різальних кромки у межах $r=5-10$ мкм і менше, що цілком порівнянно з радіусом округлення для інструменту з вуглецевих інструментальних і швидкорізальних сталей. Крім того, такі сплави мають більш високу однорідність зерен за об'ємом, що робить ультра- й осободрібнозернисті сплави найбільш придатними для виготовлення дрібнорозмірного цільнотвердосплавного інструменту (свердел, кінцевих фрез, різенарізного інструмента, наприклад, мігчиків та ін.) і протяжок. У наш час західні виробники різального інструменту рекомендують використовувати інструмент із ультра- й осободрібнозернистих сплавів для обробки високоміцних чавунів, загартованих сталей, сплавів на основі нікелю, титану і молібдену, висококремнієвих алюмінієвих сплавів, скло-, вугле- і боропластиків.

Мікронні тверді сплави вдосконалюють застосуванням принципово нових технологій їх виробництва на основі використання субдрібнозернистого вихідного зерна, сполучення процесу синтезу і гарячого пресування, введення додаткової операції доушільнення структури сплавів на спеціальних установках газостатичного пресування.

Удосконалювати тверді сплави, у т.ч. і групи ТК, можна також шляхом введення під час їх виготовлення у відносно невеликих кількостях (до 2%) різних легуючих добавок (карбіду танталу, карбіду хрому та ін.), які гальмують зростання зерна карбіду вольфраму при спіканні й сприяють одержанню сплавів з досить дрібнозернистою структурою, в результаті чого істотно підвищується не тільки міцність, але й зносостійкість твердого сплаву. На сьогодні отримані сплави, що застосовуються для різання сталі з великими ударними навантаженнями.

Твердий сплав Т4К8, що містить 2% карбїду танталу, призначений для заміни стандартного сплаву Т5К10. Межа міцності його при вигині 1600 МПа, у той час як у сплаву Т5К10 він становить 1421 МПа (див. табл. 3.1). Гранична пластична деформація (в'язкість) Т4К8 дорівнює 1,6%, а у сплаву Т5К10–0,4%.

Сплав Т4К8 більшою мірою, ніж сплав Т5К10, чинить опір ударним навантаженням і може застосовуватися при чорновій токарній обробці сталевих виливків при швидкості різання 30–70 м/хв, глибині різання до 40 мм і подачі в межах 1–1,2 мм/об. У цих умовах стійкість інструмента, оснащеного сплавом Т4К8, в 1,5–2,0 раза вища за стійкість інструмента, оснащеного сплавом Т5К10.

При вдосконаленні твердих сплавів установлено, що карбїд хрому діє на властивості вольфрамкобальтових сплавів аналогічно карбїду танталу. Добавка 0,5% карбїду хрому чинить таку саму дію, як і добавка 2% карбїду танталу. Зносостійкість висококобальтових дрібнозернистих сплавів при додаванні карбїду хрому збільшується. Добавка карбїду хрому порівному впливає на межу міцності при вигині сплавів з однаковим вмістом кобальту: у сплаві з 6% кобальту введення до 1 % (за масою) карбїду хрому знижує межу міцності при вигині, у сплаві з 10% кобальту добавка карбїду хрому не викликає зміни межі міцності при вигині, а в сплаві з 15% кобальту навіть підвищує межу міцності порівняно з аналогічним сплавом типу ОМ. З урахуванням цих особливостей випуск сплавів, легування карбїдом хрому, обмежений марками ВК10–ХОМ та ВК15–ХОМ. Легування сплавів карбїдом хрому збільшує їхню твердість і міцність при підвищених температурах.

Найбільш радикально вдосконалюються БВТС. Необхідно відзначити, якщо в країнах СНД випуск БВТС становить не більше 1% від загального обсягу твердих сплавів, у Західній Європі і США використовують 2–5% БВТС, то в Японії – до 30–35%.

У світовій практиці на сьогодні виробляють БВТС, головним чином, на основі Ti , $TiCN$ і $TiC-TiN$ з різними варіантами зв'язок, найчастіше – нікель-молібденовою.

Для підвищення пластичності й опірності руйнуванню при термоциклічних навантаженнях БВТС додатково легують карбідами Mo, V, Ta, Nb, Zr, Al, Cr, а також W. Розглядається також можливість виробництва БВТС на основі боридів перехідних металів IV – VI груп Періодичної системи і, зокрема, TiB та TiBq.

Ефективність БВТС при риванні значною мірою визначається складом і властивостями зв'язки. Під час виробництва БВТС для її зміцнення до складу зв'язок вводять Fe, Cr, Al, W, Ti, Si та інші елементи. Наприклад, при легуванні БВТС алюмінієм відбувається утворення субмікроскопічної фази NT(Ti,Al), яка виконує роль своєрідного фазового зміцнювача. В результаті відбувається зміцнення зв'язки, зростає твердість сплаву без зниження його міцності. Маловольфрамовий твердий сплав ТВ4 (89HRA, $\sigma_z=1,3$ ГПа) на основі TiCN з нікель-молібденовою зв'язкою, легованої вольфрамом, має підвищену міцність і призначений для чорного точіння та фрезерування сталей (P20–P30). У світовій практиці використовують БВТС із вмістом зв'язки в межах 5–25% (за вагою).

Фірма «Sumitomo» (Японія) розробила серію БВТС, які повністю витиснули вольфрамомісткі тверді сплави для операцій чистового і напівчистового точіння сталей (P01–P20). Зокрема, сплав T12A (HV=1580, $\sigma_z=1,65$ ГПа) застосовується для напівчистового точіння і фрезерування конструкційних сталей на феритній основі з $v=100\text{--}300$ м/хв і $v=150\text{--}200$ м/хв, відповідно, а також для точіння ($v=60\text{--}250$ м/хв) і фрезерування ($v=60\text{--}120$ м/хв) нержавіючих сталей. Найбільш вдалим у цій серії є сплав T25A (HV=1520; $\sigma_z=1,85$ ГПа), призначений для напівчистового точіння конструкційних сталей ($v=50\text{--}200$ м/хв) і фрезерування ($v=120\text{--}180$ м/хв, $S_z=0,25$ мм/зуб).

Ще один напрямок удосконалення БВТС пов'язаний із введенням у їхній склад невеликої кількості (до 2%) карбідів WC і TaC з метою підвищення теплопровідності та зниження коефіцієнта термічного розширення, що помітно підвищує опірність БВТС руйнуванню в умовах термоциклічного навантаження і значно підвищує зносостійкість сплаву для важких операцій і,

зокрема, для чорнового фрезерування. Наприклад, фірма «Toshiba Tungaloy» (Японія) розробила гаму БВТС із добавками WC і TaC. Сплави 308 (TiCN+WC+TaC) і 350 ((Ti,W,Ta)CN) рекомендовані фірмою для оснащення інструменту, призначеного для напівчистового точіння сталей і чавунів, а також загартованих сталей і чавунів підвищеної міцності, аустенітних нержавіючих сталей і хромонікелевих сталей (P01–P20, K01-K20, M05-M10). Завдяки високій опірності руйнуванню при термоциклічних навантаженнях торцеві фрези, оснащені пластинами із твердого сплаву NS540 (Ti+TaC), який характеризується унікальним сполученням високої твердості (відповідає галузі застосування вольфрамомістких сплавів P10) і міцності (відповідає галузі застосування вольфрамомістких сплавів P40), можуть бути використані для фрезерування сталі (HВ160) з $v=170$ м/хв; $S_z=0,2$ мм/зуб; $t=4-5$ мм. При цьому допускається застосування МОР.

Фірма «Krupp Widia» (Німеччина) випускає БВТС Widiacerm TTi та TTi – 15, склад яких наведений у табл. 3.11, а фізико-механічні властивості в табл. 3.12.

Таблиця 3.11 – Склад сплавів Widiacerm TTi та TTi – 15

Твердий сплав	Вміст(у відсотках за вагою)								
	Ti	Ti	WC	Mo	Ta	Nb	VC	NT	Co
TTi	57	10	10	10	–	–	2	5,5	5,5
TTi – 15	35	15,1	18,2	7,1	9,27	1,03	–	5,2	9,1

Пластини із цих сплавів застосовуються для обробки нелегованих і легованих сталей і чавуну з кулястим графітом. Унікальна міцність цих сплавів на вигин дозволяє виготовляти з них пластини з невеликим радіусом округлення різальних кромки, що забезпечує підвищену точність розмірів деталей, які виготовляються, і зниження шорсткості оброблених поверхонь на 50%. Інструмент, оснащений пластинами з TTi, рекомендований фірмою для використання на чистових операціях зі швидкістю різання 450 м/хв, а пластини з TTi–15 – для напівчистового і чорнового точіння та фрезерування зі швидкістю різання до 350 м/хв. Із вітчизняних БВТС потрібно зазначити сплави ТМ

(ТМ1, ТМ3) на основі карбїду титану з добавкою карбїду нїбїю (Nb) на нїкель-молїбденовій зв'язці, що показують бїльш високу стїйкїсть (до двох разів), нїж сплав Т30К4.

Таблиця 3.12 – Фїзико-механїчні властивостї сплавів ТТї і ТТї – 15

Показник	Вольфрамовмісні ТС		БТВС	
	P10	P25	ТТї	ТТї – 15
			P01 – P10	P10 – P25
Гущина, г/см ³	10,6	12,5	6,1	7,1
Твердїсть HV	1550	1450	1700	1600
Мїцнїсть, МПа:				
-на вигин	1700	2200	2000	2300
-на стиск	4500	4600	5000	4600
Трїщиностїйкїсть K _{1с} , МПа· м ^{1/2}	8,2	10	8,5	9,8
Модуль Юнга, МПа	520	550	465	445
Коефїцієнт Пуассона	0,22	0,22	0,21	0,22
Теплопровіднїсть, Вт/(м· К)	25	456	10	11
Коефїцієнт термїчного розширення $\alpha \cdot 10^{-6}, K^{-1}$	7,2	6,7	9,5	9,4

3.7.1. Класи матерїалїв, що одержуються СВ-синтезом

Як вїдзначалося вище, метод СВС уперше був застосований для синтезу тугоплавких неорганїчних сполук. За наступнї роки коло продуктїв СВС настїльки розширилося, що навряд чи хто-небудь сьогоднї може назвати точну кїлькїсть сполук, матерїалїв і виробїв, якї були отриманї методом СВС у лабораторних або промислових умовах. Зрозумїло лише, що рахунок йде на сотнї. Тому в сучасному, дуже розширеному тлумаченнї, СВС – це процеси горїння будь-якої хїмїчної природи, що приводять до утворення дорогих у практичному вїдношеннї конденсованих продуктїв (матерїалїв). Середовище, здатне реагувати в режимї СВС, може бути найрїзномїтним: тверде, рїдке, газоподїбне, змїшане. Важливо лише те, щоб остиглий продукт горїння становив тверду речовину і викликав інтерес для подальшого використання.

Із усієї різноманітності процесів і продуктів СВС можна виділити такі основні класи:

Карбіди: TiC_x , ZrC_x , HfC , VC , NbC , Nb_2C , TaC , SiC , WC , Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , Mo_2C .

Бориди: TiB_2 , TiB , ZrB_2 , ZrB_{12} , HfB_2 , VB_2 , VB , NbB , NbB_2 , TaB , TaB_2 , CrB_2 , CrB , MoB , MoB_2 , WB_2 .

Нітриди: BN , TiN , ZrN , HfN , VN , NbN , TaN (кубічний), TaN (гексагональний), Ta_2N .

Силіциди: $TiSi$, $TiSi_2$, $ZrSi_2$, $ZrSi$, WSi .

Халькогеніди: $TiSe_2$, $NbSe_2$, $TaSe_2$, $MoSe_2$, WS_2 , WSe_2

Тверді розчини: $TiC-CrC_2$, $TiC-WC$, $TiC-TiN$, $NbC-NbN$, MoS_2-NbS_2 , $TaC-TaN$, $Nb_xZr_{1-x}C_yN_{1-y}$.

Інтерметаліди: Ni_3Al , $NiAl$, $TiAl$, $TiNi$, Cu_3Al , $TiCo$, $CoAl$, Nb_3Al .

Оксиди: алюмінати (YAl_3 , $MgAl_2O_4$), ніобіти ($LiNb_3$, $NaNb_3$, $BaNb_2O_6$), гранати ($Y_3Al_5O_{12}$, $Y_3Fe_5O_{12}$, $Cb_2Ga_5O_{12}$), ферити ($CoFe_2O_4$, $BaFe_2O_4$, $Li_2Fe_2O_4$), титанути ($BaTi_3$, $PbTi_3$), молібдати ($BiMo_6$, $PbMo_4$), надпровідна оксидна кераміка ($YBa_2Cu_3O_{7-x}$, $LaBa_2Cu_3O_{7-x}$).

Кераміки в системах на основі: BN , $TiC-TiB_2$, $TiB_2-Al_2O_3$, $AlN-BN$, $AlN-TiB_2$, $Si_3N_4-TiN-Si$, $SiAlO_xN_y$

Кермети: $TiC-Ni-Mo$, $TiC-Cr_3C_2-Ni$, $TiC-TiN-NiAl-Mo_2C-Cr$, $TiB-Ti$.

Список продуктів СВС постійно поповнюється не лише за рахунок нових хімічних складів, а й завдяки синтезу матеріалів з незвичайною структурою. Наприклад, останнім часом з'явилися повідомлення про синтез високопористих піноподібних матеріалів в умовах невагомості, про одержання нанокристалічних порошків та інше.

3.7.2. Наукові принципи керування процесом одержання компактованих СВС-продуктів

Створення наукових принципів керування процесами та продуктами є важливим і глобальним завданням, яке стоїть перед будь-якою новою проблемою та новим явищем.

Макрокінетичні характеристики процесів СВС, структура і властивості продуктів синтезу визначаються великою кількістю фізичних, технологічних і хімічних властивостей порошків вихідних реагентів та їхніх екзотермічних сумішей, початковою температурою, розміром шихтового брикету, тиском газу, складом і наявністю зовнішніх фізичних впливів, іншими параметрами, які властиві конкретному технологічному типу СВС-процесів. Тому для розроблення наукових принципів керування процесами і продуктами СВС необхідно установити закономірності впливу перелічених параметрів на структуру і властивості цільового продукту.

Технологія силового СВС-компактування, що складається у сполученні процесу горіння із пресуванням гарячих продуктів синтезу, є однією з найбільш перспективних у галузі СВС. Значний обсяг досліджень присвячений розробці нових матеріалів на основі карбиду і дибориду титану за технологією СВС-компактування. На сьогодні вже експериментально вивчений вплив дисперсності вихідного порошку титану (Д), густини реакційної суміші $Ti+C$ (Θ) і початкової температури суміші (T_0) на розмір зерна карбиду титану (r_k). У цих експериментах використовувалася сажа марки П804Т. Дисперсність титану змінювалася у широких межах: від 2–20 мкм (магнієрмічний порошок ТМ-2Т) до 1000–1500 мкм (здрібнена титанова губка за технологією гідрування-дегідрування ПТХ5-1).

Експериментально встановлено, що із зростанням розміру часток титану середній розмір карбідних зерен у компактованих продуктах синтезу збільшується від 2–3 до 20 мкм. Важливим параметром синтезу є густина вихідної суміші титану з вуглецем. Зміна її в діапазоні 0,3–0,65 при будь-якій дисперсності порошку титану приводить до екстремальної залежності розмір зерна карбиду титану. З рис. 3.10 бачимо, що в зазначеному інтервалі густина шихти розмір карбідних зерен змінюється вдвічі. Досить важливими для пояснення цих закономірностей сталися дослідження впливу попереднього підігрівання шихтових брикетів на розмір зерна карбиду титану. Прогрів шихти $Ti-C$ до $300^\circ C$ привів до здрібнювання зерен від 5–6 до 1–2 мкм.

Порівнюючи отримані результати з відомими даними про вплив D - Θ , T_0 на макрокінетичні параметри горіння, відзначено, що параметри, що збільшують глибину перетворення у фронті горіння, приводять до здрібнювання структури синтезованих продуктів. Навпаки, фактори, що приводять до утворення нестехіометричного карбїду титану, незважаючи на більш низьку температуру горіння, сприяють формуванню крупнозернистого

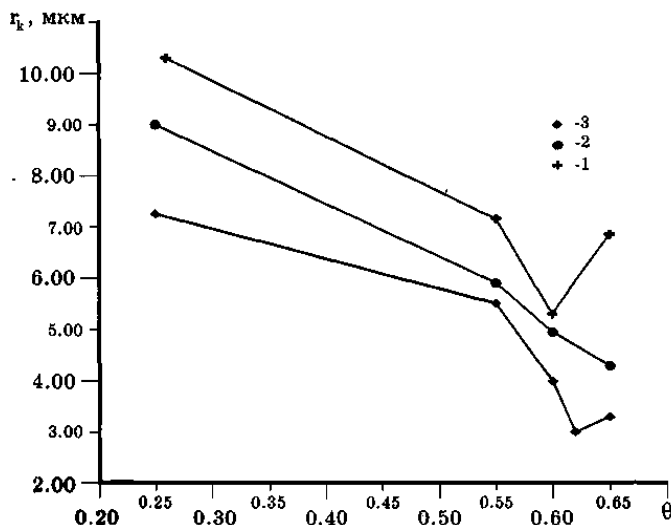


Рисунок 3.10 – Залежність середнього розміру зерна карбїдної фази у сплавах, отриманих СВС-компактуванням, від густини Θ шихтового брикету
 1 – Ti+C;
 2 – Ti+C+20 %NT;
 3 – Ti+C+Cr+10 %NT (СТІМ-35)

карбїду титану. Екстремум залежності r_k - Θ визначається максимумом швидкості, температури горіння, глибини перетворення у фронті горіння.

Висунута теза про структурування карбїду титану знайшла подальше підтвердження в дослідженнях, виконаних у Московському державному інституті сталі та сплавів у більш складних

багатокомпонентних системах на основі карбїду титану: TiC–Ni (СТІМ-2), Ti–C–Ni–Cr (СТІМ-35), Ti–C–Mo–Ni–TiN–NbC–Co–Cr–Al (СТІМ-5).

Наявність металу групи заліза, наприклад, нікелю, приводить до зменшення ступеня дефектності карбїду титану за вуглецем, оскільки при взаємодії нестехіометричного карбїду з розплавом нікелю надлишок титану розчиняється в нікелі. Це сприяє формуванню дрібнозернистого карбїду титану, тому що зерна стехіометричного карбїду титану менш схильні до коалесценції.

Монотонний характер залежностей $\gamma_k - \Theta$ для сплавів СТІМ-2, СТІМ-35 може бути пов'язаний з тим, що добавка нікелю підвищує стехіометричність первинних кристалів карбїду титану. Причому зі зростанням щільності шихтового брикету підвищується концентрація металу групи заліза в дрібнодисперсній підструктурі розплаву титану, нікелю (хрому) з вуглецем на ранній стадії структуроутворення (первинна кристалізація). На відміну від розглянутих вище параметрів СВС-процесу режими СВС-компактування істотно не впливають на розмір зерен продуктів реакції. У широкому інтервалі значень помітного впливу тиску компактування на середній розмір карбїдних зерен і пористість сплавів СТІМ-2, СТІМ-35, СТІМ-5 не виявлено. Однак порівняно з пористим матеріалом, отриманим без пресування, структура компактного продукту може подрібнюватися в 2 – 3 рази.

Вплив тиску компактування на розміри структурних складових проявляється, головним чином, на матеріалах, у яких відсутні сполучні металеві компоненти з більш низькою (порівняно з карбїдними і боридними складовими) температурою плавлення. Так, наприклад, збільшення тиску компактування гарячих продуктів синтезу сплаву TiC–TiB₂ (СТІМ-1Б/3) від 870 до 1750 кгс/см² привело до здрібнювання карбїдних зерен з 6,7 до 4,9 мкм.

Пошук ефективних способів керування макрокінетичними параметрами горіння суміші привів до необхідності прямого спостереження за стадійністю процесів, що проходять у хвилі горіння реальних СВС-систем у галузях порядку розміру часток реагенту, який плавиться. З цією метою можна ефективно вико-

ристовувати метод високочастотної кінозйомки, що дозволяє спостерігати процеси формування реакційної поверхні й хімічного реагування в різних системах. Подібні дослідження в 1991 р. були проведені в Московському державному інституті сталі таї сплавів у системах на основі Ti-C при використанні різних марок сажі.

Під час розроблення багатокомпонентних сплавів на основі карбіду титану необхідно враховувати взаємозв'язок макрокінетичних параметрів горіння вуглецевомістких сумішей зі структурою і властивостями синтетичних твердих інструментальних сплавів СТИМ, отриманих за технологією СВС-компактування. Тому важливим питанням, що стоїть перед технологом, є вивчення впливу марки вуглецевого матеріалу (сажі) на параметри горіння, структуру і властивості компактних сплавів.

Для силового СВС-компактування становить інтерес поєднання процесу з дією ударних хвиль і підривного навантаження. Динамічне компактування приводить до істотного здрібнювання структурних складових і формування нерівноважних станів.

Перспективним розвитком напрямку технології СВС-пресування є сполучення СВС із різними видами прокатки. Технологія СВС-прокатки у вакуумі, розроблена в Московському державному інституті сталі та сплавів, дозволяє одержати різні вироби у вигляді смуг, прутків, східчастих тіл обертання з керамічних, кераміко-металевих та інтерметалідних матеріалів. Різновидом цього технологічного напрямку є СВС-екструзія.

Силове СВС-компактування у цьому процесі завершується видавлюванням продукту через фільтру. Методом СВС - екструзії отримані електроди для наплавлення з безвольфрамових твердих сплавів, електроди для електроіскрового легування, заготовки для мікрофрез, свердел, східчастих валиків, високотемпературних нагрівачів тощо.

3.7.3. Матеріали, отримані за технологією СВС-компактування

Поєднання процесу СВС з обробкою тиском дозволило одержати цілий ряд безпористих кераміко-металевих матеріалів

різного призначення – синтетичні тверді інструментальні матеріали (СТІМ). Порівняно зі сплавами, отриманими методами порошкової металургії, СВС-сплави мають більш досконалу монокристалність зерен, підвищену чистоту за домішками і підвищену структурну міцність.

Залежно від поставлених завдань були розроблені кілька марок сплавів СТІМ, які відрізняються один від одного фізико-механічними характеристиками і поведінням у різних експлуатаційних умовах.

Розглянемо структуру і властивості нового дисперсно-твердінучого сплаву СТІМ-5 на основі карбідів титану і молибдену, яку отримали методом СВС (табл. 3.13).

Таблиця 3.13 – Властивості сплавів марки СТІМ

Марки сплаву	Густина, г/см ³	Середній розмір зерна, мкм	Твердість, HRA	Межа міцності на згин, кгс/мм ²	Галузь застосування
1	2	3	4	5	6
СТІМ-1Б/3	4,94	5–7	93,5	70–80	Різальні пластини, мішені
СТІМ-2	5,50	5–7	90	100–110	Зносостійкі захисні покриття
СТІМ-2А	6,40	1–2	87	160–180	Штамповий інструмент
СТІМ-3Б/3	5,37	3–4	92,5	80–100	Різальні пластини
СТІМ-3В	5,40	2–4	92,5	70–80	Окалиностійкі вироби
СТІМ-4	4,20	1–2	86	100–120	Жаростійкі до теплового удару
СТІМ-5	5,70	1–2	91,5	120–140	Різальні пластини

Істотним недоліком твердих сплавів системи TiC–TiN–Ti–Mo–..., виготовлених за традиційною технологією пресування-спікання, є складність одержання заданого вмісту азоту у зв'язку з інтенсивним деазотуванням поверхневих шарів карбонітрид-

них зерен при спіканні, що приводить згодом до втрати стабільності роботи інструменту. Одержання сплаву СТІМ-5 методом СВС дає можливість створення необхідного градієнта концентрації азоту і молібдену в зерні зносостійкої складової.

Уведення до вихідної екзотермічної суміші високодисперсного порошку нітриду титану (розмір частинок менше 1 мкм) у кількості 4 вагових відсотків дозволяє істотно модифікувати структуру продуктів синтезу, оскільки зародження і зростання карбідної фази з розплаву здійснюється на частинках нітриду титану. Гетерогенне зародкоутворення приводить до формування сферичних карбонітридних зерен. Причому центральна частина зерен збагачена азотом.

Для підвищення стабільності міцнісних властивостей до сплаву вводять у невеликих кількостях ніобій або карбід ніобію. Такий вплив ніобію пов'язаний зі збільшенням пластичності карбідної складової при розчиненні в ній ніобію, а також зі зміцненням сполучної фази.

Додаткове легування хромом і кобальтом ставить своєю метою підвищення зносостійкості при різанні зі швидкостями до 500 м/хв. Додавання нітриду титану до сплавів системи TiC-Ni-Mo перешкоджає їхній високотемпературній деформації незалежно від температури і величини напружень. Найбільш яскраво ефект підвищення міцності при повзучості проявляється при температурах близько 1000 °С. Для зміцнення зв'язки і підвищення жароміцності сплав карбіду титану легували алюмінієм.

У процесі СВС-компактування реалізується сильно нерівноважний стан, який може релаксувати у процесі роботи виробів, тому важливим завданням було вивчення процесів, що проходять у сплаві при додатковій термічній обробці, а також виявлення структурних факторів, які визначають підвищені експлуатаційні властивості твердого сплаву СТІМ-5.

У процесі синтезу сплаву СТІМ-5 використовують звичайно порошки марок: розсіяні порошки титану марки ПТОМ, ПТК; хром ПХ-1М; молібден ПМ-1 дисперсністю менше 40 мкм (середній розмір частинок 15 мкм); нікель ПНЕ-1 із середнім розміром частинок 50 мкм; кобальт електролітичний (менше 50

мкм); сажу марки П804Т. Екзотермічну суміш зазначених порошків, що містять 57 мас. % (Ti+C) стехіометричного складу і 4 мас. % нітриду титану, готують у кульовому млині при співвідношенні мас шихти і куль 1:3 протягом 25–30 год. Із приготовлених шихтових сумішей пресують брикети вагою 200 г, квадратним перерізу 70×70 мм, із відносною густиною 60 %. Синтез здійснюють у спеціальних реакційних прес-формах за технологічною схемою СВС-компактування при варіюванні часу затримки, часу витримки і тиску компактування.

Після одержання зразків методом СВС проводять додаткову термічну обробку у вакуумі при температурах 700, 900 та 1100 °С протягом 4 год. Як контрольні використали зразки сплаву СТІМ-5, охолоджені після СВС у воді та на повітрі.

Вимірювання високотемпературної твердості, швидкості звуку та зносостійкості при точінні конструкційних сталей проводяться після шліфування опорних площин заготовок та електроерозійного або їхнього електроіскрового різання на пластини стандартного розміру.

Високотемпературну твердість за Віккерсом HV визначали при навантаженні 18 Н. Час витримки під навантаженням – 30 с.

За критерій різальних властивостей була обрана критична швидкість різання, обумовлена при торцевому точінні циліндричної заготовки зі сталі 45 з пазом шириною 8 мм та русі різального інструменту від центра до периферії. Критична швидкість різання визначалася з такого співвідношення:

$$V_{кр} = \pi \cdot D_{кр} \cdot n,$$

де n – число обертів (хв^{-1}), $D_{кр}$ – критичний діаметр (м), що відповідає критичному зношуванню різальної кромки.

У свою чергу, критичним вважалось зношення, при якому відхилення від нульового рівня, обумовленого за допомогою мікрометра під час руху його уздовж поверхні оброблюваної заготовки, досягало величини 0,05 мм. За результатами 5–7 випробувань визначалася середня критична швидкість ($V_{кр}$) різання, характерна для певної серії зразків. Режимми випробувань були

такими: швидкість обертання оброблюваної заготовки $n=1000$ об./хв, глибина різання $t=1$ мм, подача $S=0,065$ мм/об.

Комплексне дослідження впливу часу затримки t_3 , часу витримки t_b , тиску компактування P_k і дисперсності порошку титану на структуру та властивості сплаву СТІМ-5 дозволило установити такі закономірності. На рис. 3.11 подані залежності швидкості звуку $C_{зв}$, густини Q і критичної швидкості різання $V_{кр}$ від часу затримки під час синтезу з використанням порошку титану дисперсністю менш 50 мкм і 90–160 мкм. Час витримки становив 20с, тиск компактування – 1160 кгс/см². З рисунку видно, що в досліджуваному діапазоні з ростом часу затримки для двох серій зразків відбувається зменшення щільності, а, відповідно, і критичної швидкості різання. Імовірно, це пов'язане з погіршенням пластичних властивостей матеріалу в результаті охолодження продуктів синтезу.

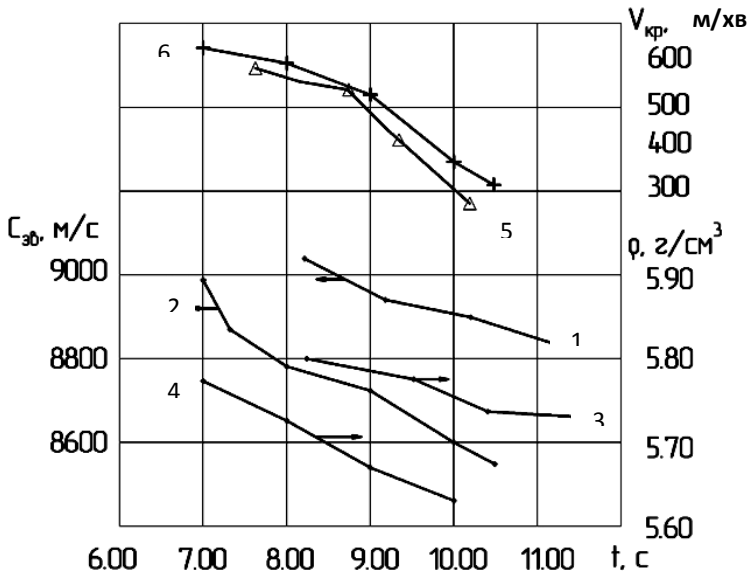


Рисунок 3.11 – Залежності швидкості звуку (1,2), густини (3,4) і критичної швидкості різання (5, 6) від часу затримки під час синтезу з використанням порошку титану дисперсністю менше 50 мкм (1, 3, 5) і 90 – 160 мкм (2, 4, 6).

Також необхідно відзначити, що сплав, отриманий із грубозернистого порошку титану, має меншу густину порівняно зі сплавом, вихідним компонентом якого був титан марки ПТОМ. Останній має більш високі різальні властивості при однаковій густині. В результаті структурних досліджень також встановлено, що середній розмір карбідних і карбонітридних зерен у досліджуваному діапазоні значень t_3 слабо залежить від параметрів синтезу і дорівнює 2,8 мкм для зразків, отриманих з титану із зерном 90–160 мкм і 2,1 мкм – із титану меншої зернистості – 50 мкм. Відзначимо, що структура сплаву, синтезованого з порошку ПТК, є більш однорідною за розміром структурних складових, ніж сплаву, отриманого з використанням титану марки ПТОМ. В останньому випадку значне число нітридних частинок утворює конгломерати, у зв'язку з чим у структурі найчастіше трапляються карбідні зерна без нітридних включень. І навпаки, продукти синтезу, отримані із шихти з порошком ПТК, в основному представлені відносно дрібними карбонітридними зернами з бікільцевою структурою.

Відповідно до викладеного можна припустити, що ймовірною причиною більш високих різальних властивостей зразків першої серії є однорідна структура і відсутність об'ємних скупчень (колоній), що складаються з «чисто» карбідних зерен.

На рис. 3.12 подані залежності густини Q сплаву СТІМ–5 і критичної швидкості різання $V_{кр}$ від часу витримки при синтезі t_3 з використанням дрібнозернистого (1, 3) і крупнозернистого порошку титану (2, 4). При цьому тиск компактування становив $1\ 160\ \text{кгс/см}^2$, а $t_3=8,2\ \text{с}$ – для сплаву, синтезованого із дрібнозернистого порошку, і $7\ \text{с}$ – для сплаву, синтезованого із крупнозернистого порошку. З рисунка бачимо, що в обох випадках величина густини залишається сталою зі збільшенням часу затримки з 5 до 35 с. Це свідчить про хорошу компактованість продуктів горіння. Однак критична швидкість різання при підвищенні часу витримки під з тиском зростає, що пов'язано зі зміною тонкої структури сплавів.

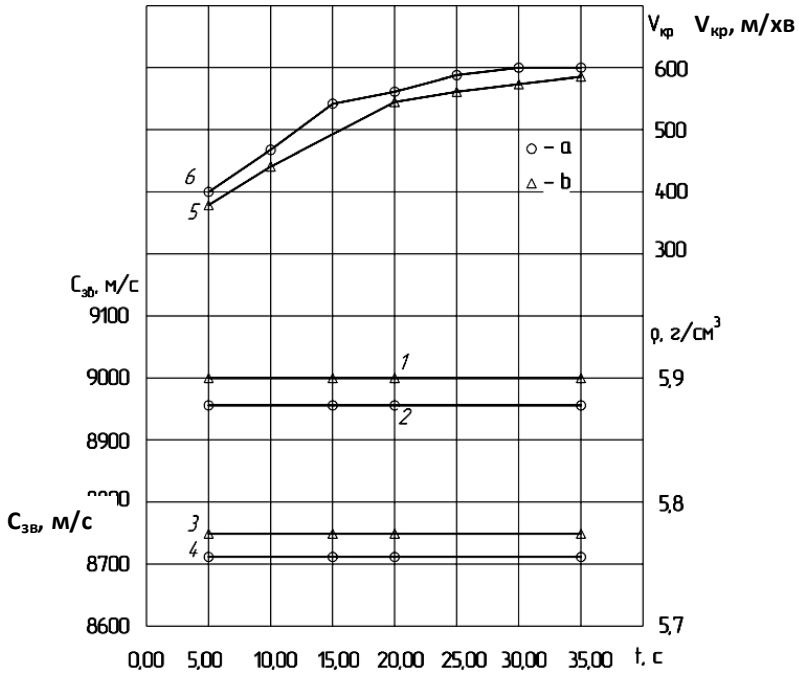


Рисунок 3.12 – Залежність швидкості звуку (1, 2), густини сплаву (3, 4) і критичної швидкості різання пластин СТІМ-5 (5, 6), отримані методом СВС із використанням титанового порошку марок ПТОМ (а) і ПТК (б), від часу витримки

Також можна відзначити слабкий вплив часу витримки на розмір тугоплавкої складової і на всі особливості структури сплаву.

Залежності густини сплаву СТІМ-5 (1, 2) критичної швидкості різання (5, 6) від тиску компактування під час синтезу шихтових партій з порошком титану марки НТО; (1, 3) і марки ПТК (2, 4) наведені на рис. 3.12. Час затримки обирався оптимальним на рис. 3.9 і становив 8,2 секунди для кривих 1, 3 секунд для кривих 2, 4. Час витримки – 20 секунд.

З рис. 3.13 видно, що густина зразків з дрібнозернистого титану при варіюванні тиску від 870 до 1740 кгс/см² спочатку збільшується, а потім криві виходять на насичення, досягши найбільших значень 5,8 г/см³. Залежно від густини дещо інші у

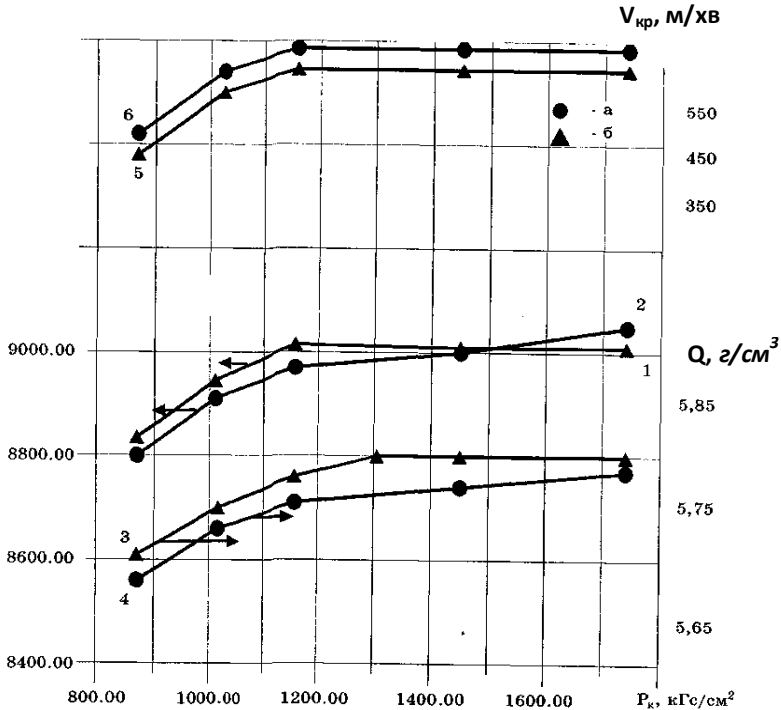


Рисунок 3.13 – Залежність густини сплаву (3,4) і критичної швидкості різання пластин СТІМ–5 (5, 6), отриманих методом СВС із використанням титанового порошку марок ПТОМ (а) і ПТК (б), від тиску компактування

випадку синтезу сплаву СТІМ-5 з порошку ПТК. Крива Q монотонно наближається до значень $5,8 \text{ г/см}^3$ інтервалі тисків від 1210 до 1740 кг/см^2 .

Різальні властивості обох серій досить сильно залежать від тиску компактування в інтервалі $870 - 1160 \text{ кг/см}^2$ і змінюються незначно при подальшому підвищенні тиску.

Виходячи із наведених результатів, можна зробити висновок, що структура і властивості сплаву СТІМ–5 багато в чому визначаються дисперсністю вихідного титанового порошку. Вплив на структуру та властивості безпосередньо технологічних параметрів синтезу, таких як тиск компактування і час витримки під цим тиском, у дослідженому діапазоні цих параметрів досить слабкий.

Оптимальний час затримки відповідає часу згоряння всієї шихтової заготовки і залежить від швидкості горіння шихтових брикетів. Швидкість горіння, що вимірюється мікротермопарним методом, для шихтових сумішей на основі ПТК і ПТОМ дорівнює рівною 1,2 та 1,0 см/с відповідно. Це визначило оптимальні значення часу затримки (7,0 секунди для шихти з титаном ПТК і 8,2 секунди – для шихти з титаном ПТОМ. Застосування магністермічного титанового порошку марки ТМ-1 з дисперсністю частинок порядку 10 мкм дозволило збільшити швидкість горіння на 20–25 %, істотно зменшити розмір карбідних зерен до 1 мкм і менше, підвищити фізико-механічні й експлуатаційні характеристики сплаву СТИМ-5.

Після охолодження у воді гарячих синтезованих продуктів структура матеріалу складається із зерен на основі Ті з розміром 2–3 мкм і нікель-молібденової зв'язки. Усередині зерен Ті знаходяться частинки другої фази розміром 0,1–0,2 мкм. Ці частинки розміщені як на стику карбідних зерен, так і у їхньому об'ємі.

Технологія СВС-компактування дозволяє одержувати також інварні високотемпературні композиції, жаростійкі інтерметалідні матеріали на основі NiAl, TiAl, резистивні мішені для магнетронного напилювання, алмазовмісні вироби для бурової техніки та ін.

Як уже відзначалося, різальні пластини зі сплаву СТИМ-5 відрізняються високою зносостійкістю при обробці конструкційних і легованих сталей. На рисунку рис. 8.6 наведена діаграма різальних властивостей сплаву марки СТИМ-5 порівняно з вольфрамівмісими сплавами типу МС 2210. Тут τ – час роботи різальної кромки при обробці сталі 45 до прийнятого критичного зношування по задній поверхні 0,5 мм при подачі $S=0,2$ мм/об., глибині різання $t=1$ мм; V , м/хв – швидкість різання.

Іншим характерним прикладом одержання нових матеріалів є синтез композиційних матеріалів, імпрегнованих надтвердим компонентом, зокрема алмазом.

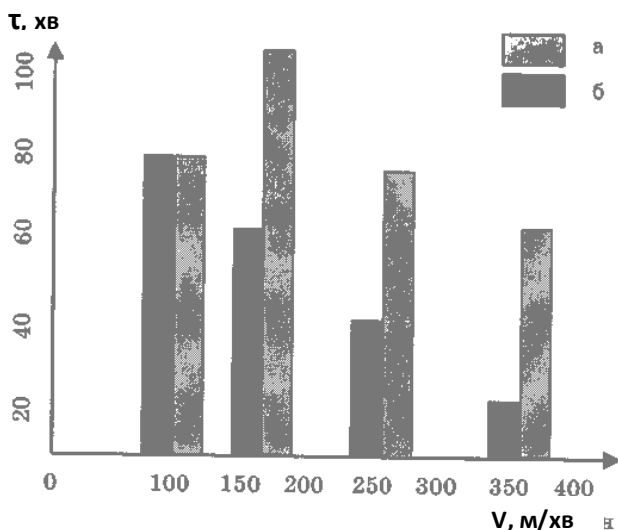


Рисунок 3.14 – Діаграма різальних властивостей (час різання до зношування 0,5 мм) сплаву СТИМ–5 (а) порівняно з вольфрамівмісними сплавами (б)

У розділі 5 буде розглянуто приклад, який демонструє унікальні можливості СВС, наукові і технологічні основи синтезу нових алмазовмісних матеріалів і виробів.

СВС-технологія порошків забезпечує виробництво високоякісних продуктів для одержання керамічних і кераміко-металевих, у тому числі тврдосплавних виробів. Найбільше застосування одержали порошки Ti , TiB_2 , TiN , BN , B_4C , Si_3N_4 , карбонітриду титану ($Ti_0C_xN_y$), TaC , NbC , SiC , $MoSi_2$, $TiSi_2$, AlN , TiH_2 . СВС-порошки халькогенідів MoS_2 , WS_2 , $MoSe_2$, WSe_2 , $Mo_xNb_{1-x}S_2$, $W_xNb_{1-x}S_2$, та ін. використовуються як тверде мастило.

Широкі застосування в промисловості знаходить на сьогодні продукція технології СВС-компактування. Вольфрамові тврдосплавні матеріали зарекомендували себе як конкурентоспроможні порівняно із кращими вітчизняними та зарубіжними аналогами. Різці з різальних непереточуваних пластин марки СТИМ за своїми експлуатаційними властивостями знаходяться на рівні матеріалів фірми "Сандвиг Короманд" (Швеція), фірми "Дуро" (Голландія). Однак СВС-сплави позитивно відрізняються

від аналогів меншою собівартістю внаслідок невисокої енергоємності й матеріаломісткості технологічного процесу їх виготовлення методом СВС-компактування.

На рис. 3.15 показана залежність вартості компактованих твёрдосплавних виробів від об'єму партії, що виготовляється. На цій залежності можна виділити три області. У першій області (а) вартість СВС-виробів об'ємом партії до 500 см^3 приблизно дорівнює вартості аналогічних виробів, отриманих за традиційною тех-

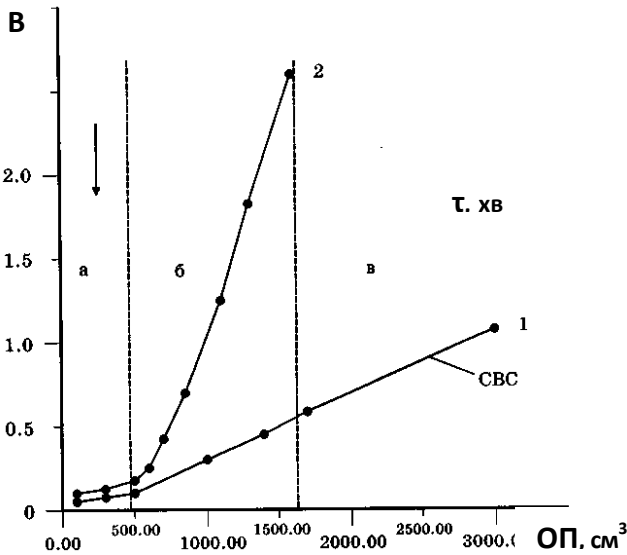


Рисунок 3.15 – Залежність вартості (В) виробу від об'єму партії (ОП), що виготовляється

нологією пресування-спікання (крива 2) і гарячого пресування. У другій області (б) об'ємів партії (від 500 до 1500 см^3) різниця вартості виробів, отриманих за різними технологіями, помітно збільшується. Нарешті, у третій області (в) об'ємів партії (більше 1500 см^3) технологія СВС (крива 1) – поза конкуренцією.

Поєднання СВС-процесу з екструзією привело до створення високоєфективної технології виробництва електродів для зварювання, електродугового наплавлення та електроіскрового легування металевих поверхонь. У додатку Д на слайдах 16 та

17 показані довговимірні, стержневі та дискові електроди зі сплавів групи СТИМ для електроіскрового легування, а також виробу зі зміцненою поверхнею (свердла, фрези).

Проте технологія СВС-зварювання сьогодні на відміну від інших напрямків у галузі СВС поки що ще не знайшла широкого промислового застосування. Однак уже отримані за технологією СВС-зварювання сполуки графіту з графітом, вольфраму з молібденом, вольфраму з графітом та інших матеріалів, які традиційними методами або зовсім не зварюються, або зварюються дуже важко, свідчать про велику перспективу цієї технології.

Ефективність технології газотранспортних СВС - покриттів відзначається також можливістю нанесення зносо- та корозійно-стійких покриттів на складнопрофільні поверхні виробів, у т.ч. на внутрішні поверхні труб. На відміну від інших методів технологія СВС-газотранспортних покриттів забезпечує формування градієнтних перехідних шарів між підкладкою і покриттям. Це дозволяє створювати адгезійноміцні сполуки, стійкі до різних температурних градієнтів.

Питання для самоперевірки

1. Охарактеризуйте відмітні від інструментальних сталей особливості твердих сплавів.
2. На які підгрупи за хімічним складом та галузями застосування діляться тверді сплави?
3. Охарактеризуйте особливості будови та одержання (виготовлення) однофазних твердих сплавів.
4. Охарактеризуйте особливості будови та одержання (виготовлення) двофазних твердих сплавів.
5. Охарактеризуйте особливості будови та одержання (виготовлення) трифазних твердих сплавів.
6. Охарактеризуйте вплив розмірів карбідів у формуванні основних (різальних) властивостей твердих сплавів.
7. Охарактеризуйте роль карбідів і сполучного кобальту у формуванні основних (різальних) властивостей вольфрамівмісних твердих сплавів.

8. Назвіть марки, хімічний склад, основні (різальні) властивості та галузі застосування вольфрамкобальтових (ВК) твердих сплавів.
9. Назвіть марки, хімічний склад, основні (різальні) властивості та галузі застосування титановольфрамкових (ТК) твердих сплавів.
10. Назвіть марки, хімічний склад, основні (різальні) властивості та галузі застосування титанотанталовольфрамкових (ТТК) твердих сплавів.
11. Назвіть марки, хімічний склад, основні (різальні) властивості та галузі застосування безвольфрамкових твердих сплавів (БВТС).
12. Назвіть галузі раціонального використання кожної групи твердих сплавів.
13. Назвіть галузі застосування дрібнозернистих й осободрібнозернистих твердих сплавів.
14. Охарактеризуйте класифікацію сучасних твердих сплавів за міжнародним стандартом ISO 513-75.
15. Охарактеризуйте методику визначення умов ефективного використання твердих сплавів відповідно до ISO 513-75.
16. Як змінюються зносостійкість і міцність твердого сплаву залежно від збільшення індексу підгрупи застосування по ISO 513-75?
17. Охарактеризуйте основні тенденції вдосконалення твердих сплавів. Наведіть приклади.
18. Наведіть приклади нових марок твердих сплавів, створених різними фірмами, й охарактеризуйте галузі їхнього ефективного використання.
19. Назвіть основні класи продуктів, отриманих методом СВС.
20. Як впливає щільність шихти на розмір зерен карбідної фази в сплавах, отриманих СВС-компактуванням.
21. Назвіть марки сплавів СТІМ, їхню характеристику, склад та галузі застосування.
22. Наведіть приклад порівняння різальних властивостей СТІМ і вольфрамомістких сплавів.

23. Як впливає об'єм (у см³) виробу (заготовки) на вартість пид час виготовлення традиційної технології пресування-спікання та технології СВС.

Слова та скорочення у розділі 3

БВТС – безфольввравомі тверді сплави.

Гетерогенний, гетерогенна система – макроскопічно неоднорідна система, що складається з різних за своїми властивостям частин, розмежованих поверхнями розділу.

ГШ – гаряче ізостатичне пресування.

Дифузія (від лат. diffusio – розлиття) – повільне проникнення однієї речовини (газу або рідини) в інше під час їхнього безпосереднього зігкнення або через пористу перегородку.

Ізостатичний (ізостазія – від грецьк. isostasios – однаковий за вагою) – ізостатична рівновага, рівноважний стан.

Ізотермічний процес – процес, що проходить при сталій температурі.

Імпрегнувати – насичувати розчином (розплавом) більш м'які матеріали, або просочувати.

Інварний (інвар – від лат. invariabilis - незмінний) – магнітний сплав Fe (основа) з NT (36 %), що має малий температурний коефіцієнт лінійного розширення.

ІСМАН РАН – Інститут структурної макрокінетики Російської академії наук.

Компактування – сполучення процесу горіння із пресуванням матеріалу відразу після закінчення СВ-синтезу, тобто пресування гарячих продуктів синтезу.

Реакції конденсації – історично сформована назва хімічних реакцій, у результаті яких із двох або декількох простих сполук утворюються більш складні (продукти, матеріали).

Конденсований стан речовини – рідкий або твердий агрегатний стан речовини.

Конденсований продукт (конденсація) – перехід речовини з газоподібного стану в рідкий або твердий.

Релаксація (від лат. *relaxatio* – ослаблення) – згасання якого-небудь процесу.

СВС – самопоширювальний високотемпературний синтез.

ВПД – система «верстат-пристрій-інструмент-деталь».

ЗНП – змінні непереточувані пластини.

МОР – мастильно-охолоджувальна рідина.

Стехіометрія (першооснова) – учення про кількісні співвідношення між масами речовин, що вступають у хімічну реакцію. Містить правила складання хімічних формул і рівнянь. Ґрунтується на законах Авогадро, Гей-Люссака, кратних відносин, збереження маси еквівалентів.

СТІМ – синтетичний твердий інструментальний матеріал (сплав).

СВЧ – установка струмів високої частоти.

Екзотермічна реакція – термічна реакція горіння з виділенням теплоти у навколишнє середовище.

4. РІЗАЛЬНА КЕРАМІКА

У країнах СНД і за рубежом інтенсивно проводяться роботи з розширення застосування металообробного інструменту, оснащеного різальними змінними багатогранними пластинами з кераміки різних марок.

Промисловість випускає чотири групи різальної кераміки:

оксидна (біла кераміка) – на основі чистого окису алюмінію Al_2O_3 в α -модифікації, відомої за назвою корунд;

оксидно-карбідна – на основі композиції Al_2O_3 -TiC (чорна кераміка);

оксидно-нітридна – на основі Al_2O_3 -TiN (кортиніт);

нітридна кераміка – на основі Si_3N_4 .

Основною особливістю різальної кераміки є відсутність зв'язувальної фази, що значно знижує ступінь її знемцнення при нагріванні у процесі зношування, підвищує пластичну міцність, що й визначає можливість застосування високих швидкостей різання. Це набагато перевищує швидкості різання інструментом із твердого сплаву. Якщо граничний рівень швидкостей різання для твердосплавного інструменту при точінні сталей і чавунів з тонкими зрізами і малими критеріями затуплення не перевищує 500 м/хв, то для інструменту, оснащеного різальною керамікою, цей рівень збільшується до 800–1000 м/хв.

Склад основних типів різальної кераміки і деяких фізико-механічних властивостей подані в табл. 4.1.

Основними перевагами застосування кераміки є не лише підвищення продуктивності та якості обробки, а й практично необмежені сировинні ресурси відносно дешевого вихідного матеріалу – глинозему і відсутність хімічної спорідненості з більшістю оброблюваних матеріалів. До складу оксидної кераміки не входять дефіцитні матеріали, тому пластинки з керамічного матеріалу набагато дешевші за пластинки із твердого сплаву. Основний недолік цих пластин – відносно невелика міцність, але твердість і теплостійкість їх досить високі.

Таблиця 4.1 – Склад, властивості та галузі застосування кераміки

Марки кераміки (спосіб одержання)	Склад (кольори пластин)	σ_z , ГПа	ρ , г/см ³	HRA (не менше)	Галузь застосування
1	2	3	4	5	6
I - Оксидна					
ЦМ 332 (холодне пресування)	Al ₂ O ₃ – 99% MgO - 1% (білий)	0,3– 0,35	3,85– 3,90	91	K01-K05
ВО-13 (холодне пресування)	Al ₂ O ₃ – 99% (білий)	0,45 –0,5	3,92– 3,95	92	P01-P10, K01-K05
ВШ-75 (гаряче пресування)	Al ₂ O ₃ (чорно-сірий)	0,25 –0,3	3,98	91–92	K01-K05
II - Оксидно-карбідна					
В-3 (гаряче пресування)	Al ₂ O ₃ – 60% TiC – 40% (чорний)	0,6	4,2	94	P01-P10
ВОК-60 і ВОК-63 (гаряче пресування)	Al ₂ O ₃ – 60% TiC– до 40% (чорний)	0,65 –0,7	4,2–4,6	94	P01-P05 K01-K05
ВОК-71 (гаряче пресування)	Al ₂ O ₃ – 70% TiC– до 30% (чорний)	0,7– 0,75	4,5–4,6	94	P01-P05 K01-K05
III - Оксидно - нітридна					
ОНТ-20 (кортиніт) (гаряче пресування)	Al ₂ O ₃ > 70% TiN – до 30% (Темно-коричневий)	0,64	4,3	90–92	K01-K05
IV - Нітридна					
Силініт-Р (гаряче пресування)	Si ₃ N ₄ , Y ₂ O ₃ (коричневий)	0,5-0,7	3,2-3,4	94	K10-K20

Продовження табл. 4.1

1	2	3	4	5	6
РК-30 (гаряче пресування)	Si ₃ N ₄ – 70%, Y ₂ O ₃ , TiC – до 30% (коричневий)	0,7–0,8	3,2–3,4	92 – 94	K10-K20

Твердість мінералокераміки за Роквеллом дорівнює 91–94 HRA.

Примітка. Твердість швидкорізальної сталі за цією шкалою дорівнює 79–82 HRA

Уперше у виробничих умовах керамічні інструменти були використані в 1932 р. на Ленінградському заводі ім. Ломоносова.

4.1. Оксидна та оксидно-карбідна різальна кераміка

Найбільш широковідома оксидна (чиста, або «біла») кераміка ЦМ 332 («мікроліт»), що складається в основному з оксиду алюмінію Al₂O₃ і легуючої домішки MgO (табл. 4.1). Мікроліт - це триста тридцять другий варіант матеріалу, отриманого в Московському хіміко-технологічному інституті ім. Менделєєва (МХТІ). Чисту оксидну кераміку одержують методом холодного пресування при кімнатній температурі, тобто Al₂O₃ пресують при 20°C у пластини різних форм і потім піддають спіканню. Ця технологія дуже економічна, вона покладена в основу виробництва 90% усіх різальних пластин з оксидної кераміки. Оксидна кераміка ВО-13 також становить матеріал на основі оксиду алюмінію з незначними домішками оксиду магнію і належить до І групи керамічних матеріалів (див. табл. 1.4). Її виготовляють методами порошкової металургії: холодним пресуванням із подальшим спіканням. Середній розмір зерна ВО-13 – до 4 мкм. Різці з пластинами із кераміки ВО-13 широко застосовують під час точіння нетермооброблених («сирих») сталей, сірих чавунів. Ефективність застосування цієї кераміки визначається її меншою вартістю порівняно з вартістю оксидно-карбідної кераміки.

Оксидно-карбідна (змішана, «металева», «чорна») кераміка (кермети), яка належить до II групи керамічних матеріалів, складається з оксиду алюмінію Al_2O_3 (до 70 %), TiC (до 40 %) та інших карбідів тугоплавких металів з деякими легуючими домішками. Пластини з оксидно-карбідної кераміки одержують гарячим пресуванням у графітових прес-формах. Цей процес більш трудомісткий, аніж процес одержання оксидної кераміки. Кермети за своїми експлуатаційними властивостями займають проміжне місце між твердими сплавами та оксидною керамікою. Додатки металевих сполук підвищують в'язкість і теплопровідність мінералокерамічних матеріалів, знижують тріщиноутворення і крихкість, однак при цьому знижується зносостійкість. Пластини з керметів застосовують для обробки ковких, вибілених чавунів, термopolіпшених, цементованих і загартованих (HRC 30–65) сталей.

Найбільш відомими у промисловості марками кераміки цієї групи є ВОК-60 і ВОК-63.

Вихідним матеріалом для виробництва оксидної та оксидно-карбідної кераміки є технічний глинозем, отриманий з гідрату глинозему шляхом прожарювання при температурі 1100–1200 °С і який містить у собі суміш двох модифікацій $\gamma - Al_2O_3$ із густиною 3,65 г/см³ і $\alpha - Al_2O_3$ із густиною 3,96 г/см³. Повний перехід в α -модифікацію досягається при $\Theta = 1400\text{--}1600^\circ\text{C}$.

Виробництво оксидної кераміки включає кілька етапів.

1. Прожарений до 1500–1550 °С глинозем піддають тонкому вібродрібненню протягом 1–2 год. до одержання частинок розміром 1 мкм (до 80 % в основній масі) при максимальному розмірі частинок 2 мкм. Отриманий продукт збагачують і сушать.

2. У сухий порошок оксиду алюмінію вводять модифікуючу добавку оксиду магнію (0,5–1,0 %), а потім роблять пластифікацію і холодне пресування отриманої суміші.

3. Спікають відпресовані пластини при температурі близько 1750 °С і короткочасному режимі відпалу з витримкою протягом 5–10 хв в області температурного максимуму.

4. Виконують механічну обробку заготовок пластин.

Установлено, що оптимальна дисперсія вихідного порошку для спікання оксидної кераміки становить 0,5–0,75 мкм. Ріст зерна α -глинозему (вміст фракції 0,5 мкм у межах 40–70%) іде досить повільно до $T=1600\text{--}1650\text{ }^\circ\text{C}$. При $T=1650\text{ }^\circ\text{C}$ розмір зерен спеченої кераміки становить 2–3 мкм. При $T=1680\text{--}1740\text{ }^\circ\text{C}$ починається стрімке зростання кристалів, їхні розміри можуть досягати 30–50 мкм, і змінюється їх конфігурація: кристали витягуються, приймають подовжену форму. Таке протікання рекристалізації характерно, наприклад, для тонкомолотого глинозему ГО.

Надійність пластин під час різання досягається завдяки не лише високим вимогам до технології їхнього виготовлення, але й до вихідної сировини – глинозему та легуючих домішок: карбід титану, оксиду цирконію, нітриду кремнію та ін. Питанню якості сировини виготовлювачі відводять значну роль.

Керамічну сировину піддають випробуванням за встановленою методикою і насамперед визначають: хімічну чистоту (забруднення глинозему сполуками Na_2O , SiO_2 та CaO неприпустимо); вологість; площу поверхні зерен, яка характеризує активність матеріалу при спіканні і дозволяє оцінювати передбачвану зернистість; спресованість. На основі цих випробувань визначаються умови переробки глинозему.

Уведення в глинозем легуючих добавок різко змінює перебіг процесу рекристалізації. Легуючі добавки можна розділити на три групи: сповільнювачі, прискорювачі та проміжні. Сповільнювачі рекристалізації – оксиди магнію, кремнію, заліза, кальцію, натрію, цирконію. Оксид магнію MgO є дуже ефективним сповільнювачем процесу кристалізації. Введення навіть сотих часток відсотка оксиду магнію різко припиняє ріст кристалів. Механізм гальмування росту кристалів при введенні оксиду магнію можна подавати в такий спосіб. Оксид магнію, розподілений у порошку α -глинозему, адсорбується на гранях кристалічних агрегатів. Адсорбція оксиду магнію йде інтенсивніше на гранях кристалів, які володіють великою енергією росту. Під час

нагрівання порошку оксид магнію реагує з оксидом алюмінію й утворює на поверхні зерен шпинелеву оболонку, більш щільну на одних гранях і менш щільну на інших. Ця шпинелева оболонка надалі сповільнює ріст кристалів і обумовлює дрібну та ізометричну форми зерен.

На якість різальних пластин з кераміки впливає не лише середній розмір зерна, а й гранулометричний склад: чим дрібніша зернистість, тим вища зносостійкість. Найбільш часто зустрічається розмір зерен приблизно 2,0 мкм, а зерен, розмір яких перевищує 6 мкм, практично немає. Міцність кераміки залежить від середнього розміру зерна. Наприклад, для оксидної кераміки міцність знижується від 3,80–4,20 ГПа до 2,55–3,00 ГПа при збільшенні розмірів зерен відповідно від 2–3 до 5,8–6,5 мкм.

В оксидно-карбідної кераміки гранулометричний склад ще більш тонкозернистий. Середній розмір зерен Al_2O_3 в основному менше 2 мкм, а розмір зерен карбиду титану становить 1–3 мкм. При високій температурі, що діє в умовах різання, твердість пластин з оксидної і оксидно-карбідної кераміки в 2–2,5 раза вища, ніж у найбільш зносостійких марок твердих сплавів, таких як Т30К4, ВК3, ВК3М та ВК6-ОМ.

Режим спікання дуже впливає на кінцеві властивості кераміки. Оптимальна температура спікання кераміки залежить від дисперсності вихідного порошку, наявності в ньому домішок і тривалості нагрівання. При розмірі зерен порошку 0,5–1,0 мкм (40–70 % за масою) і наявності легуючої присадки (до 0,5–1,0% за масою) спікання пластин оксидної кераміки можливо при $\Theta=1710$ °С з витримкою протягом 5–10 хв. При збільшенні температури до 1780–1820 °С витримка може бути скорочена до 1–2 хв.

У процесі спікання крупні зерна ростуть за рахунок дрібних. Якщо шихта містить занадто багато дрібних зерен, то відбувається інтенсивне зростання невеликого числа крупних зерен і середні розміри зерен кераміки виходять дуже великими. Якщо ж шихта містить багато крупних зерен, то матеріалу, необхідного для росту зерен, недостатньо, і під час спікання необхідна задана щільність кераміки не досягається. Сировину переробля-

ють у проміжний продукт – «масу». Спочатку дозують невеликі кількості легуючих добавок, які полегшують спікання і гальмують ріст зерен. При змішуванні ці добавки рівномірно розподіляються по всьому об'єму маси. Виходить водна суспензія, яку після введення з'єднувальних речовин піддають розпилувальному сушінню. Після цього процес переривається і в отриманій масі контролюють: хімічну чистоту, оброблюваність, середній розмір зерен та щільність. Щільність і залежна від неї залишкова пористість спечених пластин визначається тиском під час пресування. У процесі спікання відбувається усадка пресованих пластин з одночасним ростом окремих полікристалів у більші зерна. Досягнення високої щільності і тонкозернистої структури дуже складне тому, що ущільнення під час нагрівання можливе тільки завдяки росту зерен. Отже, необхідно одночасно гальмувати ріст зерен і у той же час домагатися високої щільності пластин.

Від розміру поверхневих зерен залежить стійкість мінералокерамічних інструментів. Структура поверхні мінералокерамічних сплавів оцінюється балами (рис. 4.1): I бал – найменші розміри зерен (0,75–1,5 мкм); II бал – основна маса – дрібні зерна (1,5–3 мкм) і невелика кількість середніх; III бал – основна маса – зерна середнього розміру (3–7 мкм) і невелика кількість крупних; IV бал – поверхня з крупними зернами (більше 7 мкм).

Якщо стійкість пластин I бала прийняти за 1, то стійкість пластин II бала буде 0,8, III бала – 0,2 і IV бала – 0,05.

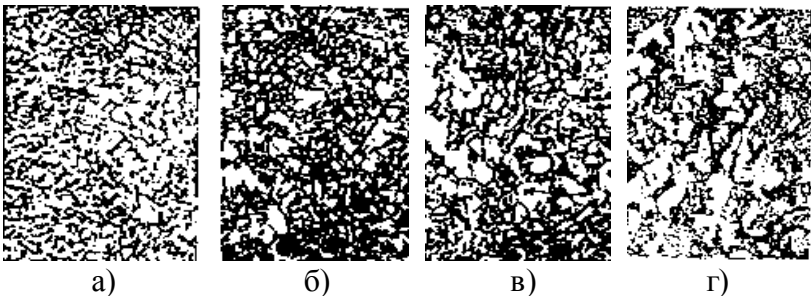


Рисунок 4.1 – Шкала величини поверхневого зерна мінералокераміки (x600): а – бал I; б – бал II; в – бал III; г – бал IV

Таким чином, зі збільшенням розмірів зерен стійкість мінералокерамічних пластин різко падає.

4.2. Оксидно-нітридна та нітридна різальна кераміка

До третьої групи мінералокераміки (оксидно-нітридну) входить кортиніт (ОНТ 20), який складається з $\text{Al}_2\text{O}_3 > 70\%$ і TiN до 30%. Вихідним матеріалом для одержання оксидно-нітридної кераміки є глинозем ГЛМК за ТУ 48-5-200-79 і нітрид титану за ТУ 88-021-82.

Такий керамічний матеріал має високу міцність на вигин і низький коефіцієнт термічного розширення (див. табл. 4.1), що вигідно відрізняє його від раніше розглянутих керамічних матеріалів. Це дозволяє з успіхом використовувати нітридотитановий мінералокерамічний інструмент при чорновому точінні, напівчистовому фрезеруванні чавуну, чистовому точінні складнолегованих і термооброблених (до HRC 60) сталей і сплавів.

Паралельно з удосконаленням керамічних матеріалів на основі оксиду створені нові марки різальної кераміки на основі нітриду кремнію Si_3N_4 (IV група). За хімічним складом таку кераміку, у свою чергу, можна розділити на дві підгрупи.

Матеріали першої підгрупи базуються на застосуванні нітриду кремнію, вміст якого становить до 90–95%. Для забезпечення високої щільності на остаточному етапі виготовлення цієї мінералокераміки застосовують спеціальні легуючі добавки (оксиди ітрію, цирконію, алюмінію та ін.) у кількості 5–10%. Активатори взаємодіють з нітридом кремнію з утворенням голчастих кристалів і простих та змішаних силікатів, відбувається також перерозподіл домішок, що супроводжується збільшенням теплопровідності й міцності. Такий керамічний матеріал має високу міцність на вигин (до $\sigma_t = 700$ МПа) і низький коефіцієнт термічного розширення. До цієї групи належить силініт-Р, створений у ППМ НАН України.

Друга підгрупа нітридокремнієвої кераміки, до якої в першу чергу належить РК-30, крім зазначених вище компонентів, додатково містить карбід титану в кількості до 30%. Такий ке-

рамічний матеріал має дещо більшу міцність на вигин, але разом з тим і трохи дещо твердість.

Відмінності в хімічному складі різних марок різальної кераміки на основі нітриду кремнію (див. табл. 4.1) необхідно враховувати при використанні такого інструменту. Наприклад, інструмент кераміки першої підгрупи (силініт-Р) кращий для обробки чавунів не лише при чистовому і напівчистовому точінні, а й при чорновому точінні та напівчистовому фрезеруванні, а другої (РК-30) — при чистовому точінні складнолегованих і термооброблених сталей та сплавів.

Кераміку на основі нітриду кремнію одержують методами гарячого пресування. Виготовлення кераміки на основі нітриду кремнію не вимагає застосування дефіцитних матеріалів, а також унікального або нестандартного технологічного обладнання. Як основну вихідну сировину використовують порошок нітриду кремнію β -модифікації із середнім розміром частинок 0,6–1,2 мкм, вироблений серійно в промислових умовах. Гаряче пресування виконують у багатомісних графітових матрицях.

Особливості силініта-Р визначаються специфічними властивостями кристалічної структури нітриду кремнію (Si_3N_4) і ковалентним типом зв'язку між атомами. Саме наявність твердих спрямованих зв'язків між атомами азоту і кремнію у ґратці обумовлює високу твердість, малий коефіцієнт лінійного розширення, стабільність фізико-механічних властивостей у широкому діапазоні зміни температури. З цієї самої причини в силініті-Р загальмована дифузія, що обумовлює його високу стійкість в умовах адгезійного і дифузійного зношування. Силініт-Р має підвищену енергію руйнування, або пов'язану із цією енергією тріщиностійкість, тобто в'язкість руйнування (коефіцієнт $K_{Ic} \approx 6\text{--}8 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$) порівняно з іншими різновидами оксидної кераміки (для I групи $K_{Ic} \approx 4,5 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$; для II – $K_{Ic} \approx 5,4 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$). За даними широких виробничих випробувань імовірність раптового виходу з ладу різального інструменту з нітридокремнієвої кераміки при напівчистовій обробці відповідає аналогічному показнику, характерному для твердосплавного інструменту.

Разом з тим мінералокерамічні матеріали особливо важливі для швидкісної обробки металів, тому що високі температури, які виникають у процесі різання, не чинять помітного впливу на зношування. Завдяки малій спорідненості з багатьма металами під час різання керамічними матеріалами виникають менші сили тертя, метал не «прилипає» до інструмента, якість обробленої поверхні поліпшується. Як уже було відзначено, недоліком мінералокерамічних матеріалів є підвищена крихкість. Межа міцності при вигині у мінералокераміки в 3–4 рази менша, ніж у металокерамічних твердих сплавів, і приблизно в 10 разів менша, ніж в інструментальних сталей (див. табл. 1.4). Це істотно обмежує галузь їхнього застосування. Найчастіше вони використовуються для чистої та напівчистої обробки сталі та чавуну.

4.3. Короткі рекомендації щодо вибору різальної кераміки

Рекомендації із галузей застосування і вибору різних марок вітчизняної кераміки наведені в табл. 4.1 і 4.2. Виходячи з конкретних умов обробки (стан обладнання, припуски на обробку, вимоги до якості та ін.), у кожному випадку варто коригувати застосування тієї або іншої марки кераміки аж до проведення порівняльних експрес – випробувань. Кераміка ЦМ-332 у наш час замінюється керамікою В-13.

Різальну кераміку переважно рекомендують для чистої та напівчистої обробки сірих, ковких, високоміцних і вибілених чавунів, низько- і високолегованих сталей, зокрема поліпшених, термооброблених (HRC до 55-60), кольорових сплавів, конструкційних полімерних матеріалів (галузі застосування K01-K05, P01-P05 та K10-K20 (див. табл. 4.1)). У зазначених умовах інструмент, оснащений пластинами з різальної кераміки, помітно перевершує за працездатністю твердосплавний інструмент.

Таблиця 4.2 – Рекомендації з вибору марки кераміки

Оброблюваний ма- теріал	Твердість	Кераміка для обробки		
		тонкої	чистової	напівчистової
1	2	3	4	5
Чавун сірий	НВ 143 - 289	В-13, ВЩ, ЦМ-332	ВО-13, ВЩ, силініт-Р, ЦМ-332	ВО-13, ВЩ, силініт-Р, ЦМ-332
Чавун ковкий	НВ 163 - 269	ВЩ, ВО-13	ВЩ, ВО-13, В-3	ВЩ, ВО-13, В-3
	НВ 170 - 369	ВЩ, В-3, ВО-13	У-3, силініт-Р, ВЩ, ВО-13	У-3, силініт - Р ВЩ, ВОК-60
Чавун вибілений	НВ 400 - 650	ВОК-60, кортиніт, В-3	ВОК-60, В-3, кортиніт, Силініт-Р	ВОК-60, В-3, кортиніт, Силініт-Р
Сталь якісна кон- струкційна	НВ 160 - 229	ВО-13, ВЩ, ЦМ-332	ВО-13, ВЩ, ЦМ-332	ВО-13, ВЩ, ЦМ-332
Сталь конструкцій- на легована	НВ 179 - 229	ВО-13, ВЩ, ЦМ-332	ВО-13, ВЩ, ЦМ-332	ВО-13, ВЩ, ЦМ-332
Сталь поліпшена	НВ 229 - 380	ВЩ, ВО-13, ВОК-60, Силініт-Р	ВЩ, ВО-13, ВОК-60, Силініт-Р	ВЩ, ВО-13, ВОК-60, У-3
Сталь цементована загартована	HRC 36 - 48	ВОК-60, В-3, кортиніт	ВОК-60, В-3, РК - 30, кортиніт	ВОК-60, В-3, РК - 30, кортиніт
	HRC 48 - 57	ВОК-60, кортиніт	ВОК-60, В-3, РК - 30, кортиніт	ВОК-60, РК - 30, кортиніт
	HRC 57 - 64	ВОК-60, В-3, ВОК-71, кортиніт	ВОК-60, В-3, ВОК-71, РК - 30, кортиніт	ВОК-60, В-3, ВОК-71, РК - 30, кортиніт

Продовження табл. 4.2

1	2	3	4	5
Кольорові метали на основі міді	НВ 60 - 120	В-3, кортиніт	В-3, кортиніт	В-3, кортиніт
Сплави на основі нікелю	-	силініт-Р, кортиніт	силініт-Р, кортиніт	силініт-Р, кортиніт

Застосування керамічного інструменту при обробці з підвищеними значеннями перерізу зрізу ($f=t \cdot S$) і при переривчастому різанні, особливо під час використання оксидної різальної кераміки, різко знижує його ефективність унаслідок високої ймовірності раптової відмови через крихке руйнування різальної частини інструмента. Саме ця обставина багато в чому пояснює порівняно низький обсяг використовуваного в промисловості України керамічного інструменту (до 0,5% від загального обсягу різального інструменту). Разом з тим для розвинених країн Заходу цей обсяг становить від 2 до 5%.

Дослідження і досвід упровадження інструментів із пластинами з різальної кераміки різних марок дозволяють рекомендувати такі галузі її застосування:

- *оксидна чиста (біла) кераміка* ВО-13, ЦМ-332, ВШ-75 – для чистової і напівчистової обробки нетермооброблених сталей, сірих чавунів з високими швидкостями різання (до 800–1000 м/хв);

- *оксидно-карбідна (змішана, чорна) кераміка* ВОК-60, ВОК-63, В-3 та оксидно-нітридна (кортиніт ОНТ-20) – для чистової, напівчистової і переривчастої обробки ковких, високоміцних, вибілених, модифікованих чавунів, сталей, загартованих до HRC 30- 55 і HRC 56 - 65; крім того, кераміка В-3 та ОНТ-20 рекомендується для обробки кольорових металів на основі міді;

- *нітридна кераміка* – для обробки чавунів при чистовому, напівчистовому і чорновому точінні та напівчистовому фрезеруванні (силініт-Р), а також для обробки складнолегованих і термооброблених сталей і сплавів при чистовому точінні (РК-30).

Силініг-Р і кортиніг ОНТ-20 рекомендуються також для обробки сплавів на основі нікелю, що належать до важкооброблюваних матеріалів.

Промисловість випускає мінералокераміку у вигляді шліфованих змінних багатограних пластин, геометричні параметри, форма та розміри яких регламентуються ДСТУ 25003-81 і ТУ 19-4203-125-81. Пластини виготовляють з від'ємними фасками по периметру з двох боків. Розмір фаски $f_{\phi} = 0,2-0,8$ мм, кут її нахилу γ_f від'ємний – від -10° до -30° . Фаска необхідна для зміцнення різальної кромки.

Припустиме зношування керамічних пластин набагато менше значення цього параметру зношування, прийнятого для твердосплавних пластин. Максимальне зношування по задній поверхні не повинне перевищувати $0,3-0,5$ мм, а при чистових операціях – $0,25-0,30$ мм.

Призначаючи режими різання для кераміки, дотримуються таких рекомендацій:

1. Найкращою є квадратна форма пластини з максимально можливим кутом загострення β і найбільш можливим радіусом біля вершини пластини r_B .

2. Ширину фаски f_{ϕ} обирають залежно від твердості оброблюваного матеріалу: чим твердіший оброблюваний матеріал, тим ширина фаски більша.

3. Швидкість різання потрібно призначати максимально припустимою, виходячи із жорсткості системи ВПД і характеристик обладнання.

4 Заготовки, які обробляються пластинами з різальної кераміки, повинні мати на вході й виході різця фаски, ширина яких перевищує припуски на обробку, а також канавки в місцях переходу від циліндричної поверхні до торцевої.

4.4. Основні тенденції вдосконалення мінералокераміки

Останнім часом з'явився новий клас інструментальних матеріалів, які віднесені до групи різальної кераміки з підвищеними показниками за міцністю, в'язкістю, тріщиностійкістю, що дозволяє впевнено говорити про помітне розширення галузі за-

стосування кераміки. За оцінкою фахівців у галузі розроблення і експлуатації керамічного інструменту використання нових типів різальної кераміки підвищеної міцності дозволить одержати техніко-економічний ефект, який порівнюється з ефектом, отриманим від застосування твёрдосплавного інструменту порівняно з інструментом, виготовленим зі швидкорізальної сталі.

На сьогодні для виробництва різальної кераміки в основному використовують оксиди алюмінію і нітрид кремнію, які є основою одно- або багатокомпонентних систем. Представником однокомпонентного матеріалу є оксидна біла кераміка. Біла кераміка має високу твердість, теплостійкість і зносостійкість, однак її вирізняють низькі міцність, теплопровідність, тріщиностійкість, порівняно велике значення коефіцієнта термічного розширення α (табл. 4.3).

Істотним недоліком кераміки на основі Al_2O_3 є її крихкість – чутливість до механічних і теплових ударних навантажень. Для усунення цього недоліку розроблений різний склад оксидної та оксидно-карбідної керамік.

Таблиця 4.3 – Зміна властивостей оксидної кераміки при додаванні в її склад різних сполук

Властивості	Al_2O_3	$Al_2O_3+ZrO_2$	Al_2O_3+TiC	$Al_2O_3 +$ ниткоподібний SiC
HV_{30}	2000	2000	2200	2400
E , ГПа	390	380	400	390
σ_i , МПа	350	600	700	від 600 до 800
K_{Ic} , МПа· м ^{1/2}	4,5	5,8	5,4	від 6 до 8
α : 10^{-6} , 1/К	7,5	7,4	7,0	—
λ , Вт/ (м· К)	30	28	35	35

Додавання до оксидної кераміки оксидів цирконію, карбідів титану та армування її «ниткоподібними» кристалами SiC істотно поліпшують її властивості (табл. 4.3). Зокрема, включення в кераміку на основі оксиду алюмінію моноклінного двооксиду цирконію ZrO_2 (до 5–10 %) викликає поліпшення структури і цим помітно підвищує її міцність. Позитивний результат досяга-

ється за рахунок переходу при охолодженні оксиду цирконію з тетрагональної модифікації в моноклінну. Цей процес супроводжується збільшенням об'єму зерен цирконію на 3–5% і появою навколо них полів стискальних напружень. Це приводить до того, що формовані в об'ємі матеріалу мікротріщини при потрап-лянні в цю зону гальмують або взагалі припиняють свій розви-ток, тобто істотно поліпшується такий дуже важливий для кера-мічних матеріалів показник, як тріщиностійкість (коефіцієнт K_{Ic}).

Необхідно зазначити, що низька тріщиностійкість керамі-чного сплаву є причиною формування фронту тріщин, які через відсутність пластичної з'єднувальної (зв'язки) не зустрічають бар'єрів, здатних загальмувати або зупинити їхній розвиток. Саме ця обставина і спричиняє один з недоліків оксидної кераміки – її відносно високу чутливість до різких температурних коли-вань (теплових ударів) і динамічних навантажень (ударів), ха-рактерних для переривчастого різання, наприклад фрезерування. Зазначене є головною причиною мікро- або макровикришувань різальної кераміки і контактних площадок інструменту вже на стадіях його працювання або початкового етапу сталого зношу-вання, що призводить до відмов інструменту через крихке руй-нування. Відзначений механізм зношування керамічного різаль-ного інструменту є переважним. Також саме тому не рекомен-дується, як правило, при різанні керамікою застосовувати охо-лодження.

Найбільше поширення у світовій практиці одержала кера-міка на основі 70% Al_2O_3 з додаванням до 30% TiC (чорна ке-раміка), яка має більшу міцність при вигині, досить високу трі-щиностійкість, менше значення коефіцієнта термічного розши-рення α (див. табл. 4.3). Одним із перспективних напрямків удо-сконалення кераміки на основі $Al_2O_3 - TiC$ є введення до її складу карбідів вольфраму і танталу, які стримують ріст зерен карбїду титану і підвищують міцність матеріалу. Іншим додат-ковим компонентом, який помітно поліпшує властивості чорної кераміки, є диборид титану TiB_2 .

Найбільш досконалою на сьогодні є оксидна кераміка, армована «ниткоподібними» кристалами SiC, яка помітно перевершує за фізико-механічними і теплофізичними властивостями білу і чорну кераміки (див. табл. 4.3 та 4.4). Як армуючий елемент для різальної кераміки найчастіше використовують ниткоподібні кристали карбіду кремнію SiC, які мають міцність до 4000 МПа. Наприклад, введення ниткоподібних кристалів SiC в оксидну кераміку підвищує твердість з HV 2000 до HV 2400, міцність при вигині з 350 до (600–800) МПа, збільшує коефіцієнт тріщиностійкості з $K_{Ic}=4,5$ до $K_{Ic}=6-8$. Останнє надзвичайно важливе з погляду зниження крихкості кераміки і розширення галузі її застосування. Установлено, що навколо ниткоподібних кристалів SiC формуються великі стискальні напруження, які є ефективним бар'єром для мікротріщин, що формуються та розвиваються в процесі експлуатації кераміки.

Ступінь підвищення міцності та твердості армованого керамічного матеріалу (композиційного типу) визначається великою кількістю факторів. Найбільший вплив чинять об'ємна частка, розміри (відношення довжини до діаметра) і властивості ниткоподібних кристалів. Тому одержання певних властивостей на межі розділу «матриця – волокно» в умовах недостатньо високої стабільності властивостей ниткоподібних кристалів при температурах спікання та їхньої хімічної взаємодії з матрицею визначають складність використовуваних технологій. Різальний інструмент з армованої кераміки на сьогодні є відносно дорогим і його застосування має економічну ефективність лише в певних галузях, зокрема, при обробці заготовок із важкооброблюваних матеріалів, наприклад, жароміцних нікелевих сплавів, тому що швидкості різання для керамічного інструменту при обробці таких сплавів у 4–5 разів перевищують швидкості різання (за тієї самої стійкості), звичайно використовувані для твердосплавного інструменту: 150–200 м/хв замість 40–50 м/хв.

Необхідно відзначити, що у наш час уже є промислові марки різальної кераміки, наприклад, такі, що випускаються фірмою «Krupp Widia» (табл. 4.4), міцність яких досягає рівня

$\sigma_f=1000$ МПа (табл. 4.5), що приблизно відповідає аналогічним показникам твердих сплавів Т30К4 і ТН20 (див. табл. 1.4).

При цьому твердість такої кераміки становить HRA 92-94, що перевершує відповідні показники зазначених марок твердих сплавів. Аналіз складу (табл. 4.4) і властивостей (табл. 4.5) різальної кераміки, що випускається фірмою «Krupp Widia», свідчить про досить широкі можливості варіювання властивостей і галузей застосування кераміки залежно від умов обробки.

Властивості кераміки досить сильно залежать також від технології виготовлення. Зокрема, найбільш задовільні властивості за міцністю мають керамічні пластини, отримані методом попереднього холодного пресування і подальшого гарячого ізостатичного пресування (ГІП), що забезпечує рівномірне додавання тиску і температури по всьому об'єму пресованої пластини, причому рівномірний тиск передається через оточення інертного газу.

Таблиця 4.4 – Гама марок різальної кераміки, яку випускає фірма «Krupp Widia» (Німеччина)

Тип кераміки	Склад	Позначення марки
Оксидна (біла)	96,5% Al_2O_3 + 3,5% ZrO	Widalox-G
	86% Al_2O_3 + 14% ZrO	Widalox-U
Оксидно-карбідна (чорна)	85% Al_2O_3 + 5% TiC + 10% ZrO ₂	Widalox-R
	70% Al_2O_3 + 30% Ti(C,N)	Widalox-H
Нігريدна	96% Si_3N_4 + 4% активатори	Widiant N1000
	91% Si_3N_4 + 9% активатори	Widiant N2000
Армована кераміка	75% Al_2O_3 + 8% ZrO ₂ + 17% SiC	Whiskerit

Таблиця 4.5 – Основні властивості різальної кераміки, яку випускає фірма «Krupp Widia» (Німеччина)

Властивості	Widalox				Widiant		Whiskerit
	G	U	R	H	N1000	N2000	
1	2	3	4	5	6	7	8
ρ , г/см ³	4,02	4,16	4,12	4,25	3,16	3,26	5,91
HV ₃₀	1730	1700	1730	1930	1600	1400	1800

Продовження табл. 4.5

1	2	3	4	5	6	7	8
σ_3 , МПа	700	800	650	620	900	1000	1000
σ_{-b} , МПа	5000	4700	4800	4800	5500	5000	5000
E, ГПа	38,0	41,0	39,0	40,0	30,0	28,0	40,0
K_{Ic} , МПа/м	4,5	5,1	4,2	4,5	7,5	7,0	7,0
λ , Вт/(м·К)	16	15	15	20	29	29	16
$\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/К	8,0	8,0	8,0	8,0	3,0	3,5	8,0

Застосування технології ГП дозволяє забезпечити високу щільність виробу (до рівня теоретичної) і виключає анізотропію властивостей у всьому об'ємі різальної пластини.

Результати узагальненого аналізу основних властивостей «міцність-твердість» різних марок інструментальної кераміки, що вже знайшли промислове застосування, подані на рис. 4.2.

Аналіз наведених результатів дозволяє відзначити таке. Область, у якій уміщаються властивості різних марок оксидної кераміки, приблизно описується колом із центром у точці, розташованій лівіше і вище, ніж для безвольфрамових і вольфрамокобальтових твердих сплавів. При цьому відзначається тенденція до превалювання марок з підвищеною твердістю (HRA 95 і вище) над марками з високою міцністю ($\sigma_1=700$ МПа). Таким чином, удосконалення оксидної кераміки відбувається одночасно у напрямку підвищення твердості та міцності.

Аналіз тенденцій розвитку керамічного різального інструменту свідчить про більш перспективи інструментів з різальної кераміки в найближчому майбутньому, причому збільшення загального обсягу випуску керамічного інструменту взаємозалежне з удосконаленням технології виробництва, оптимізацією складу традиційних марок кераміки та розширенням галузей застосування інструменту, особливо при обробці важкооброблюваних матеріалів (жароміцних, корозійностійких, високоміцних і т.ін.) як на основі нітриду кремнію, так і на основі оксиду алюмінію (армована кераміка).

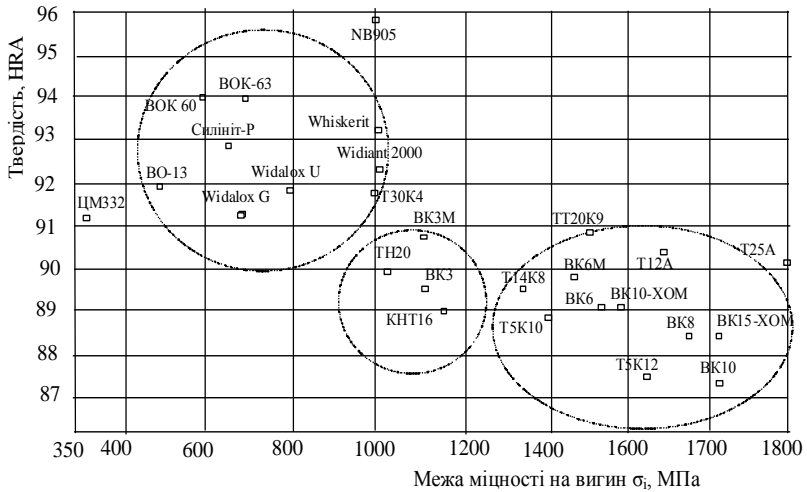


Рисунок 4.2 – Класифікація різних марок різальної кераміки за їхніми основними властивостями (HRA, σ_f) порівняно з марками твердих сплавів ВК, ТК, ТТК

Особливо ефективно застосування мінералокераміки при заміні твердих сплавів (табл. 4.6), що дозволяє не лише підвищити швидкість різання в 6–8 разів і продуктивність в 1,5–2,5 раза, а й значно поліпшити якість обробленої поверхні.

Таблиця 4.6 – Порівняльні результати застосування різців із пластинами з кераміки та твердих сплавів

Оброблюваний матеріал	v, м/хв	t, мм	S, мм/об.	Матеріал різальної частини	T, хв
1	2	3	4	5	6
Чавун вибілений, HRC 62	5,0	0,2	6,2	ВК6 0M	40
	30	1,6	0,32	ВOK - 60	60
Чавун високолегований, HRC 40 - 62	5,0	2,0	3,0	ВК6 M	40
	40	3,0	0,3	ВOK - 60	61,5
	6,3	5,0	2,0	ВК3	34
Чавун високоміцний	70	2,0	0,60	ВOK - 60	38
	126	5,0	1,5	ВК8	60
Сталь 18ХГТ, HRC 55 – 60 (цементована)	208	5,0	0,5	ВOK - 60	65
	62	0,2	0,05	Т15К4	12,5
	157	0,2	0,05	ВOK - 60	25

Примітка. T – стійкість інструменту

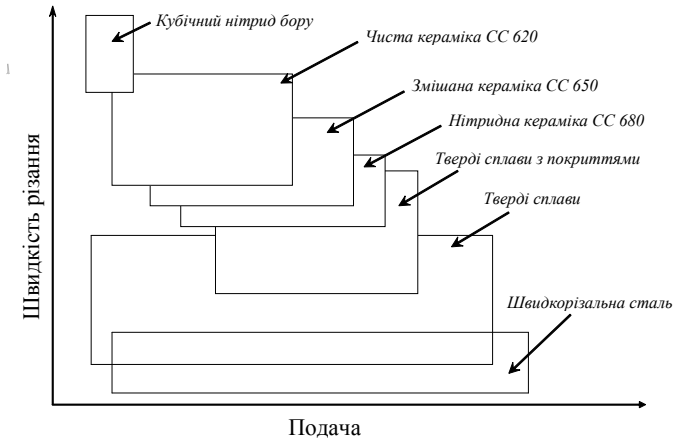


Рисунок 4.3 – Галузі використання матеріалів фірми «Sandvik»

Загальновідома англійська фірма «Sandvik», що спеціалізується на виготовленні металорізального інструменту, порівняно недавно стала виготовляти інструменти з трьох нових видів різальної кераміки – CC 620, CC 650 і CC 680, призначені для обробки широкої гами твердих матеріалів конструкційних сталей і кольорових металів. Різальні властивості цих марок перебувають між твердими сплавами і надтвердим кубічним нітридом бору (рис. 4.3). Відмітними особливостями керамічних пластин із цих матеріалів є: високий опір пластичній деформації; висока твердість і зносостійкість; висока хімічна стабільність (табл. 4.7).

Чистий керамічний матеріал CC 620 має склад на основі оксиду алюмінію з домішкою двоокису цирконію. Пластини з CC 620 мають дуже високу зносостійкість, теплостійкість, але мають низьку межу міцності на вигин.

Таблиця 4.7 – Керамічні матеріали фірми «Sandvik»

Марка	Склад	Властивості	Особливості
1	2	3	4
CC 620	$Al_2O_3 + TiN + ZrO_2$	Густина $\rho \geq 3,97 \text{ г/см}^3$ Твердість $HV \geq 1650$ Колір білий	Висока термостійкість; висока зносостійкість; низька межа міцності

Продовження табл.4.7

1	2	3	4
CC 650	$Al_2O_3+TiN + TiC+ZrO_2$	Густина: $\rho \geq 4,27 \text{ г/см}^3$ Твердість $HV \geq 1800$ Колір темно-коричневий	Висока міцність; висока зносостійкість; сприйнятливість до теплових ударів
CC 680	$Si_3N_3Al_2O_3 + Y_2O_3$	Густина $\rho \geq 3,17 \text{ г/см}^3$ Твердість $HV \geq 1450$ Колір сірий	Маленькі температурні деформації; сприйнятливість до теплових ударів; висока міцність; швидке зношування

Галузь застосування – точіння зовнішніх циліндричних і торцевих поверхонь деталей із чавуну та конструкційних сталей (як правило, чистова обробка) і кольорових металів. Швидкості різання при обробці чавуну досягають 1000 м/хв при тонкому чистовому точінні (фінішна обробка) та 500 м/хв при напівчистовому, а при тонкому точінні конструкційних сталей – 900 м/хв. Приклад обробки пластиною з матеріалу CC 620: начисто обробляється торець диска із чавуну діаметром 180 мм, швидкість різання $V=500$ м/хв, подача $S=0,65$ мм/об., глибина різання $t=2-3$ мм, головний кут у плані $\phi=45^\circ$. При заданих умовах інструментом із CC 620 виготовляється без зміни пластинки 400 деталей.

Змішаний керамічний матеріал CC 650, одержуваний спіканням, складається з оксиду алюмінію й домішок нітриду й карбїду титану, завдяки яким матеріал має високу межу міцності й високу зносостійкість, добре захищений від руйнування при термічних ударах.

Пластинки, виготовлені з CC 650, у більшості випадків застосовуються для обробки валів, шестерень та інших деталей із твердих матеріалів, таких як високоміцний чавун і загартована сталь. Завдяки можливості сприймати термічні удари, пластинки з CC 650 дозволяють обробляти деталі з високоміцних і жаростійких сталей та сплавів при швидкостях різання до 100 м/хв навіть з використанням мастильно-охолодної рідини. Приклад

обробки пластинкою з матеріалу СС 650: чорнова обробка чавунної втулки діаметром 150 мм і довжиною 300 мм. Швидкість різання $V=320$ м/хв, подача $S=0,5$ мм/об., глибина різання $t = 1,5-5$ мм, головний кут у плані $\phi = 75^\circ$. При заданих умовах виготовляється до виходу з ладу різальної кромки в середньому 30 деталей.

Нітридно-керамічний матеріал СС 680 складається з нітриду кремнію й оксиду алюмінію, що дозволяє матеріалу мати мінімальні температурні деформації й найкращу сприйнятливність до температурних ударів. Нітридно-керамічний матеріал СС 680 містить оксид ітрію, що забезпечує при виготовленні компактне й упорядковане спікання. Він має відмінну міцність, ударну в'язкість, але зносостійкість при обробці чорних металів (сталі, чавуну тощо) значно нижча ніж в іншій кераміці. Нітридна кераміка добре пристосована для важких режимів різання, у т.ч. при обробці чавуну й жароміцних матеріалів. Найкращі результати СС 680 показав при обробці жароміцного і жаростійкого сплаву на нікелевій основі «Інконелю». При точінні цього конструкційного матеріалу зі швидкістю різання 200 мм/хв стійкість інструменту зі сплаву СС 680 на 80 % більше інших керамічних матеріалів. Приклад обробки пластинкою з матеріалу СС 680: обробляється вал діаметром 150 з матеріалу «Інконель 718» зі швидкістю різання $V=130$ м/хв, подачею $S=0,25$ мм/об. та глибиною різання $t=2$ мм. Головний кут у плані $\phi = 75^\circ$. При заданих умовах інструмент працює до виходу з ладу не менше 30 хвилин.

4.4.1. Кераміка, отримана за технологією СВ-синтезу

Деякі властивості кераміки на основі нітриду і карбиду кремнію, яка призначена для роботи при високих температурах і в агресивних середовищах, що виготовляються за технологією СВ-синтезу, наведені у табл. 4.8. З кераміки $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{SiC}$ виготовляють деякі деталі двигунів внутрішнього згоряння та різальні пластини для токарних різців і торцевих фрез.

Таблиця 4.8 – Властивості кераміки Si_3N_4 – SiC

Найменування показника	Величина
Густина, кг/м^3	3,02–3,25
Пористість, %	8–15
Модуль пружності, ГПа	
Динамічний	180–194
Статичний	200
Твердість за Роквеллом, HRA	85–93
Твердість за Віккерсом, ГПа	6,1–11,3
Межа міцності на згин, МПа	
при 200 °С	300–430
при 400 °С	300–430
Критичний коефіцієнт інтенсивності напруження, $\text{МН/м}^{3/2}$	2,5–4,9

Питання для самоперевірки

1. Охарактеризуйте особливості будови і назвіть переваги та недоліки різальної кераміки.
2. Наведіть склад, властивості та галузь застосування оксидно-різальної кераміки.
3. Наведіть склад, властивості та галузь застосування оксидно-карбідної різальної кераміки (керметів).
4. Наведіть склад, властивості та галузь застосування оксидно-нітридної різальної кераміки (кортиніт).
5. Наведіть склад, властивості та галузь застосування нітридної різальної кераміки (силініт-Р).
6. Охарактеризуйте галузі раціонального застосування різальної кераміки.
7. Охарактеризуйте основні тенденції вдосконалення різальної кераміки.
8. Наведіть класифікацію основних вітчизняних і зарубіжних марок різальної кераміки.

Слова та скорочення в розділі 4

Анізотропія (від грецьк. *anisos* – нерівний, *tropos* – напрямок) – залежність властивостей фізичних об'єктів від напрямку. Анізотропія характерна, наприклад, для пружних, теплових, оптичних та інших властивостей кристалів.

Дисоціація (від лат. dissociatio – роз'єднання) – розпад частинки (молекули, радикала, іона) на декілька більш простих частинок. Залежно від характеру впливу, що викликає дисоціацію, розрізняють термічну дисоціацію, дисоціацію під дією іонізуювальних випромінювань.

Ізостатичний (ізостазія, ізостатична рівновага) (від грецьк. isostasis – рівний) – рівноважний стан речовини.

Корозія (від пізньолатинського corrosio – роз'їдання) – мимовільне руйнування твердих тіл (металів, бетону, будівельного каменю, дерева, пластмас), викликане хімічними й електрохімічними процесами, що розвиваються на поверхні тіла при його взаємодії із зовнішнім середовищем.

Моноклінна модифікація – це одна із семи сингоній, тобто класифікацій кристалів.

Моноклінна сингонія – кристалографічна сингонія, для якої характерне співвідношення між кутами і ребрами елементарного осередку кристала: $a+b+c$, $\alpha=\gamma=90^\circ$. Підрозділяється на 3 точкові групи (класи) сингонії.

Реагент – речовина, що застосовується в лабораторіях для хімічного аналізу та інших робіт.

Сингонія (від лат. syn – разом і gonia – кут) – класифікаційний підрозділ кристалів за ознакою симетрії елементарної частинки кристалу. Характеризується співвідношенням між її ребрами та кутами. Існує 7 сингоній: кубічна, гексагональна, тетрагональна, тригональна, ромбічна, моноклінна, триклинна.

ГП – технологія гарячого ізостатичного пресування.

Шпінелі – група мінералів підкласу складних окислів. Загальна хімічна формула $A^{2+}B_2O_4$, де $A = Fe^{2+}, Mg, Zn, Mn$ та ін.; $B = Al, Fe^{3+}, Cr, Ti$ та ін. Кристалізуються в кубічній сингонії. Поширені руди заліза і хрому (магнетит і хроміти). Ряд синтетичних кристалів шпінелі, будучи різновидом феритів (шпінелеві ферити) лежать в основі багатьох магнітних матеріалів.

5. НАДТВЕРДІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

Значним резервом підвищення продуктивності та якості обробки деталей різанням є розширення використання інструментів, оснащених синтетичними надтвердими матеріалами (НТМ) на основі алмазу (С) або нітриду бору (BN).

Надтвердими матеріалами прийнято вважати матеріали, що мають твердість $HV > 35$ ГПа. Матеріали, твердість яких вища, ніж у металів (5–20 ГПа), можна розглядати як високотверді. До таких матеріалів умовно можна віднести мінералокераміку, електрокорунд, карбід кремнію та ін. (див. табл. 1.2).

Примітки:

1. Деякі дослідники пропонують відносити до класу надтвердих матеріалів із твердістю вище за твердість природного корунду, тобто більшу 20,6 ГПа.

2. Випробування НТМ, що належать до крихких матеріалів, проводяться тільки алмазним індентором, заточеним у формі гострої піраміди. Використовують індентори таких типів: Віккерса, Берковича і Кнуппа, які залишають при вдавлюванні відбитки, квадрата, трикутника і витягнутого ромба відповідно (рис. 5.1). Після розвантаження індентора вимірюють отриманий відбиток, і величина твердості знаходиться як відношення прик-

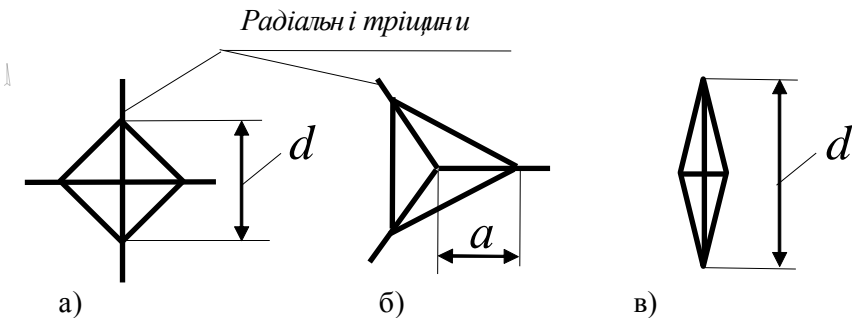


Рисунок 5.1 – Відбитки інденторів Віккерса (а), Берковича (б) і Кнуппа (в): d – розмір відбитка по діагоналі; a – довжина горизонтальної проекції ребра пірамідального відбитка із трикутною основою

ладеного навантаження до величини площі проекції відбитка (по Мейєру). При використанні підходу Мейєра твердість має чітку й зрозумілу фізичну суть – це середній тиск в області контакту індентора зі зразком. Таким чином, твердість, що визначається величиною середнього тиску в області контакту зразка з алмазною пірамідою, яка вдавлюється в нього, з квадратною формою відбитка, є твердістю за Віккерсом (HV), а з формою відбитка у вигляді витягнутого ромба – твердістю за Кнуппом. Вимірювання твердості HV проводять при навантаженнях на індентор 50, 100, 200, 300, 500 і 1000 Н. Вимірювання мікротвердості тонких поверхневих шарів, окремих структурних складових і фаз проводять удавлюванням алмазної піраміди з відносно невеликими ($\leq 5\text{H}$) навантаженнями: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2 і 5 Н.

Твердість матеріалів змінюється у дуже широких межах. Твердість тальку, одного із найбільшми м'яких матеріалів, дорівнює всього 0,03 ГПа, твердість відпаленої міді – 0,8 ГПа, а сталь можна загартувати до твердості 10 ГПа.

Найбільшу твердість з відомих у природі матеріалів має природний алмаз, твердість якого за Віккерсом дорівнює приблизно 100 ГПа. Алмаз – єдиний із природних матеріалів належить до надтвердих. На сьогодні вже синтезована велика кількість надтвердих матеріалів, найбільш твердими і найпоширенішими в промисловості з яких є: штучний (синтетичний) алмаз, кубічний карбонітрид бору (BC_2N) і кубічний нітрид бору ((cBN або КНБ) (рис. 5.2).

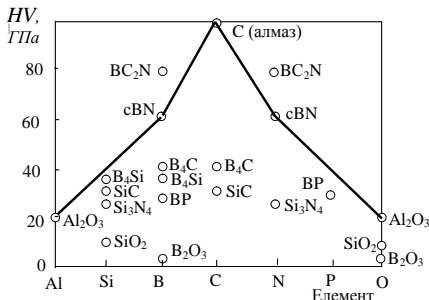


Рисунок 5.2 – Піраміда твердості неметалевих матеріалів і тугоплавких сполук

НТМ – це група інструментальних матеріалів, оптимальні умови застосування яких характеризуються високими швидкостями різання і малими товщинами зрізаної стружки, порівняно невеликими питомими енергетичними витратами, малими силами різання і високою точністю

обробки, відсутністю нагрівання деталі при відносно великому тепловиділенні у зоні різання, низькою шорсткістю обробленої поверхні та високою якістю поверхневого шару деталі, підвищеними вимогами до обладнання і до всього технологічного процесу виготовлення деталі в цілому.

5.1. Особливості одержання синтетичних інструментальних матеріалів на основі алмазу і кубічного нітриду бору

На сьогодні, незважаючи на те, що природний алмаз є найбільш твердим матеріалом на Землі й здавна застосовується як різальний інструмент, інструментальна промисловість у переважній більшості випускає інструменти із синтетичних надтвердих матеріалів на основі алмазу і кубічного нітриду бору.

Принципова відмінність монокристалічного природного алмазу від усіх інших інструментальних матеріалів, що мають, як правило, полікристалічну будову, з погляду інструментальника полягає у можливості одержання практично ідеально гострої і прямолінійної різальної кромки, завдяки чому в другій половині ХХ століття застосування різців із природних алмазів для мікроточіння дзеркально чистих поверхонь оптичних деталей, дисків пам'яті, барабанів копіювальної техніки і т.ін. почало істотно зростати у зв'язку з розвитком електроніки, прецизійного машинобудування та приладобудування.

Різальні інструменти, оснащені природними алмазами, в названих галузях застосовуються при обробці титанових, висококремнистих алюмінієвих сплавів, склопластиків і пластмас, мінералокераміки, твердих сплавів, мідних сплавів та інших матеріалів.

У табл. 5.1 наведені рекомендації з режимів різання інструментами з природного алмазу різних оброблюваних матеріалів.

Потрібно мати на увазі, що застосування природних алмазів у загальному машинобудуванні, де вимоги до якості обробки деталей не настільки високі, є економічно недоцільним через їхню дорожнечу і крихкість.

Таблиця 5.1 – Режими, які рекомендовані для різання різцями з природного алмазу

Оброблюваний матеріал	V, м/с	S, мм/об	t, мм
Алюмінієві литі сплави	10,0–11,5	0,010– 0,04	0,01–0,20
Алюмінієво-магнієві сплави	6,6–8,3	0,010–0,05	Те саме
Алюмінієві жароміцні сплави	4,1–6,6	0,020–0,04	0,05–0,10
Дюралюміній	8,3–11,5	0,021–0,04	0,03–0,15
Мідь	6,0–8,3	0,010–0,04	0,01–0,40
Бронза олов'яниста	4,1–6,6	0,040–0,07	0,08–0,20
Бронза алюмінієво - залізна	11,5	0,020–0,04	0,03–0,06
Бронза свинцювата	10,0–11,5	0,025–0,05	0,02–0,05
Латунь	8,3	0,020–0,06	0,03–0,06
Бабіт	6,6–8,3	0,010–0,05	0,05–0,20
Монель	2,5–5,0	0,010–0,02	0,03–0,05
Титанові сплави	1,6–5,0	0,020–0,05	0,03–0,06
Пластмаси	1,6–3,3	0,020–0,05	0,05–0,15
Склотекстоліт	10,0–11,5	0,020–0,05	0,03–0,05
Гума	5,0–6,6	0,010–0,04	0,02–0,06

Разом з тим, все зростаюча у зв'язку із застосуванням конструкційних матеріалів з особливими властивостями (надтвердих, високоміцних, жароміцних, корозійно- і зносостійких тощо) потреба в надтвердих матеріалах привела до того, що в 1953-1957 роках у Швеції (фірма ASEA) і США («Дженерал електрик») і в 1959 році в СРСР Інститутом фізики високих тисків АН СРСР (ІФВТ) методом каталітичного синтезу, при високих статичних тисках, з гексагональних фаз графіту (C) (рис. 5.3 а) і нітриду бору (BN) (рис. 5.3 г) були отримані дрібні частки кубічних фаз як синтетичного алмазу (рис. 5.3 б), так і нітриду бору (рис. 5.3 г).

Теорія синтезу алмазу вперше була запропонована О. І. Лейпунським (1939 р.), який на основі експериментальних

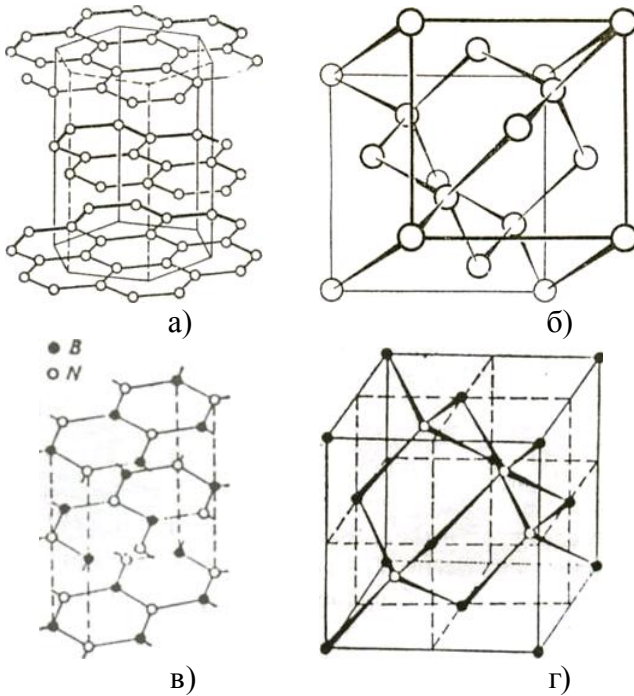


Рисунок 5.3 – Кристалічні ґратки гексагонального графіту (а), алмазу (б), графітоподібного нітриду бору (в) і кубічного (сфалеритного) нітриду бору (г)

даних про зворотний перехід алмазу в графіт сформулював умову переходу графіту в алмаз і розрахував криву рівноваги «графіт - алмаз» при високих тисках. Синтез алмазу із графіту при високих тисках (більше 4,0 ГПа) і температурах (понад 1400 К) здійснюється за наявності металевих розчинників вуглецю (Ni, Fe, Co та ін.).

Кубічний нітрид бору – надтвердий матеріал, який не має природного аналогу. Вперше кубічний нітрид бору був синтезований у 1956 році (фірмою «Дженерал Електрик») при високих тисках (понад 4,0 ГПа) і високій температурі (понад 1473 К) з гексагонального нітриду бору за наявності лужних і лужноземельних металів (свинець, сурма, олово та ін.).

Кубічний нітрид бору, що випускається фірмою «Дженерал Електрик», був названий боразоном, той, що випускається

заводом «Львич» (за технологією ІФВТ, Росія) – ельбором, а той, що виробляється Полтавським заводом алмазних інструментів (за технологією ХХ століття), – кубонігом.

Для синтезу надтвердих матеріалів використовують апарати високого тиску, найбільше поширення з яких одержали апарати таких типів: «белт», «сочевиця», кубічний і тетраедричний. Апаратура високого тиску у виробництві надтвердих матеріалів (алмазу, кубічного нітриду бору та полікристалічних матеріалів на їхній основі) визначає продуктивність процесу і собівартість НТМ. Інститут фізики високих тисків АН СРСР розробив простий в експлуатації апарат (зі сферичним поглибленням у матриці) типу сочевиця. На основі цього апарату Інститут надтвердих матеріалів НАН України

(ІНМ НАНУ) розробив високопродуктивний, економічний промисловий апарат високого тиску (рис. 5.4).

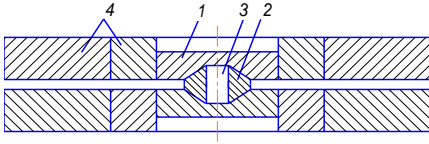


Рисунок 5.4 – Апарат високого тиску:

- 1 – твердосплавна матриця;
- 2 – контейнер з кальциту;
- 3 – реакційний склад;
- 4 – скріпні кільця

Цей апарат складається з верхньої та нижньої матриць, які скріплюються кільцями і мають поглибленнями, що утворюють порожнину високого тиску, в яку поміщений контейнер з літографічного каменю (95 % – CaCO_3 ; решта - оксиди Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 та ін.) з реакційним складом. Працює апарат таким чином. Блок-матриці, поміщені між опорними плитами, під зусиллям преса зближуються, контейнер із літографічного каменю деформується і заповнює простір між матрицями, що утворюють камеру високого тиску.

Перехід графіту в алмаз здійснюють за наявності розчинника вуглецю. Як розчинник вуглецю використовуються такі метали: Ni, Fe, Co, Ru, Pd, Os, Ir, Pt, Cr, Mn та Ta. При синтезі кристаліти графіту, становлять частинки графіту з високим ступенем упорядкованості, є джерелами центрів кристалізації алмазу. Під час розчинення металом ці частинки досягають певного розміру і стають центрами кристалізації алмазу. Надалі ріст кри-

сталів відбувається за рахунок транспортування (дифузії) вуглецю через розплавлений метал. Залежно від умов синтезу (тиску і температури) ріст кристалів алмазу може здійснюватися за різними механізмами:

- під час синтезу монокристалів алмазу (при малих пересиченнях) ріст кристалів відбувається через розплавлений метал;
- під час синтезу полікристалічних алмазів (при більших пересиченнях) ріст кристалів може здійснюватися одночасно за рахунок дифузії атомів вуглецю і мікроагрегатів через розплавлений метал;
- при екстремальних умовах (тиск більше 12 ГПа і температура більше 4000 °К) створюються умови прямого фазового переходу графіту в алмаз без використання розчинників вуглецю, тобто відбувається трансформація графітових ґраток в алмазну (перехід мартенситного типу).

Механізм утворення кубічного нітриду бору більш складний, ніж механізм утворення алмазів. На сьогодні ще відсутня загальноприйнята модель фазового перетворення (за наявності металів і їхніх ніридів) гексагонального нітриду бору в кубічний. Найкращим є такий механізм утворення КНБ. Метал (наприклад, магній) реагує з нітридом бору, внаслідок чого утворюється сполука MeN і BN , у розплаві якої розплавляється нітрид бору. При відповідних термодинамічних умовах з розчину в розплаві й відбувається кристалізація кубічного нітриду бору. Залежно від умов росту, складу та властивостей середовища кристалізації вирощений КНБ – агрегати, друзи наростання, перекристалізації, зростки, двійники або монокристали різного ступеня кристалічної досконалості.

Синтетичні монокристали алмазу і КНБ, які отримані шугунним шляхом, мають відносно невеликі розміри і становлять окремі зерна з розмірами від 10^{-4} до 2500 мкм. Тому для використання як інструментальний матеріал для лезових інструментів їх, як правило, з'єднують (зрощують) у полікристали.

Примітка. З використанням спеціальних технологій можна вирощувати монокристали НТМ і з більшими розмірами. Наприклад, для одержання алмазів «ювелірної якості» (до 5–8 мм)

використовується спосіб вирощування кристалів у Т-градієнті на затравці. Необхідною вимогою вирощування при ізотермічних умовах у Т-градієнті є забезпечення в області кристалізації високого пересичення, і живильний матеріал необхідно розмістити на деякому віддаленні від затравки. При цьому реакційний склад відділений від зростаючого кристала мембраною із платини або слюди

Полікристалічні (композиційні) надтверді матеріали (ПНТМ) на основі алмазу і кубічного нітриду бору з'явилися на рубежі 60–70-х років ХХ століття. Характерною рисою таких матеріалів є наявність жорсткого каркаса зі зрослих зерен алма-

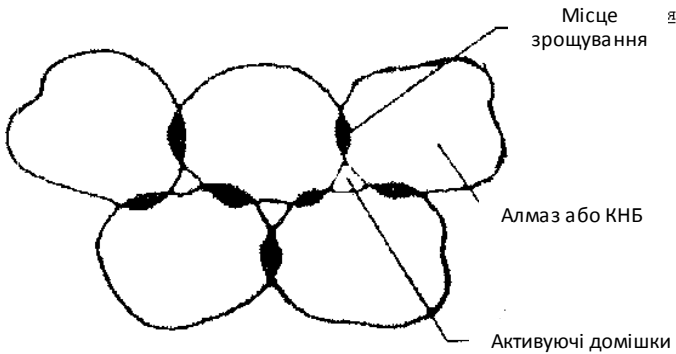


Рисунок 5.5 – Структура алмазного композиційного полікристалічного матеріалу

зу або КНБ (рис. 5.5). Спінання порошків алмазу і КНБ, як правило, здійснюється в області термодинамічної стабільності алмазу і КНБ при тиску 5–9 ГПа і температурах 1500–2000 °К. Звичайно спінання полікристалічних композиційних матеріалів здійснюють за наявності домішок, що активують процес спінання: для алмазних порошків – кобальт або кремній, а для порошків КНБ – алюміній. Зерна, що складають каркас, – це, по суті, монокристали алмазу або КНБ, які мають ряд унікальних фізико-механічних і теплофізичних властивостей. Наскільки ці властивості реалізуються у полікристалі залежить від ступеня їхнього взаємозв'язку. На сьогодні розроблені технології виробництва

двошарових пластин, що складаються з верхнього робочого шару з надтвердого матеріалу (0,5–2,0 мм) і твердосплавної основи (пластини). Спінанням твердосплавної пластини з алмазним робочим шаром одержують алмазотвердосплавні пластини (АТП), а з робочим шаром із КНБ – кубонітотвердосплавні пластини (КТП).

Класифікація ПНТМ базується на способі їхнього одержання та особливостях структури. Основні способи одержання полікристалічних надтвердих матеріалів подані в табл. 5.2. Фізико-механічні властивості цих матеріалів наведені в табл. 5.3 і 5.4.

Таблиця 5.2 – Способи одержання ПНТМ

Група	Спосіб одержання	Приклад
1	Перехід графіту в алмаз за наявності розчинника	АСПК (ІФВТ, Росія), АСБ (ІФВТ, Росія)
	Перехід графітоподібного нітриду бору в кубічний (КНБ) за наявності розчинника	Композит 01 (НВО «Ільич», Росія), композит 02 (ІФТТЙП, Беларусь)
	Перехід в'юрцитного нітриду бору в кубічний	Композит 10 (ІПМ, Україна)
2	Спінання порошків алмазу з активуючими добавками	АКТМ (ІНМ, Україна), СКМ, СВБН, карбоніт
	Спінання порошків КНБ із активуючими добавками	Кіборит (ІНМ, Україна), ніборит
3	Спінання двошарових пластин на твердосплавній підкладці з алмазним робочим шаром	АТП (ІНМ, Україна)
	Спінання двошарових пластин на твердосплавній підкладці з робочим шаром із КНБ	КТП (ІНМ, Україна)

На сьогодні для виготовлення великих полікристалів НТМ із розмірами пластин циліндричної форми висотою до 8 мм і в діаметрі до 30–40 мм, що відкриває можливість одержання інструмента з різальними кромками великої довжини, розроблені спеціальні технології, в основі яких лежать два різних процеси: фазовий перехід речовини з одного стану в інший (саме синтез) або спінання дрібних частинок заздалегідь синтезованого порошку ПНТМ.

Таблиця 5.3 – Фізико-механічні властивості матеріалів на основі ПКА

Марка матеріалу	Властивості НТМ на основі ПКА							
	Мікротвердість, ГПа	Густина, г/см ³	Міцність, ГПа		Модуль Юнга, ГПа	Коефіцієнт трищинистій-кості К _{IC} , МПа·м ^{1/2}	Теплопровідність λ, Вт/(м·К)	Термостійкість на повітрі, К
			на стиск	на вигин				
АСБ	50–90	3,5–3,9	0,4–0,6	0,78	800–850	–	290–300	873–993
АСПК	80–100	3,5–4,0	0,4–0,8	0,5–1,0	900	–	–	1073–1173
СКМ	60–70	–	0,6–0,8	–	850	–	150–250	973–1073
АТП	50	3,74–3,77	0,3–0,4	0,80–0,85	–	10–13	–	950–1000
АКТМ	52	3,46	0,49	–	970	8	260	1473
СВБН	70–100	3,30–3,45	8,0–10,0	–	–	–	–	1073–1223
Карбоніт	40–45	3,2–3,4	4,5–6,0	–	–	–	–	1473
Алмет	94–96 HRA	–	5,0–10,0	–	500–600	–	–	973
СВ	65–100	–	5,0–10,0	–	850	–	–	1573–1673

Таблиця 5.4 — Фізико-механічні властивості матеріалів на основі полікристалічного КНБ

Марка КНБ	Властивості НТМ на основі ПКНБ								
	Мікротвердість, ГПа	Густина, г/см ³	Міцність, ГПа			Коефіцієнт тріщиностійкості K_{IC} , МПа·м ^{1/2}	Модуль Юнга, ГПа	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Термостійкість на повітрі, К
			на стиск	на розтягання	на вигин				
Композит 01 (Ельбор-Р)	32—38	3,31—3,45	2,25—3,15	0,43—0,49	0,70—0,98	3,7—4,2	780—840	60—80	1343—1473
Композит 02 (Білбор)	38	3,42—3,50	4,00—6,50	—	0,68—0,70	10,8	720	85	1273—1423
Композит 10 (Гексанит-Р)	30—38	3,34—3,50	2,00—4,00	0,26—0,39	1,20—1,50	7,1	650—780	30—60	1273—1373
Композит 05 - ИТ	19	4,0—4,3	—	—	0,47	4,6—6,7	620	—	1273—1373
Кіборит	32—36	3,20—3,34	2,60—3,20	0,32—0,37	0,55—0,65	13,5	850—910	100	1573
КТП	25—33	—	—	—	—	14,5-16,1	—	80	—

Зокрема, першим способом одержують (при переході графіту в алмаз за явності розчинника вуглецю) полікристалічні алмази марок АСПК (карбонадо) і АСБ (балас), структура яких ідентична структурі природних алмазів таких самих назв. При переході графітоподібного нітриду бору в кубічний за наявності розчинника одержують Композит 01 (Ельбор-Р) і Композит 02 (Білбор), а при переході вюрцитного нітриду бору, який отримується за допомогою вибуху, в кубічний – Композит 10 (Гексанит-Р).

Спінанням (другий спосіб) порошків алмазу одержують марки АКТМ, СКМ, СВБН і карбоніт, а спінанням порошків КНБ – кіборит і ніборит.

За рубежем на основі технології спікання алмазних зерен випускають полікристалічні матеріали Sindite (De Beers, ПАР), Megarax та Megadiamond (Megadiamond Ind., США), Sumidia (Sumioto Electric Ind., Японія), Comrax (General Electric Co, США) та ін., а на основі спікання зерен КНБ – Amborite (De Beers, ПАР), BZN Comrax (General Electric Co, США), Sumiboron (Sumioto Electric Ind., Японія) та ін.

Керування процесом формування структури полікристала відкриває можливості створення, залежно від галузей застосування, матеріалів з необхідним сполученням твердості, теплопровідності, міцності і т.ін. Полікристалічні надтверді матеріали за своїми фізико-механічними властивостями можуть бути близькими до монокристалів, а за деякими і перевершують їх. Так, монокристали алмазу при досягненні критичних навантажень завдяки підвищеній крихкості руйнуються на дрібні фрагменти. ПНТМ на основі алмазу через свою полікристалічну структуру значно краще чинять опір ударним навантаженням, ніж монокристали алмазу і, незважаючи на меншу твердість порівняно з природним алмазом, мають більш високі значення меж міцності на розтягнення і зсув.

Примітка. Ударна в'язкість полікристалів залежить від розміру зерен і з їхнім збільшенням знижується

Крім того, більшість полікристалів має ізотропію (однорідність за різними напрямками) властивостей, відрізняється ви-

сокою однорідністю за твердістю у всіх напрямках, а отже, і високою зносостійкістю, також перевершує монокристали за тріщиностійкістю. Ними можна обробляти деталі з різних конструкційних матеріалів при швидкостях різання, які на порядок вищі за швидкістю, що допускаються твердосплавними інструментами.

Зараз проводяться науково-дослідні роботи зі створення нових інструментальних НТМ на основі як алмазу, так і КНБ з високими твердістю, зносостійкістю і в'язкістю руйнування, що дозволить розширити галузі використання сучасного різального інструменту та його ефективність.

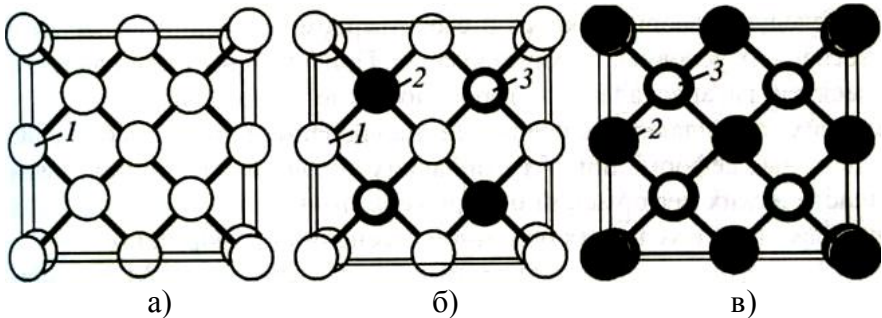


Рисунок 5.6 – Кристалічні ґратки алмазу (а), карбонітриду бору (б), кубічного нітриду бору (в):

1 – атоми вуглецю; 2 – атоми азоту; 3 – атоми бору

Так, у 2000 році в Інституті надтвердих матеріалів (ІНМ) АН України (м. Київ) прямим перетворенням графітоподібного твердого розчину VN-C при тиску 25 ГПа і температурі 2100 °К була отримана нова надтверда фаза – кубічний карбонітрид бору (BC_2N), що одержала позначення КАНБ і кристалічна решітка якого показана на рис. 5.6 б. Абсолютні значення твердості (див. рис. 5.1) і модуля пружності КАНБ перебувають між значеннями цих показників для алмазу й кубічного нітриду бору (дещо менші, ніж в алмазу, але більші, ніж у кубічного нітриду бору), що робить його другим за твердістю матеріалом після алмазу

(див. рис. 5.2) і відкриває нові перспективи в обробці залізовмісних матеріалів.

На сьогодні уже створені і випробувані у виробничих умовах композиційні НТМ (КНТМ), які одержують спіканням порошків з різних матеріалів. Так, спіканням порошків синтетичного алмазу і кубічного або в'юрцитоподібного нітриду бору одержують перспективні інструментальні матеріали типу СВАБ (КНБ), компакт (Японія) та ін. До класу композиційних відносять також алмазовмісні матеріали на основі твердих сплавів. З матеріалів цієї групи добре зарекомендували себе в експлуатації «Славутич» (із суміші порошків твердого сплаву і природних алмазів) і твесали (із суміші порошків твердого сплаву і синтетичних алмазів).

Підвищення твердості та теплостійкості інструментальних матеріалів – один із важливих напрямків у підвищенні продуктивності праці під час механічної обробки. Найбільш перспективними щодо цього є синтетичні надтверді матеріали на базі полікристалів алмазу (карбонадо, балас) і кубічного нітриду бору (торговельні марки – композит 01, 05 і 10).

5.2. Характеристика основних властивостей та галузі застосування полікристалів синтетичного алмазу (ПКА)

Як уже було відзначено, переваги інструментальних ПКА порівняно з монокристалічними алмазами, особливо природними, пов'язані з довільною орієнтацією кристалів у робочому шарі різальних пластин, що й забезпечує високу однорідність за твердістю і стійкістю до стирання у всіх напрямках.

У багатьох випадках спостережувана на практиці більша зносостійкість різців із синтетичних алмазів порівняно з різцями із природних алмазів пояснюється в першу чергу відмінністю їхніх структур. У природного алмазу тріщини, що з'являються на різальній кромці, розвиваються і можуть досягати значних розмірів. У синтетичного алмазу, який є полікристалом, тріщини, що виникають, гальмуються і зупиняються межами кристалів, що й визначає їх більш високу (у середньому в 1,5–2,5 рази) зносостійкість.

Полікристали алмазу відрізняються від монокристалів і більш високою термостійкістю. Такі матеріали, як АКТМ і СВ, не втрачають своїх різальних і міцнісних властивостей при нагріванні до 1473 °К і вище (див. табл. 5.3), що дозволяє робити навіть їхнє напаявання на твердосплавні пластини.

Коефіцієнт тертя ПКА з металом дещо вищий, ніж у природних алмазів. Це пояснюється наявністю пор на поверхні полікристала, викликаних випаданням частинок кристалів, а також наявністю частинок металевої фази (після синтезу) або зв'язувальної речовини. Однак величина коефіцієнта тертя ПКА з багатьма металами не перевищує 0,2, що свідчить про превалювання в контакті зовнішнього тертя. Це – особливість контактних процесів алмазу з більшістю металів. Однак із нікель- і залізовмісними матеріалами алмаз має хімічну спорідненість. Вуглець, з якого складається алмаз, активно реагує з цими матеріалами під час нагрівання. Тому при різанні сталей на основі заліза спостерігається дифузійне зношування алмазного леза і на його контактних поверхнях відбувається інтенсивне налипання оброблюваного матеріалу. Все це призводить до інтенсивного зношування алмазного інструмента при обробці цих матеріалів, що обмежує галузі його застосування. Накопичений досвід свідчить про те, що найбільш ефективно застосування алмазного інструмента одержують на чистових й оздоблювальних операціях під час обробки деталей з кольорових металів та їхніх сплавів, твердих сплавів, а також з різних полімерних композиційних матеріалів. Інструмент може бути використаний під час точіння переривчастих поверхонь і при фрезеруванні, однак його стійкість буде нижча, ніж під час обробки без удару.

Успішно застосовуються різальні пластини із ПКА під час обробки полімерних композитних матеріалів. Використання різальних пластин із ПКА з механічним кріпленням дозволяє підвищити стійкість у 15–20 разів порівняно з інструментом із твердого сплаву.

Ще однією з перспективних галузей застосування ПКА є обробка таких матеріалів, які важко піддаються різанню і спри-

чиняють швидке зношування інструмента. Наприклад, дерево-стружкові плити, плити середньої щільності з високим вмістом клею, з покриттями на основі меламинової смоли, декоративний паперово-шаруватий пластик, а також інші матеріали, що мають абразивну дію. Обробка таких матеріалів звичайним інструментом неекономічна. На сьогодні час різальний інструмент, який застосовується у деревообробній промисловості й промисловості з переробки пластмас, як правило, оснащують полікристалами алмазу. Такий інструмент має стійкість у 200–300 разів вищу за стійкість твердосплавних інструментів.

Баласи (АРВ) – полікристалічні синтетичні алмази діаметром 3,6–6,7 мм заввишки 3–5,5 мм.

Карбонадо (АРК) – полікристалічні синтетичні алмази досконалішої дрібнозернистої структури. За твердістю та теплостійкістю вони близькі до природних алмазів, мають хімічну спорідненість із деякими металами. Теплостійкість на повітрі становить 700 °С. Карбонадо випускаються діаметром 2,5–4,6 мм, заввишки 2,5–4 мм, масою 0,2–1 карат.

Дисміт – полікристалічний алмаз на основі синтетичних і природних алмазів.

Сіапол (АСПВ) – різновид карбонадо, відрізняється від нього геометричною формою, випускається масою 1,4–2 карата у вигляді заготовок діаметром 5,8–8,7 мм заввишки 2,8–3,2 мм.

Синтетичні алмази СВ, СВС, СВАБ (алмазні спеки) випускаються у вигляді циліндрів діаметром 3,5–4,5 мм, заввишки до 4 мм, масою 0,5–0,8 карата. Механічні характеристики полікристалічних синтетичних алмазів (особливо АСПК) вищі (див. табл. 5.6) від характеристик природних монокристалічних алмазів, що є дуже важливим для однокристалного інструменту.

Алмазні інструменти доцільно використовувати при обробленні алюмінієвих сплавів, кераміки, твердих сплавів, склопластиків, композиційних і неметалевих матеріалів, у тому числі й армованих (табл. 5.5).

Таблиця 5.5 – Рекомендовані режими різання при обробленні інструментами із синтетичних алмазів

Оброблювані матеріали	Глибина різання, мм	Подача, мм/об.	Швидкість різання, м/хв	Шорсткість, мкм
Висококремнієві алюмінієві сплави	0,1–0,5	0,02–0,07	300–700	0,63–1,25
Мідь, латунь	0,1–0,5	0,02–0,07	300–400	0,63–1,25
Олов'яниста бронза	0,1–1,0	0,02–0,10	300–600	0,63–1,25
Бабіт	0,1–1,5	0,02–0,12	400–700	0,63–1,25
Титанові сплави	0,1–0,5	0,02–0,08	100–300	0,63–2,50
Склопластики та пластмаси	0,5–1,0	0,04–0,07	400–500	1,25–5,00
Оргскло	0,1–1,0	0,02–0,06	500–700	0,63–1,25
Кераміка	0,2–0,5	0,02–0,07	120–200	1,25–2,50
Тверді сплави	0,1–0,15	0,02–0,07	10–30	0,63–1,25

Так, стійкість різців з АСБ і АСПК під час різання алюмінієвих сплавів та склопластиків у 80–100 разів перевищує стійкість твердосплавних різців і, як правило, в 1,2–1,5 раза перевищує стійкість різців із природних алмазів. Вітчизняні алмази АСПК, АСБ застосовуються на чистових операціях, а також під час оброблення матеріалів із глибиною різання до 2 мм. У Харківському національному технічному університеті розроблено різці спеціальної конструкції, що можуть працювати при зрізуванні припуску до 5 мм. У ряді випадків можливе суміщення чорнової та чистової операцій. У табл. 5.5 наведено рекомендовані режими різання під час оброблення різних матеріалів вітчизняними синтетичними алмазами.

Стійкість різців з карбонадо при обробленні титанових сплавів значною мірою залежить від вибору оптимальних режимів оброблення. Так, при обробленні титанових сплавів ВТ6, ВТ8 і ВТ22 оптимальна швидкість різання становить 90–110м/хв.

Максимальна стійкість різців з карбонадо при обробленні зазначених вище матеріалів забезпечується при подачі 0,02 мм/об.

У разі її збільшення до 0,07 мм/об стійкість може зменшитися до 10–50 хв, тобто у 50–100 разів. Це потрібно враховувати при виборі обладнання для оброблення титанових матеріалів інструментом із карбонадо, оскільки верстати, що випускалися раніше, практично не мали поздовжніх подач, менших за 0,07 мм/об.

У сучасних верстатах забезпечується поздовжня подача більша за 0,02 мм/об., а на верстатах із числовим програмним керуванням – більша за 0,001 мм/об.

Продуктивність праці при впровадженні алмазних інструментів підвищується завдяки зменшенню часу, пов'язаного із заміною інструментів, а також інтенсифікації режиму різання при збільшенні швидкості різання. Особливо ефективним є використання алмазних різців на агрегатних верстатах, верстатах із числовим програмним керуванням, автоматичних лініях.

Технічна ефективність. Різці із синтетичних полікристалічних алмазів мають високу розмірну стійкість (крім збереження різальних властивостей, зберігаються також задані розміри оброблюваних поверхонь), поліпшують якість обробленої поверхні, сприяють підвищенню надійності й довговічності виготовлених деталей.

Стійкість різців із синтетичних полікристалічних алмазів у середньому в 6–10 разів вища порівняно зі стійкістю твердосплавних різців, що дозволяє підвищити продуктивність обробки не менш ніж в 1,5–2 рази. Особливо хороші результати дає застосування алмазних різців на верстатах із програмним керуванням та автоматичних лініях.

Необхідно пам'ятати, що застосовувати алмазний інструмент для оброблення сталей недоцільно внаслідок високої активності дифузійного перенесення вуглецю з інструмента в оброблювану деталь та стружку, чим і пояснюється інтенсивне спрацювання інструментів. Так, стійкість різців з алмазів АСПК у 50–100 ра-

зів нижча від стійкості композита 01 при точінні сталі Р6М5 твердістю HRC 62–64.

Міцність алмазних зерен порівняно невисока, оскільки висока твердість їх поєднується з підвищеною крихкістю. Тому алмазні інструменти застосовують для зрізування тонких стружок з малими навантаженнями в умовах безударного та безвібраційного оброблення.

5.3. Характеристика основних властивостей і галузь застосування ПНТМ на основі щільних модифікацій нітриду бору BN

ПНТМ на основі щільних модифікацій нітриду бору, незначно уступаючи алмазу за твердістю, відрізняються високою термостійкістю (до 1573 °К), стійкістю до циклічного впливу високих температур і, що особливо важливо, слабкою хімічною взаємодією із залізом, який є основним компонентом багатьох оброблюваних матеріалів (сталі, чавуни, наплавочні матеріали тощо).

Однією з можливостей підвищення ефективності інструменту із ПНТМ на основі BN (ПКНБ) є використання мастильно-охолодних технологічних середовищ (МОТС). Для інструментів з полікристалами BN найбільш ефективно використовувати рідкі середовища шляхом їхнього розпилення при швидкостях різання до 1,5–1,7 м/с.

Ще однією з ефективних галузей використання інструменту, оснащеного полікристалами BN, є обробка наплавлень, якими зміцнюють деталі металургійного виробництва. Наплавлені матеріали дуже високої твердості (до HRC 60–62) одержують шляхом електродугового або плазмового наплавлення порошковими дротами або стрічками.

Полікристали кубічного нітриду бору перевершують за теплостійкістю всі матеріали, які застосовуються для лезового інструменту: алмаз – майже в 1,9 раза, швидкорізальну сталь – в 2,3 раза, твердий сплав – у 1,7 раза, мінералокераміку – в 1,2 раза. Цей матеріал є ізотропним (однакова міцність у різних на-

прямках) і він хімічно інертний до залізовмісних матеріалів, має знижену крихкість.

Одним із основних напрямків у застосуванні лезових інструментів на базі нітриду бору є обробка чорних металів (сталей і чавунів різної твердості). Причому чим вища твердість сталі або чавуну, а також швидкість різання, тим більш помітно проявляється перевага за зносостійкістю і різальними властивостями лезових інструментів з композиту порівняно з інструментами із твердого сплаву і мінералокераміки. Так, під час точіння загартованих швидкорізальних сталей твердістю HRC 62–65 стійкість різців з кубічного нітриду бору при швидкості різання 80–100 м/хв вища за стійкість різців із твердого сплаву Т30К4 в 15–20 разів і вища за стійкість різців з мінералокераміки в 3–4 рази.

Інструментальні синтетичні надтверді матеріали (кубічний нітрид бору і в'юрцитоподібний нітрид бору), одержані на основі синтезу щільних форм нітриду бору, мають високі твердість, міцність, теплостійкість і стійкість проти спрацювання. За твердістю, теплостійкістю, зносостійкістю і різальними властивостями вони значно перевершують багато відомих інструментальних матеріалів, у т.ч. тверді сплави та мінералокераміку (табл. 5.6).

Таблиця 5.6 – Порівняльні механічні характеристики інструментальних матеріалів на основі алмазу та кубоніту

Матеріали	Густина, 10 т/м ²	Термостійкість на повітрі, °С	Мікротвердість, ГПа	Модуль пружності, ГПа	Межа міцності, ГПа	
					на стиск	на вигин
1	2	3	4	5	6	7
Монокристалічний алмаз	3,25	800–900	80–100	900	0,2	0,3
Балас (АРВ)	3,53–3,88	700	60–100	800	2,0	0,5–1,0
Карбонадо (АРК)	3,5	700	82–100	900	0,4–0,8	0,5–1,0
Дисміт	3,54	1000	80–100	900	5,8	0,5–1,0
Композит 01 (Ельбор-Р)	3,3–3,4	1800	70–80	720	2–3	0,5–1,0

Продовження табл. 5.6

1		2	3	4	5	6	7
Композит 02 (Білбор)		3,5	1300–1400	80	720	6,36	0,7
Композит 03 (ісміт)		3,3–3,45	1200	75-80	720	1,2-1,5	0,7–1,0
Композит 05 (композит)		3,47–3,51	1000	65	700	0,98	0,4–0,6
Композит 10 (Гексаніт-Р)		3,5–3,6	1000	59	720	1,2	1,2–1,5
Полік- ристалі- чний твердий нітрид бору	ПТМБ- 5ІК	3,4	1200	78	720	3,92	0,6
	ПТНБ- ІК1	3,6	1300	80-90	750	4,9	1,2
АРС (алмазні спеки)		3,3–3,46	1000	80–100	900	5	–
Тверді сплави	ВК	8–15	800–1000	12–30	540	4–5	0,5–1,6
	T15K6	11	900	28	520	3,9	1,16
Мінералокераміка		3,5–6,9	1500	12–29	–	0,9–1,5	0,3–0,5
Швидкорізальна сталь		8–8,8	600–650	13–18	220	3,6	1–2

Кубічний нітрид бору має твердість хоча й меншу, але близьку до твердості алмазу, підвищену теплостійкість (до 1300 °С), високу теплопровідність і, як ми вже відзначали, хімічну інертність стосовно вуглецю і заліза. При обробці загартованих сталей твердістю HRC 62–64 стійкість різців з кубічного нітриду бору в десятки разів вища, ніж стійкість різців із твердого сплаву. При обробці чавунів стійкість таких різців у 4–5 разів вища, ніж різців із твердого сплаву.

Кубічний нітрид бору – синтетичний надтвердий матеріал, що містить 43,6 % бору та 56,4 % азоту. Боразон, кубоніт та ельбор – один і той самий матеріал – кубічний нітрид бору. Перелічені матеріали розрізняються фізико-механічними властивостями залежно від особливостей технології їх виробництва, початкових основних матеріалів, параметрів синтезу (тиску, температури, часу витримки), розчинників (каталізаторів), що застосовуються, а також домішок.

У країнах СНД випускаються інструментальні полікристалічні синтетичні надтверді матеріали різноманітних марок. Науково-дослідним інститутом інструментів запропоновано класифікацію полікристалічних синтетичних надтвердих матеріалів на основі щільних модифікацій нітриду бору, названих компози-тами. За сферами застосування композити розбито на 10 груп, які визначаються умовами різання, оброблюваними матеріалами, собівартістю виготовлення та ін. Старі марки відповідають новим найменуванням:

Старе найменування

Композит 01
Композит 02
Композит 03
Композит 05
Композит 09
Композит 10

Нове найменування

Ельбор-Р
Білбор
Ісмїт
Композит
ПТНБ
Гексаніт-Р

Композит 01 (Ельбор-Р) – полікристалічний синтетичний матеріал на основі кубічного нітриду бору. Має однорідну дрібнозернисту кристалічну структуру, темно-синього кольору, без видимих включень. Фізико-механічні властивості компози-та 01, як і решти синтетичних надтвердих матеріалів, наведені в табл. 6.1.

Композит 02 (Білбор) – полікристалічні агрегати кубічного нітриду бору, монолітні полікристалічні блоки на його основі.

Композит 03 (Ісмїт) – полікристалічний синтетичний матеріал на основі кубічного нітриду бору. Має дрібнозернисту структуру, що складається зі зрощених кристалів кубічного нітриду бору. Випускається в трьох виконаннях (Ісмїт-1, Ісмїт-2, Ісмїт-3), що різняться між собою густиною.

Композит 05 (Композит) – полікристалічний синтетичний матеріал на основі кубічного нітриду бору з домішкою алмаз-ного матеріалу.

Композит 09 – ПТНБ (полікристалічний твердий нітрид бо-ру). Одним з компонентів початкової сировини є в'юрцитоподі-бна модифікація нітриду бору. Випускається в кількох модифі-каціях.

Композит 10 (Гексаніт-Р) – полікристалічний синтетичний матеріал на основі в'юрцитоподібного нітриду бору. Має однорідну структуру, темно-сірого або чорного кольору.

Усі композитні інструментальні матеріали хімічно інертні до заліза.

Технологія одержання синтетичних надтвердих матеріалів на основі нітриду бору значною мірою визначає їх фізико-механічні властивості та галузі застосування. Існують три варіанти технологічного процесу їх виготовлення: синтез із гексагонального нітриду бору, синтез із в'юрцитоподібного нітриду бору, спікання порошків кубічного нітриду бору з легуючими добавками.

За першим варіантом надтверді матеріали виготовляються двох марок: композит 01 (Ельбор-Р) і композит 02 (Білбор). Синтез композиту 01 відбувається з каталізатором, а 02 – без нього. Кінцевий продукт в обох випадках – кубічний нітрид бору.

За другим варіантом синтетичний надтвердий матеріал одержують також двох основних марок: композит 10 (Гексаніт-Р) та композит 09 (ПТНБ). Останній є результатом синтезу із суміші в'юрцитоподібного кубічного нітриду бору, причому в цьому разі кінцевий продукт – тільки кубічний нітрид бору. Композит 10 одержують синтезом і спіканням: початковий матеріал – в'юрцитоподібний нітрид бору, кінцевий – суміш в'юрцитоподібного та кубічного нітридів бору.

За третім варіантом технологічного процесу виготовляється синтетичний надтвердий матеріал лише однієї марки – композит 05 (спіканням порошків кубічного нітриду бору та Al_2O_3 і його модифікація композит 05И).

Полікристали цих марок відрізняються розмірами та фізико-механічними властивостями. Матеріали, синтезовані з гексагонального нітриду бору, які містять у кінцевому продукті лише кубічну форму (композити 01 та 02), мають максимальну твердість HRA 70–80, але невелику міцність на вигин (0,5–1 ГПа). Діаметр і висота їх становлять близько 4 мм, маса дорівнює 0,8 карата. Композит 10 має мікротвердість дещо нижчу, але міцність на вигин його вища, ніж композитів 01 та 02 (1,2–

1,5 ГПа), що дає змогу використовувати композит 10 в умовах ударного навантаження, наприклад при фрезеруванні. Діаметр його полікристалів становить 4–6 мм, висота – 4–5 мм, маса – 1,5 карата.

Композит 09 (ПНТБ-ИК) виготовляється трьох марок: ИК1 – заготовки діаметром 3,8 мм заввишки 4,2 мм; ИК2 – відповідно 8 і 3,5 мм; ИК3 – 1,8 та 3.8 мм; мікротвердість їх становить 78–90 ГПа, міцність – $\sigma_B=0,6-1,2$ ГПа.

Рекомендовані галузі застосування. У табл. 5.7 та 5.8 наведені рекомендації щодо застосування інструментів із ПКНБ для лезової обробки сталей, чавунів і твердих сплавів та режими різання. Режими різання під час точіння і розточування інструментами з композитами різних марок. Загалом різці з композита застосовують замість твердосплавних різців при обробці загартованих сталей, чавунів і важкооброблюваних сталей на операціях:

- розточування отворів діаметром від 6 мм замість шліфування;
- розточування отворів з одночасним підрізуванням торця замість шліфування;
- точіння багатоступінчастих деталей з одночасним підрізуванням торця та зняттям фасок (валики, шпинделі, осі тощо);
- прецизійна обробка заготовок замість точіння твердосплавними різцями;
- нарізання різі з малим кроком;
- чистова обробка термічно неопрацьованих сталей замість шліфування.

Таблиця 5.7 – Рекомендації щодо застосування інструментів із ПКНБ для лезової обробки сталей, чавунів і твердих сплавів

Марка композита	Вид інструменту	Рекомендації щодо застосування інструментів
1	2	3
01 (Ельбор-Р, Ельбор-РМ), 02 (Білбор)	Різці (переточувані) для тонкого та чистового точіння	Тонке та чистове точіння без удару сталених заготовок твердістю до HRC 55-70, чавунів будь-якої твердості, твердих сплавів ВК15, ВК20 і ВК25 з глибиною різання до 0,5 мм

Продовження табл. 5.7

1	2	3
02 (Ельбор-РМ)	Фрези (переточувані) для чистового фрезерування	Фрезерування загартованих і незагартованих сталей та чавунів з глибиною різання до 2 мм
05,05 ИТ (композит)	Різці та фрези з механічним кріпленням	Чистове і напівчистове точіння без удару сталених заготовок твердістю HRC 40-60 та чавунів твердістю до HB 300 з подачами до 0,3 мм/об. і глибиною різання до 2 мм, фрезерування сірих чавунів
09 (полікристалічний твердий нітрид бору)	Різці (переточувані) для тонкого, напівчистового та чистового точіння	Тонке, чистове та напівчистове точіння з ударом і без нього сталених заготовок твердістю до HRC 60, чавунів будь-якої твердості, твердих сплавів BK15, BK20 та BK25 з глибиною різання до 1,5 мм, точіння наплавлених поверхонь
10 (Гексаніт-Р)	Різці (непереточувані з механічним кріпленням) для тонкого, чистового та напівчистового точіння. Фрези (переточувані) для чистового фрезерування	Тонке, чистове та напівчистове точіння заготовок з конструкційних, легованих і швидкорізальних сталей твердістю до HRC 40-60, сірих, високоміцних та вибілених чавунів будь-якої твердості, фрезерування сталей твердістю HRC 58-60 та чавунів будь-якої твердості

Технічна ефективність. Застосування лезових інструментів з кубічного нітриду бору при обробці загартованих сталей дозволяє:

- одержати малу шорсткість (високий клас) поверхні й високу точність обробки;
- забезпечити відсутність структурних змін і шаржування абразиву в поверхневому шарі оброблюваних сталей (при заміні шліфування);
- виконувати лезову механічну обробку після термообробки;
- підвищити продуктивність обробки.

При обробці чавунів такими інструментами досягаються мала шорсткість поверхні (до 0,3 мкм) і висока точність обробки за рахунок меншого розмірного зношування. Застосування таких інструментів особливо ефективно на верстатах з ЧПК.

Таблиця 5.8 - Режими різання при точінні і розточуванні інструментами з композитами різних марок

Оброблювані матеріали	Оброблення	Операція	Марка композита	Глибина різання, мм	Подача, мм/об.	Швидкість різання, м/хв
1	2	3	4	5	6	7
Інструментальні, підшипникові, леговані і конструкційні сталі, термооброблені до твердості 40<HRC<(58–60)	Напівчистове	Точіння	05	0,5–1,0	0,1–0,2	50–100
		Розточування	05	0,3–0,5	0,10–0,15	40–90
	10		0,25–0,3	0,10–0,12	40–90	
	Чистове	Точіння	01, 02, 03, 05	0,25–0,3	0,05–0,08	60–120
		Розточування	09, 10	0,15–0,25	0,05–0,08	50–120
		Точіння		0,25–0,5	0,05–0,07	50–100
	Тонке	Розточування	01, 02, 03 09, 10	0,15–0,25	0,05–0,07	50–100
		Точіння		0,05–0,1	0,005–0,01	80–180
		Розточування		0,02–0,05		80–180
	Точіння	0,05–0,1	60–120			
Швидкорізальні, високолеговані сталі твердістю (58...60)<HRC<(68–70)	Чистове	Точіння	01, 02, 03 09, 10	0,2–0,3	0,04–0,07	60–120
		Розточування		0,1–0,2	0,1–0,2	300–400
		Точіння	01, 05	0,5–1	0,1–0,2	100–200
Напівчистове	Розточування	01, 05	0,25–0,5	0,10–0,15		
	Точіння	10	0,5–0,7	0,10–0,15		
	Чистове	Розточування	01, 02, 05	0,25–0,5	0,10–0,12	100–150
Точіння			0,2–0,5	0,10–0,12		
Розточування			0,15–0,25	0,10–0,12	100–200	
Тверді сплави для штамів і пресів	Чистове	Точіння	09, 10	0,1–0,2	0,04–0,09	5–10
		Розточування		0,1–0,2	0,005–0,02	
		Точіння	01, 09, 10	0,05–0,1		8–12
Інструментальні та підшипникові сталі твердістю (58–60) <HRC<(68–70)	Чистове	Розточування	09, 10	0,17–0,2	0,04–0,07	50–100
		Точіння		0,2–0,4		
	Тонке	Розточування	01, 02, 03	0,15–0,2	0,005–0,02	40–70
		Точіння		0,05–0,1		30–60
		Розточування	09, 10	0,02–0,05	0,1–0,2	80–150
		Точіння		0,05–0,1		60–100
Розточування		0,02–0,05	60–80			
Точіння		1–1,5	40–60			
Сірі та високоміцні чавуни твердістю HB 160–270	Напівчистове	Розточування	10	0,5–0,7	0,1–0,15	20–400
				0,25–0,5	0,1–0,15	200–300
		Точіння	01, 02, 03, 05	0,2–0,5	0,1–0,12	400–600

Ефективність під час розточування досягається за рахунок підвищення продуктивності обробки, тому що жорсткість технологічної системи під час розточування вища, ніж при внутрішньому шліфуванні.

Ефективність обробки під час розточування отвору з одночасним підрізуванням торця досягається не лише за рахунок заміни операції внутрішнього шліфування, а й завдяки виконанню двох операцій з однієї установки. Об'єднати ці операції при токарній обробці значно простіше, ніж при шліфуванні.

Глибина різання під час точіння такими різцями обмежується розмірами заготовки і не може перевищувати 1,2–1,5 мм. Вибір величини подачі залежить від необхідного класу шорсткості обробленої поверхні. При цьому керуються такими орієнтовними даними: при подачах 0,02–0,04 мм/об. можна одержати шорсткість обробленої поверхні 8–9-го класу, а при подачах 0,04–0,08 мм/об. – 7–8-го класу. Більші значення подач (0,12 мм/об.) застосовують для напівчистої і чорнової обробках, при яких забезпечується 6-й клас шорсткості поверхні.

Інструменти з ПКНБ рекомендується також застосовувати в ремонтному виробництві при механічній обробці зношених деталей під ремонтний розмір або перед нанесенням покриттів, а також деталей, відновлених різними методами (наплавленням, металізацією, напилюванням, гальванічним нарощуванням, напінанням металевими порошками, заливанням рідким металом та ін.). Це пояснюється тим, що лише методи механічної обробки дозволяють одержати необхідну точність розмірів, форми і взаємного розташування поверхонь, а також необхідну шорсткість.

5.4. Короткі рекомендації з вибору і застосування ПНТМ

Великі розміри полікристалів дозволяють використовувати ці матеріали для виготовлення змінних пластин різної форми та розмірів.

Полікристали в основному виготовляються у вигляді сфери і циліндрів з розмірами: довжина 3,5–5 мм, діаметр 3–5 мм; останні випуски – великогабаритні полікристали у вигляді диска товщиною більше 8 мм і діаметром до 40 мм.

Полікристали з державкою з'єднують вакуумним паянням, а також гарячим обпресуванням сталеві втулки з полікристалом.

Форми і розміри пластин відповідають стандарту ISO 1832:1991 E – круглі, квадратні, трикутні, ромбічні з діаметрами описаного кола: від 3,97 до 6,35 мм (трикутні); 9,53 мм (ромбічні); 15,9 мм (квадратні) і 36 мм (круглі). Пластини з однією різальною вершиною випускаються всіх типорозмірів, передбачених стандартом ISO. Товщина пластин – від 1,59 до 7,97 мм, радіуси біля вершини – від 0,2 до 4,0 мм, задні кути – від 0 до 11°. Конструктивні параметри пластин із ПНТМ регламентуються ТУ 2-037-636-89 «Пластини різальні змінні багатогранні з надтвердих матеріалів», ТУ 88-90-1244-91 «Пластини алмазотвердосплавні для різального і бурового інструменту» і ТУ 2-035-808-81 «Форма та розміри пластин із синтетичних надтвердих матеріалів». Кріплення пластин роблять як механічно, так і за допомогою паяння (двошарові пластини).

Часто застосовують збірні інструменти зі вставками з НТМ. Змінні вставки, оснащені НТМ, призначені для закріплення в сталевих корпусах збірного лезового інструменту (різців, фрез та ін.), оправок, бортишанг тощо. Найпоширеніші конструкції вставок показані на рис. 5.7.

Вставки до інструментів виготовляються 20 типорозмірів

діаметром 8–16 мм, висотою 5–8,5 мм і довжиною 13–30 мм із різними кутами заточення.

Із багатолезових інструментів освоєні торцеві фрези діаметром від 60 до 250 мм, які, наприклад, зі вставками зі НТМ на основі VN застосовують для оброблення заготовок із за-

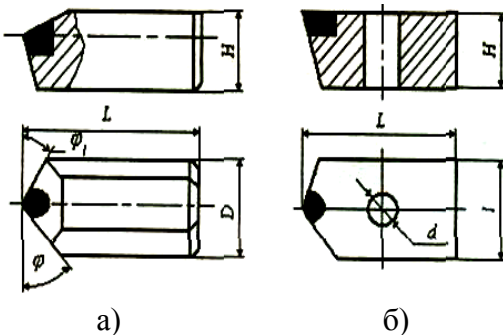


Рисунок 5.7 – Змінні вставки, оснащені НТМ: циліндрична (а); призматична з отвором (б)

гартованих сталей (окрім швидкорізальних і високохромистих (типу X12M)) при виготовленні деталей шгампів, прес-форм, напрямних станин верстатів тощо, і чавунів – корпусів коробок передач, кронштейнів і т.ін.

Геометричні параметри інструменту з НТМ у багато чому визначаються його властивостями та умовами обробки. З огляду на схильність НТМ до крихкого руйнування різальні кромки інструментів повинні мати підвищену міцність. З метою забезпечення високої міцності різальної кромки кут загострення β для інструменту з НТМ повинен бути максимально можливим.

Передній кут γ від 0 до 15°, задній кут α від 2 до 6°, радіус вершини r_v від 0,2 до 1,0 мм обирають від виду оброблюваного матеріалу і необхідної чистоти обробленої поверхні.

Для забезпечення шорсткості обробленої поверхні до $R_a=0,1$ мм різальна кромка не повинна мати відколів, а передня і задня поверхні інструмента – оброблені до шорсткості $R_a=0,01-0,015$ мм. Радіус округлення різальної кромки ρ повинен досягати розмірів менше 10 мкм.

У зв'язку з підвищеною чугливістю інструментів із ПНТМ до вібрацій і ударних навантажень, до верстатів, які використовують для обробки різальними елементами із ПНТМ, ставляться підвищені вимоги щодо точності, вібростійкості та жорсткості.

Висока ефективність застосування інструмента, оснащеного полікристалами композита, обумовлена унікальним поєднанням їхніх фізико-хімічних характеристик: високою твердістю (400–750 МПа), тобто в 2–4 рази більшої, ніж у твердих сплавів; високою теплостійкістю (1100–1300 °С); хорошою теплопровідністю (42–50 Вт/(м·К)), яка не знижується при підвищенні температури; високою гостротою різальної кромки (радіус округлення кромки не перевищує 2,0–3,0 мкм протягом усього періоду стійкості інструмента і практично не залежить від режимів різання); достатньою в'язкістю і міцністю.

Марки кубічного нітриду бору 01, 05 та 10 і режими обираються залежно від оброблюваного матеріалу, його твердості,

характеру обробки (різання з ударом або без удару), вимог до якості обробки та ін.:

- композит 01 (Ельбор-Р) і композит 02 (Білбор) КНБ із мінімальною кількістю домішок застосовуються для тонкого і чистового точіння, переважно без удару, і торцевого фрезерування деталей із загартованих сталей і чавунів будь-якої твердості, із твердих сплавів зі вмістом кобальту менш 15% із глибиною різання 0,05–0,5 мм (максимально припустима – 1 мм);

- композит 05 – полікристали, спечені із зерен КНБ зі зв'язкою. Застосовуються для попереднього й остаточного точіння без удару деталей із загартованих сталей HRC<60 і чавунів будь-якої твердості із глибиною різання 0,05–3 мм, а також для торцевого фрезерування чавунів будь-якої твердості, у тому числі по кінці, з глибиною різання 0,05–1,2 мм (багатоступінчастими фрезами – до 6 мм);

- композит 10 (Гексанит-р) і двошарові пластини з композиту 10Д – полікристали на основі вюртцитоподібного ніприду бору (ВНБ) – застосовуються для попереднього й остаточного точіння з ударом і без удару та торцевого фрезерування деталей зі сталей і чавунів будь-якої твердості, твердих сплавів (у тому числі таких, що містять кобальт більше 15%) із глибиною різання 0,05–3 мм.

Інтенсифікація режимів різання при впровадженні інструменту із синтетичних надтвердих матеріалів здійснюється, як правило, за рахунок збільшення швидкості різання. Тому головним резервом підвищення продуктивності обробки для інструмента на основі VN є швидкість різання, яка може перевищувати швидкість різання твердосплавним інструментом у 5 і більше разів як при обробці чавуну, так і при обробці сталі (табл. 5.9). З таблиці бачимо, що найбільша ефективність застосування інструментів на основі VN спостерігається при обробці високотвердих і високоміцних чавунів та сталей.

Для обробки наплавлених поверхонь і важкооброблюваних матеріалів Інститутом надтвердих матеріалів АН України створені полікристалічні НТМ – кіборит, карбоніт та алмазні біпластини. Різцями з кібориту можна обробляти, крім деталей, виконаних із

загартованих сталей і різних марок чавунів, також і з наплавленим поверхневим шаром, розміри якого досягають 2 мм і більше.

Таблиця 5.9 — Швидкості різання різними інструментами з твердих сплавів та ПКНБ

Оброблюваний матеріал		Швидкість різання, м/хв, для інструментального матеріалу			
		Точіння		Фрезерування	
		Композит	Твердий сплав	Композит	Твердий сплав
Сталь	HB 150-250	100–200	130–300	400–900	100–300
	HRC 45-55	80–160	25–45	200–500	30–70
	HRC 60-70	60–120	10–15	80–200	–
Сірий чавун (HB 120-240)		600–1000	100–200	800–3000	800–3000
Високоміцний чавун (HB 160-330)		400–800	50–100	500–2000	50–80
Вибілений і загартований чавун (HRC 40-60)		50–150	10–20	200–800	10–20

Наприклад, при безударній обробці загартованої сталі ХВГ (HRC 60–62) і нержавіючої загартованої сталі 40Х13 (HRC 58) стійкість таких різців у 1,5–2 рази перевищує стійкість різців, оснащених іншими марками полікристалічних НТМ.

У найближчі роки світовий ринок інструменту з НТМ очікує різкий підйом. Це пояснюється насамперед тим, що в різних галузях техніки все більше застосування знаходять важкооброблювані матеріали і принципово нові схеми обробки.

Ефективність інструменту з НТМ найбільш повно проявляється в умовах автоматизованого виробництва та гнучкої зміни технологій механообробки. При застосуванні ПНТМ на оптимальних режимах різання на верстатах із ЧПК продуктивність обробки підвищується в 1,5–3 рази порівняно із твердосплавним інструментом, поліпшується якість оброблених поверхонь, і, як правило, виключається необхідність подальшої абразивної обробки.

5.5. Основні тенденції вдосконалювання ПНТМ

Останніми роками створено цілий ряд синтетичних надтвердих матеріалів як на основі алмазу, так і на основі кубічного нітриду бору: алмет, бормет, кіборит, ніборит та ін. Фізико-механічні властивості цих матеріалів дивись у табл. 5.3 та 5.4. Перевагами їх є насамперед значні розміри – до 15 мм, можливість оброблення в'язких матеріалів з великими глибинами різання та подачами. Проводяться експерименти щодо створення із цих матеріалів багатограних непереточуваних пластин. Під час виробничих випробувань нових синтетичних надтвердих матеріалів застосовувалися режими різання, зазначені в табл. 5.10.

Таблиця 5.10 – Режими різання під час випробувань нових синтетичних надтвердих матеріалів

Марка синтетичного надтвердого матеріалу	Оброблювані матеріали	Глибина різання, мм	Подача, мм/об.	Швидкість різання, м/хв	
Композит 02Д	Загартовані високоміцні сталі, тверді сплави	0,05–1,5	0,05–0,15	65–110	
Кіборит	Загартовані сталі	0,05–1,5	0,05–0,15	60–100	
	Жароміцні сталі	0,1–0,8	0,1–0,25	25–90	
Ніборит	Корозійно-стійкі сталі марок:	12Х18Н9Т	4	0,24	180
		38ХНЗМФА	4	0,25	170
Бормет	Сталі високої та середньої твердості	0,1–1,5	0,1–0,4	60–200	

Примітки: 1. Композит 02Д випускається у вигляді двошарових пластин. 2. Оброблення сталі 38ХНЗМФА кіборитом – чорнове, напівчистове та чистове.

Перспективні технічні характеристики має новий синтетичний матеріал, створений на основі кубічного нітриду бору, – кіборит. Кіборит можна застосовувати на чистових і чорнових режимах оброблення. Він зберігає високу стійкість проти спрацювання при швидкостях різання до 200 м/хв, дає можливість обробляти наплавлені поверхні деталей твердістю до HRC 59-63, що практично неможливо виконати іншими інструментами. Завдяки високій стабільності властивостей у межах усієї виготов-

леної партії, незалежності властивостей від температури кіборит особливо перспективний для використання на верстатах із числовим програмним керуванням, автоматах та автоматичних лініях, гнучких автоматизованих виробництвах тощо.

Алмет доцільно використовувати при обробленні неметалевих матеріалів. Його стійкість при цьому в 3–8 разів вища, ніж інструментів, виготовлених із твердих сплавів.

Цікавим є досвід застосування інструментів типу "сендвіч" (бутерброд). Такий інструмент складається з високоміцної металевої основи, покритої композитом 01 або композитом 10, – двошарової пластини нігриду бору аналогічно шаруватим пластинам з різальною керамікою. Двошарова пластина нігриду бору, як і шарувата пластина з різальною керамікою, дає можливість реалізувати високі теплостійкість і стійкість проти спрацювання покриття із синтетичних надтвердих матеріалів, а також високу міцність металевої основи. Галузь застосування двошарових пластин нігриду бору – напівчистове й чистове точіння важкооброблюваних матеріалів (загартованих сталей, чавунів, твердих сплавів), у тому числі з ударом. Режими різання, рекомендовані під час точіння та розточування інструментами з двошарової пластини нігриду бору, наведено в табл. 5.11.

Таблиця 5.11 – Режими різання під час точіння та розточуванні інструментами, оснащеними двошаровими пластинами з нігриду бору

Оброблювані матеріали		Оброблення	Характер процесу різання	Глибина різання, мм	Подача, мм/об	Швидкість різання, м/хв
Загартовані сталі твердістю HRC:	40-58	Напівчистове	3 ударом	1–2,5	0,1–0,15	40–80
		Чистове	Те саме	0,05–1	0,04–0,1	50–90
	58-63	Напівчистове	Без удару	0,2–0,8	0,03–0,1	60–120
Сірі та високоміцні чавуни		Чистове	3 ударом	0,2–0,4	0,03–0,07	40–80
		Напівчистове	Без удару	0,8–1,5	0,1–0,2	200–400
		Чистове	3 ударом	0,2–0,6	0,02–0,08	300–500

Промисловістю випускаються різці, оснащені двошаровими пластинами з полікристалів нітриду бору – композита 05ИТ 2С, а також пластини з Гексаніту-Р (композита 10).

5.6. Наукові й технологічні основи створення нових алмазовмісних матеріалів методом СВС

Традиційні способи одержання алмазовмісних матеріалів з керамічною і металокерамічною зв'язками є сукупністю складних технологічних операцій, які передбачають спікання при високих температурах і тисках. Це пов'язане з тим, що алмаз, будучи при високих температурах і нормальному тиску термодинамічно нестабільною модифікацією вуглецю, при нагріванні втрачає свої міцнісні властивості й переходить у графіт. Поводження алмазу при температурах більше 800 °С, зокрема швидкість знеміцнення, сильно залежить від його природи, домішкового складу і розміру зерен, складу атмосфери.

Узагальнюючи різні літературні дані з графігізації алмазу, було відзначено, що, незважаючи на досить значний розкид у знаннях початкової температури графігізації, при температурах нижче 200 °С спостерігається порівняно повільна поверхнева графігізація, а при більш високих температурах відбувається об'ємне перетворення алмазу в графіт. У зазначених випадках швидкість нагрівання була невисокою з ізотермічною витримкою протягом декількох хвилин.

У працях професора Левашова Є. О. уперше показана принципова можливість одержання нових алмазовмісних матеріалів з керамічною і металевою зв'язками методом самопоширеного високотемпературного синтезу (див. розд. 0). Новий підхід до створення алмазовмісних матеріалів базується на тому, що алмазне зерно в певних умовах витримує без істотних змін своїх властивостей короточасний вплив високотемпературної хімічної хвилі синтезу. Установлено, що ступінь збереження алмазу у хвилі горіння залежить від цілого ряду параметрів, таких як температура і швидкість горіння; склад атмосфери, у якій здійснюється реакція горіння; масовий вміст алмазу в реакційній суміші; дисперсність і природа алмазу; взаємна розчинність і

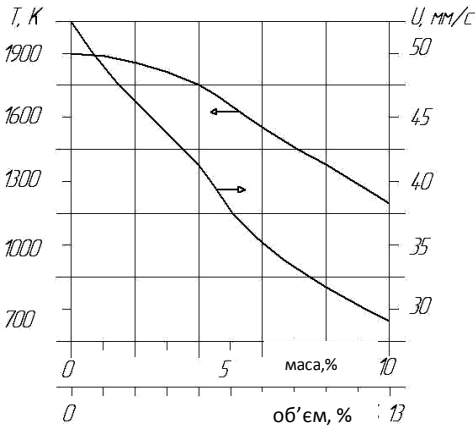


Рисунок 5.8 – Характерні залежності температури і швидкості горіння суміші NiAl з концентрацією алмазного розріджувача

міжфазна взаємодія алмазу і зв'язки; проміжні й кінцеві продукти синтезу; швидкість охолодження продуктів синтезу та ін.

Експериментальні дослідження і розрахунки були проведені на різних екзотермічних системах, таких як Ti-B, Ni-Al, Ti-C-Ni, Ti-Mo-C, Ni-Al-Cu-Ti, Cu-Al-Ni-Sn, Ti-Al-C. Характерні залежності температури і швидкості горіння від концентрації алмазу в суміші наведені на рис. 5.8 на при-

кладі системи NiAl-Алмаз. При цьому використовувалися порошки нікелю марки ИНК, алюмінію марки ЛСД-4, алмазу синтетичного АС20 фракції 160/125 мкм. Подібний характер залежностей спостерігався й у системах на основі Ti-B та Ti-C. Останнє свідчить про те, що алмаз за певних умов є інертним розріджувачем і не лише не бере участі у реакціях горіння, а й, навпаки, зі зростанням температури горіння і збільшенням швидкості поширення хвилі горіння поліпшується збереження міцніших властивостей алмазу.

Проведені в роботі оцінки дозволили пояснити характер залежності міцності алмазів у продуктах синтезу від макрокінетичних параметрів горіння.

Об'ємне знеміцнення алмазу в умовах СВС- процесу більшою мірою залежить від часу його перебування у високотемпературній зоні, ніж від абсолютного значення цієї температури.

Існує, крім того, ще один позитивний фактор, властивий СВС-процесу. Під час проходження хвилі горіння відбувається інтенсивне газовиділення адсорбованих і розчинених домішок. Створювана переважна відбудовна атмосфера обмежує доступ

кисню до гарячих продуктів синтезу, що сприяє інертності алмазу до окислювання.

Аналіз процесів, що відбуваються у хвилі горіння різних систем з алмазом, виконаний вченими різних країн (Росія, Японія), дозволив сформулювати таку проблематику нового методу одержання алмазовмісних матеріалів:

а) вивчення поведінки кристала алмазу у хвилі СВЧ. Аналіз взаємодії кристалів алмазу з продуктами горіння і з вихідними реагентами в зоні прогрівання. Дослідження динаміки зміни міцності й морфології алмазних зерен у різних зонах хвилі горіння. Аналіз впливу концентрації алмазу на процес горіння реакційної суміші;

б) розроблення умов і технологічних прийомів, необхідних для одержання конкурентоспроможних матеріалів методом СВЧ;

в) пошук перспективних СВЧ-композицій для виготовлення алмазного інструменту різного цільового призначення;

г) проведення порівняльних лабораторних і виробничих випробувань отриманих виробів.

Розроблено декілька технологічних прийомів, що дозволяють підвищити ймовірність втрати міцності алмазу у хвилі горіння і поліпшити якість кінцевих продуктів синтезу. До їхнього числа належить двошаровий варіант проведення СВЧ- процесу з виділенням алмазу і реакційної суміші лише одного шару. При цьому другий шар сприяє збільшенню швидкості поширення хвилі горіння й суміші з алмазом і зменшенню часу перебування алмазу в зоні горіння. Цей технологічний прийом дозволяє збільшити також концентраційну межу розведення суміші алмазом.

Другим технологічним прийомом є додавання в суміш газовиділяючої речовини з температурою дисоціації, набагато меншою від температури горіння, що створює в процесі синтезу захисну відновлювальну атмосферу. Прикладом такої речовини є гідрид титану TiH_2 .

Нарешті, третім прийомом є перехід до низькоекзотермічних сполук з невисокою температурою горіння і відносно висо-

кою лінійною швидкістю поширення хвилі горіння. Прикладом таких сполук є суміші на основі Ni-Al.

Питання для самоперевірки

1. Охарактеризуйте особливості кристалічної будови графіту, алмазу, графітоподібного і кубічного нітриду бору.
2. За якими характеристиками відрізняються природні й штучні надтверді матеріали на основі вуглецю?
3. Охарактеризуйте піраміду твердості неметалевих тугоплавких сполук.
4. Охарактеризуйте галузі використання природних алмазів.
5. Чому в машинобудівній галузі природний алмаз має обмежене використання?
6. За якими властивостями кубічний нітрид бору перевершує алмаз?
7. Охарактеризуйте особливості одержання синтетичних інструментальних матеріалів на основі алмазу і кубічного нітриду бору.
8. Наведіть класифікацію полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) та охарактеризуйте їхні властивості.
9. Охарактеризуйте особливості кристалічної будови та властивості кубічного карбонітриду бору.
10. Дайте характеристику основних властивостей і галузі застосування полікристалів синтетичного алмазу.
11. Охарактеризуйте основні переваги та недоліки синтетичних надтвердих матеріалів порівняно з іншими інструментальними матеріалами.
12. Дайте характеристику основних властивостей і галузі застосування ПНТМ на основі щільних модифікацій нітриду бору.
13. Наведіть короткі рекомендації з вибору і застосуванню ПНТМ. Укажіть раціональні галузі застосування ПНТМ.
14. Які надтверді інструментальні матеріали краще обирати при обробці сталей, чавунів, кольорових металів?
15. Які надтверді інструментальні матеріали краще обирати при чорновій і чистовій обробках?

16. Які надтверді інструментальні матеріали можуть використовуватися при обробці високоміцних матеріалів, наплавлених матеріалів і матеріалів у загартованому стані?
17. Виберіть марку синтетичного надтвердого матеріалу для оброблення, якщо задано:

Матеріал заготовки		Вид оброблення
Чавун твердістю до HB 300		Точіння з ударом
Твердий сплав BK15		Фрезерування
Сталь	конструкційною твердістю HRC 55	Розточування
	швидкорізальна	Чистове розточування
	інструментальна	Розточування напівчистове
	ШХ15	Точіння

Слова та терміни в розділі 5

Алотропія (від грецьк. allos – інший, tropos – властивість) – існування хімічних елементів у вигляді двох або більше простих речовин. Наприклад, утворення кристалів різних модифікацій (алмаз і графіт), які складаються з атомів вуглецю (С).

АСБ (балас) – марка синтетичного алмазу.

АСПК (карбонадо) – марка полікристалічного алмазу.

АТП – алмазна куля, спечений із твердосплавною пластиною.

ВР – (тверді) вибухові речовини.

В'юрцитний нітрид бору (ВНБ) – дрібноволокониста структура нітриду бору.

Вюрцитоподібний (нітрид бору) – французький хімік В'юрц провів хімічну реакцію органічної речовини з металевим натрієм і одержав алифатичні системи, які мають дрібноволоконисту структуру.

Дисоціація – відокремлення, розпад (частинки, молекули, іона) на декілька більш простих частинок. Якщо ці частинки за величиною будуть менше ніж 100 нанометрів, то вони називаються наночастинками.

Ізотерма (від грецьк. izos – однаковий і therme – тепло) – лінія на діаграмах стану, що зображує ізотермічний процес.

Ізотермічний процес – процес, що проходить за сталої температури.

Ізотропія – однорідність матеріалу в різних напрямках.

Ізотропність – однакова міцність матеріалу в різних напрямках.

ІНМ НАНУ – Інститут надтвердих матеріалів національної академії наук України.

ІФВТ РАН – інститут фізики високих тисків Російської академії наук.

Композит, кіборит, ніборит – марки полікристалічного кубічного нітриду бору.

КТП – куля з кубічного нітриду бору (КНБ), спечений із твердосплавною пластиною.

Літографічний камінь (вапняк), одержав назву (від літ- і графія) – спосіб плоского друку, при якому друкованою формою служить поверхня каменю – вапняку.

Макрокінетичні параметри (що приводять у рух) – у розділі механіки, що поєднує статику і динаміку.

ПКА – полікристалічний синтетичний алмаз.

ПКТМ – полікристалічний кубічний нітрид бору.

ПНТМ – полікристалічний (композиційний) надтвердий матеріал.

МОТС – мастильно-охолодне технологічне середовище.

НТМ – надтверді матеріали.

Термодинамічний стан фізичної системи – визначається у разі рівноважних значень її параметрів: температури, тиску, об'єму, концентрацій компонентів.

УДА – ультрадисперсні алмази, синтезовані при детонації твердих вибухових речовин (ВР) в інертній атмосфері.

Шаржування – упровадження твердих абразивних зерен у поверхню м'якого матеріалу шляхом втирання (вдавлення).

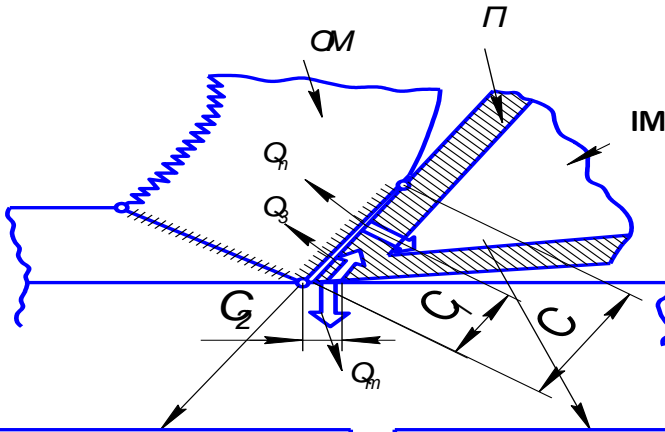
Шорсткість 7, 8, 9-го класів чистоти – відповідає $R_a = 0,31$ мкм, $R_a = 0,08$ мкм, $R_a = 0,04$ мкм.

Екзотермічна система – реакція (система) термічна (горіння), при якій з реагуючої системи в навколишнє середовище виділяється теплота.

6. ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ЗІ ЗНОСОСТІЙКИМИ ПОКРИТТЯМИ

Застосування традиційних методів підвищення різальних властивостей інструментів за рахунок складного легування інструментальних матеріалів на сьогодні в основному обмежене через дефіцитність ряду елементів. У зв'язку з цим актуальним завданням є створення принципово нових інструментальних матеріалів, так званих композиційних, що мають підвищену поверхневу зносостійкість і відносно високу міцність та в'язкість. До таких матеріалів належать у першу чергу матеріали, на які нанесені зносостійкі покриття. Відомо, що різальні властивості інструменту визначаються складним комплексом факторів (див. розд. 0). Наприклад, вони залежать від хімічного складу, структури та кристалохімічної будови ґратки інструментального матеріалу, що визначають найважливіші експлуатаційні властивості інструменту – мікротвердість, теплостійкість, теплопровідність, міцність, ударну в'язкість, корозійну стійкість і стійкість проти окислення при підвищених температурах. У свою чергу, зазначені властивості інструментального матеріалу визначають контактні характеристики, термомеханічний напружений стан і працездатність інструменту.

Кристалохімічна будова покриття, його фізико-механічні й теплофізичні властивості можуть значно відрізнятись від відповідних властивостей інструментального та оброблюваного матеріалів, тому покриття варто розглядати як своєрідне «третє середовище», яке, з одного боку, може помітно змінювати поверхневі властивості інструментального матеріалу, з іншого боку – впливати на контактні процеси, деформації, сили та температури різання, спрямованість теплових потоків, термодинамічний напружений стан різальної частини інструменту та т.ін. (рис. 6.1). Задаючи властивості покриття шляхом варіювання його хімічним складом і будовою, можна змінювати основні характеристики процесу різання (силовий і тепловий стани системи різання).



Роль покриття на межах контакту ОМ-П

- зниження фізико-хімічної активності ІМ по відношенню до ОМ
- зниження сил тертя на площадках контакту довжиною C_1 і C_2
- зниження роботи фрикційних вогнищ, тепла Q_y і Q_x
- зниження інтенсивності теплових потоків Q_z , Q_h , Q_m
- зменшення інтенсивності дифузійних процесів між контактуючими ІМ та ОМ

Роль покриття на межах контакту П-І-М

- підвищення поверхневої твердості ІМ
- підвищення поверхневої теплостійкості ІМ
- підвищення зносостійкості ІМ
- підвищення теплопровідності ІМ
- створення бар'єрів дифузійним процесам між ОМ та ІМ
- створення перегородок тепловим потокам в ІМ із зон тертя

Результат зниження сил тертя, сил різання, контактної температури, зменшення теплової напруженості інструменту, деталі, системи різання в цілому, зниження інтенсивності зношування інструменту

Рисунок 6.1 – Роль покриття, нанесеного на робочі поверхні леза інструменту на межах контакту «оброблюваний матеріал – покриття» (ОМ-П) і «покриття – інструментальний матеріал» (П-ІМ)

Зокрема, покриття може сприяти зниженню тертя в зонах фрикційного контакту (на передній і задній поверхнях леза) і зменшувати потужність фрикційних джерел тепла, підвищувати температурний поріг початку адгезії, знижувати активність дифузійних процесів, що сприятливо впливає на зниження інтенсивності зношування інструменту. Все це дозволяє, в кінцевому підсумку, керувати найважливішими вихідними параметрами процесу різання – зношуванням інструменту і якістю поверхневого шару оброблюваних деталей. Крім того, процес нанесення покриття дозволяє спрямовано впливати на поверхневі дефекти інструментального матеріалу, що у поєднанні з можливістю формування стабільних характеристик покриття може сприяти помітному підвищенню надійності інструменту.

Таким чином, нанесення зносостійких покриттів на інструментальні матеріали дозволяє наблизитися до вирішення завдання створення «ідеального» інструментального матеріалу (див. рис. 1.5), який має високу зносостійкість у поєднанні з достатньою міцністю і в'язкістю. Різальний інструмент, виготовлений з такого матеріалу, може задовольняти найвищі вимоги, що ставляться до якості, продуктивності й надійності процесу обробки.

Випуск інструментів із покриттям може здійснюватися як в умовах масового виробництва на спеціалізованих інструментальних заводах і комбінатах, так і в інструментальних цехах машинобудівних підприємств.

6.1. Вимоги, що ставляться до зносостійких покриттів

З урахуванням специфіки роботи інструменту (високі питомі навантаження, високі температури, тертя, адгезія, дифузія та ін.) вимоги до покриттів для різальних інструментів можуть бути розділені за загальними ознаками на 4 групи:

- 1) службове призначення різальних інструментів;
- 2) сумісність властивостей матеріалів покриття та інструмента;
- 3) технологічні особливості методів одержання покриття;
- 4) загальні вимоги до покриттів.

До першої групи віднесені вимоги до покриттів, що враховують умови роботи інструмента, тобто його службове призначення. Покриття повинні мати:

1) високу мікротвердість (в 1,5–2 рази більшу за твердість інструментального матеріалу) і зберігати її необхідно при високих температурах;

2) інертністю (низькою схильністю) до адгезії (хімічної взаємодії) з оброблюваним матеріалом у всьому діапазоні обраних температур;

3) стійкістю проти високотемпературної корозії та окислювання;

4) стабільністю механічних властивостей при температурах не нижче температур теплостійкості інструментального матеріалу та інертністю до дифузійного розчинення в оброблюваному матеріалі при високих температурах;

5) високу міцність зчеплення з інструментальним матеріалом;

6) високою зносостійкістю (опірністю поверхневого утомленому руйнуванню) при значних коливаннях температур і напружень.

До другої групи віднесені специфічні вимоги до інструментального матеріалу з покриттям як єдиного композиційного тіла. У цьому разі матеріали покриття та інструмента повинні мати:

1) спорідненість кристалохімічної будови, при якій забезпечується досить міцний адгезійний зв'язок між ними;

2) оптимальне співвідношення основних фізико-механічних і теплофізичних характеристик (модуль пружності, коефіцієнти Пуассона, термічного розширення, тепло- і температуропровідності).

Поряд із переліченими вимогами необхідно також враховувати, що композиційне тіло «покриття – інструментальний матеріал» піддається відносно тривалому впливу високих напружень і температур, при яких можливі твердофазові дифузійні реакції на межі розділу матеріалів покриття та інструмента, які за певних умов можуть призвести до значних змін складу і стру-

ктури взаємодіючої пари. Позитивна роль покриття може бути передчасно втрачена. Тому однією з найважливіших вимог до матеріалів покриття та основи є зниження схильності зазначеної пари до твердофазових дифузійних реакцій у всьому діапазоні температур і напружень в умовах процесу різання.

При одержанні покриттів на різальних інструментах необхідно враховувати й ряд вимог, пов'язаних з технологічними особливостями процесів одержання покриттів. Зокрема, часто формування покриттів, які є сполуками тугоплавких металів, відбувається при відносно високих температурах. У деяких випадках ці температури можуть перевищувати температури рекристалізації інструментальних матеріалів, особливо низькотеплостійких інструментальних сталей. Тому покриття повинне бути таким, щоб у процесі його нанесення на робочі поверхні леза в інструментальному матеріалі не проходив процес рекристалізації, який різко знижує твердість інструментального матеріалу і, таким чином, різальну здатність інструменту.

До загальних вимог для покриттів, що наносяться на різальний інструмент, можна віднести:

- 1) високу щільність і суцільність, які виключають доступ активних реагентів до поверхні інструментального матеріалу;
- 2) гранично малі коливання товщини покриття на робочих поверхнях інструмента і на перехідній ділянці між передньою та задньою поверхнями;
- 3) стабільність властивостей покриття на робочих поверхнях інструмента;
- 4) можливість одержання покриття гранично простим й економічним способом;
- 5) максимальний час стабільності властивостей покриття.

У наш час в інструментальному виробництві використовуються моношарові (одношарові), багатошарові та композиційні покриття. Найбільшого поширення набули **моношарові покриття**, для яких використовують карбіди, нітриди, карбонітриди, бориди і силіциди тугоплавких металів IV–VI груп Періодичної системи елементів (IV – титан, цирконій, гафній; V – ванадій, ніобій, тантал; VI – хром, молібден, вольфрам). Засто-

совуються також оксид алюмінію Al_2O_3 та алмазоподібні покриття на основі вуглецю. Деякі із зазначених сполук уже знайшли досить широке застосування, зокрема карбіди, нітриди та карбонітриди титану (TiC , TiN та $TiCN$). Застосування багатьох інших сполук обмежене через крайню дефіцитність ряду тугоплавких металів і складної технології одержання їхніх сполук існуючими методами. Однак унікальність їхніх властивостей, особливо таких, як висока твердість, що зберігається при підвищених температурах (теплостійкість), хімічна інертність стосовно відповідного оброблюваного матеріалу, корозійна стійкість і т.ін. дозволяють припускати, що частина з них ще знайде широке застосування як покриттів для різальних інструментів. Особливо це стосується до ніридів, карбоніридів, боридів, окислів та їхніх сумішей інших тугоплавких металів груп IV–VI Періодичної системи, унікальність властивостей яких у першу чергу пов'язана з особливостями їх кристалохімічної будови. Разом з тим більшість сполук тугоплавких перехідних металів, маючи унікальні властивості і широкий діапазон властивостей, які роблять їх придатними для використання як покриттів, мають не лише переваги, а й недоліки. З урахуванням відзначеної вище подвійної природи покриття на різальному інструменті як «третього» середовища між інструментальним та оброблюваним матеріалами, використання лише однієї з тугоплавких сполук як покриття не завжди може задовольняти основні вимоги, що ставляться до покриттів для різальних інструментів.

Наприклад, покриття може одночасно мати ряд позитивних властивостей стосовно оброблюваного матеріалу (висока твердість і теплостійкість, бути хімічно інертним до нього та корозійностійким та ін.), але внаслідок своєї специфічної кристалохімічної будови бути хімічно інертним до інструментального матеріалу і не забезпечувати необхідного міцного адгезійного зв'язку з ним, що робить покриття практично непрацездатним у процесі різання, тобто іноді одночасне виконання (поєднання) деяких вимог може мати суперечливий характер. Наприклад, не можна виконати вимоги одночасного забезпечення низької адгезії до оброблюваного матеріалу і високої міцності зчеплення з

інструментальним матеріалом під час різання сталей, в основі яких міститься залізо, інструментом зі швидкорізальної сталі, в основі якої також міститься залізо. Тому зараз усе більше застосовуються **багатошарові покриття** (рис. 6.2 а) зі змінними властивостями і хімічним складом. Останні в максимальному ступені здатні задовольнити складний комплекс вимог, що ставляться до покриттів для різальних інструментів. Крім того, вони здатні добре опиратися крихкому руйнуванню в умовах розвитку тріщин або при сильних пластичних деформаціях різальної частини.

Застосування багатошарових покриттів дозволяє вирішувати й інші завдання. Наприклад, з'являється можливість використання досить крихких і кристалохімічно несумісних з інструментальним матеріалом систем, але які мають найбільшу термодинамічну стійкість серед усіх відомих сполук. Ці системи здатні зберігати високу твердість при високих температурах, мають підвищену пасивність стосовно будь-якого оброблюваного матеріалу. До таких систем можна віднести, наприклад, деякі окисли (особливо Al_2O_3), бориди (особливо HfB_2 , NbB_2 , TaB_2) і нітриди кремнію Si_3N_4 . Очевидно, що зазначені системи найбільш доцільно використовувати у багатошарових покриттях як бар'єрні шари. Ці шари могли б ефективно стримувати активні дифузійні процеси, служити своєрідним термоізолювальним шаром, знижувати схильність інструментального матеріалу до

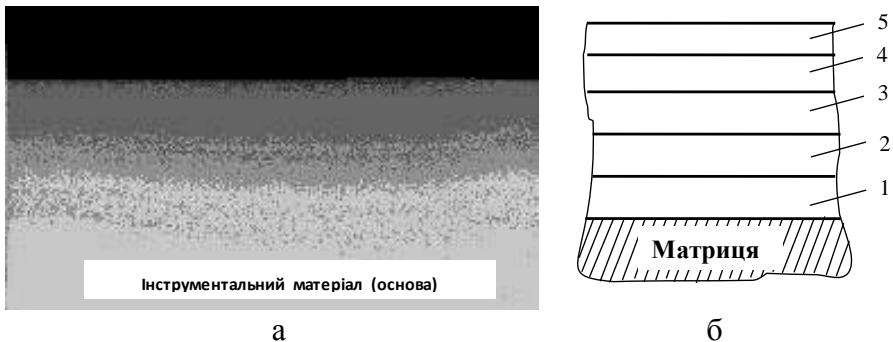


Рисунок 6.2 – Багатошарове покриття для різальних інструментів (а) та його ідеалізована схема (б)

корозії і окислювання при високих температурах. Значний інтерес для покриттів становлять подвійні й потрійні системи карбідів, нітридів, а також карбонітридів перехідних металів. Їх висока термодинамічна стійкість, твердість і міцність обумовлені великою подібністю структур і близьких розмірів атомів, що забезпечують наявність значних областей взаємної розчинності.

На рис. 6.2 б показано ідеалізовану схему багат шарового покриття для різальних інструментів, що дозволяє зрозуміти загальний підхід до проблеми створення багат шарового покриття. Шар 1, який зв'язує покриття з інструментальним матеріалом і безпосередньо прилягає до інструментального матеріалу (матриці, основи, субстрату), повинен забезпечувати міцний зв'язок покриття з робочими поверхнями інструмента. Очевидно, у цьому разі кристалохімічна будова шару та інструментального матеріалу повинні бути гранично ідентичними. Разом з тим тут необхідне й обмеження: система «шар 1 – інструментальний матеріал» не повинна давати крихких інтерметалідів при температурах ривання, тобто повинна підлягати загальним вимогам, що ставляться до покриттів. Найбільш важливим є «сумісність» теплофізичних властивостей, зокрема, коефіцієнтів термічного розширення сполучення «шар 1 – інструментальний матеріал», а також приблизну рівність коефіцієнтів теплопровідності. Бажано, крім того, щоб фізико-хімічні властивості зазначеної пари також були приблизно однакові, особливо модулі пружності, модулі зсуву, коефіцієнти Пуассона.

Шар 5 є зовнішнім шаром, який безпосередньо здійснює контактну взаємодію леза інструмента з оброблюваним матеріалом. Насамперед цей шар повинен мати низьку схильність до фізико-хімічної взаємодії з оброблюваним матеріалом, тобто служити своєрідним бар'єром твердофазним і рідиннофазним дифузійним реакціям між інструментальним та оброблюваним матеріалами. Крім того, цей шар повинен досить добре опиратися високотемпературним корозії та окисленню. З урахуванням високих контактних напружень, що діють на шар покриття на лезі різального інструменту, а також можливих значних коливань температур і напружень, шар 5 може бути передчасно

зруйнований, тому він повинен добре опиратися крихкому руйнуванню в умовах циклічних утомних навантажень. Проміжні шари 2 і 4 зі змінними властивостями здійснюють зв'язок між шарами 1, 3 і 5. Призначення шарів 2 і 4 – здійснювати зв'язок між шарами 1 і 5, що несуть основне функціональне навантаження. Тому їхні властивості повинні бути змінними від властивостей шару 1 до властивостей шару 5. Шар 3 може здійснювати чисто бар'єрні функції (наприклад, збільшувати термодинамічну стійкість покриття в цілому, збільшувати або знижувати його теплопровідність тощо).

Примітка. У загальному випадку кількість шарів у багатшаровому покритті, що здійснює зв'язок між шарами 1 і 5, може коливатися від 0 до 10 і більше, і в багатьох випадках може визначатись оптимальною товщиною покриття, що є одним з найважливіших його параметрів, що сильно впливають на прачездатність різального інструменту.

Композиційними покриттями звичайно називають складні системи подвійних і потрійних нітридів тугоплавких металів IV – VI груп Періодичної системи елементів типу (Ti–Cr)N, (Ti–Mo)N, (Nb–Zr)N, (Ti–Nb–Cr)N, (Ti–Nb–Mo)N. Такі системи, як правило, мають високу термостабільність при температурах понад 600–700 °С, гетерофазність і гнучке сполучення кристалічних структур, які забезпечують підвищену твердість й одночасно високу опірність руйнуванню покриття в умовах знакозмінних напружень, що істотно підвищує його ефективність, особливо при переривчастій обробці та обробці важкооброблюваних матеріалів. Композиційні покриття можна розглядати як один з найбільш перспективних методів підвищення різальних властивостей інструментальних матеріалів.

Аналіз систематизованих вимог до покриття (рис. 6.3) дозволяє відзначити, що одношарові (моношарові, однокомпонентні) покриття не завжди задовольняють всі функціональні вимоги до покриттів для різального інструменту. Найбільшою мірою таким вимогам відповідають **багатшарово-композиційні** покриття із шарами різного функціонального призначення, що добре пояснює тенденцію створення покриттів останнього

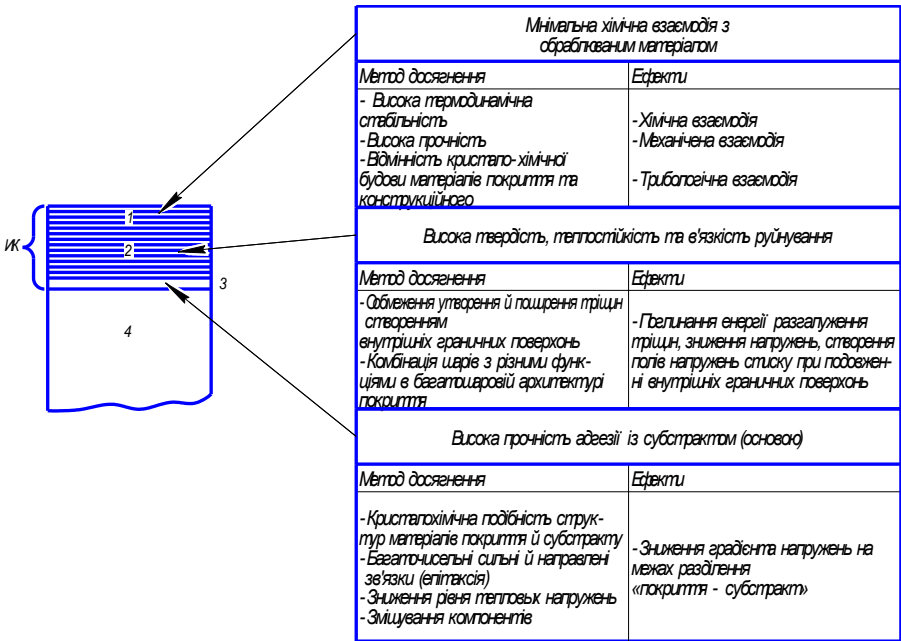


Рисунок 6.3 – Систематизація загальних вимог до покриттів:

1 – зносостійкий шар; 2 – бар'єрний шар; 3 – адгезійний шар;
4 – інструментальний матеріал; ІК – зносостійкий інструментальний комплекс

покоління для різального інструменту на основі багатошарово-композиційної архітектури.

Покриття багатошарово-композиційної архітектури формують відповідно до вищевикладених принципів функціональності кожного із шарів, включаючи верхній і нижній шари, які контактують відповідно з оброблюваним та інструментальним матеріалами. Архітектура подібних покриттів, яку звичайно називають зносостійким **інструментальним комплексом** (ІК), містить кілька шарів, які мають строго функціональне призначення. Оптимізацію структури ІК як правило виконують шляхом варіювання розташуванням шарів, їхніми складом (фізичними властивостями) і параметрами, зокрема, товщиною а також на основі спеціальних досліджень параметрів інструмента з покриттям під час різання.

Таким чином, покриття є унікальним технологічним середовищем, яке здатне підвищувати опірність інструментального матеріалу зношенню при одночасному зниженні факторів зовнішнього впливу, що призводять до такого зношення.

На основі аналізу функцій покриття як проміжного технологічного середовища між інструментальним та оброблюваним матеріалами можна сформулювати функціональні вимоги до основних елементів багатошарового покриття (див. рис. 6.3):

- адгезійний підшар (3) повинен мати максимальну кристалохімічну подібність стосовно матеріалу субстрату (інструментальному матеріалу) і забезпечувати міцну адгезію між матеріалами покриття та субстрату (4);

- проміжний шар (трибоактивний, корозійностійкий, бар'єрний шари і т.ін.) (2) повинен виконувати різні функції зі зниження тертя (антифрикційні функції), підвищення опірності інструментального матеріалу високотемпературної корозії (антикорозійні функції), зменшення переданого тепла від фрикційних джерел, або інтенсивність дифузії між інструментальним і оброблюваним матеріалами (бар'єрні функції);

- зносостійкий шар (1) повинен мати максимальну фізико-хімічну пасивність стосовно оброблюваного матеріалу і підвищувати опірність зношуванню контактних площадок інструмента.

Кожен шар багатошарово-композиційного покриття може мати як моношарову (мікроструктурування), так і багатошарову (наноструктурування) архітектуру. При цьому необхідно мати на увазі, що основні типи багатошарових покриттів, що застосовуються у сучасному машинобудуванні для різальних інструментів, по товщині окремих шарів умовно можна класифікувати на такі основні групи:

- макрометричні з товщиною ($10^{-1,5} - 10^{-3,5}$) мм;
- мікрометричні з товщиною ($10^{-4,8} - 10^{-6,8}$) мм;
- нанометричні з товщиною ($10^{-7,8} - 10^{-9,7}$) мм.

Примітки.

1. Усі типи покриттів, що мають структуру з розмірами зерен менше 100 нм, називають наноструктурованими.

2. Багатошарово-композиційні покриття, які мають наноструктуровану архітектуру, можуть мати до 5000 шарів при загальній товщині покриття, наприклад, яка не перевищує 5 мкм.

6.2. Методи нанесення зносостійких покриттів

Однією з визначальних умов забезпечення високої працездатності покриття є вибір методу його нанесення на робочі поверхні леза інструмента. Досить важливим є можливість відтворення заданих хімічного складу, властивостей і структури покриття за обраним методом процесу.

Найбільшого поширення для нанесення зносостійких покриттів на різальний інструмент набули методи хімічного (газофазного) осадження покриттів (ХОП) або методи CVD (Chemical Vapour Deposition), термодифузійне насичення поверхні (ТДН) і фізичне осадження покриттів у вакуумі (ФОП) або PVD (Physical Vapour Deposition).

6.2.1. Методи хімічного осадження покриттів (CVD)

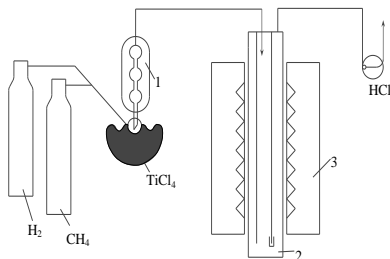
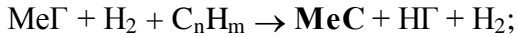


Рисунок 6.4 – Принципова схема установки для нанесення на тверді сплави покриттів високотемпературним методом ХОП (ГТ): 1 – газозмішувач; 2 – реактор; 3 – під

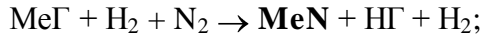
В основі методів CVD лежать реакції в парогазовому середовищі, що оточує інструмент, унаслідок яких утворюються покриття (рис. 6.4). Вихідними продуктами служать газоподібні галогеніди, при взаємодії яких з іншими складовими сумішшю (воднем, аміаком, окисом вуглецю і т.ін.) утворюються покриття. Розкладення галогеніда відбувається за рахунок термічної хімічної реакції при $\Theta=1000\text{--}1100\text{ }^{\circ}\text{C}$. У загальному вигляді рівняння хімічних реакцій процесів ХОП з утворенням карбідів, ніпрідів та оксидів мають такий вигляд:

дів, ніпрідів та оксидів мають такий вигляд:

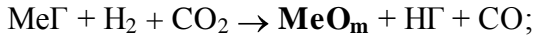
- реакція утворення карбідів



- реакція утворення нітридів



- реакція утворення оксидів



- реакція утворення боридів



де Me – метал; Γ – галоген; m, n – цілі числа.

Реакція осадження покриттів відбувається при високих те-

мпературах ($\Theta \approx 1000$ °C), тому цим методом покриття може наноситися лише на інструменти із твердого сплаву і різальної кераміки.

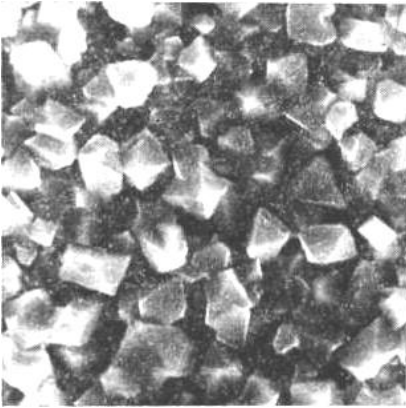


Рисунок 6.5 – Структура покриття Ti на твердому сплаві TT10K8-B

Найбільшого поширення як матеріал покриттів на твердих сплавах набули карбіди, нітриди, карбонітриди титану та оксид алюмінію. Таке покриття має полікристалічну будову (рис. 6.5).

Властивості покриттів сильно залежать від параметрів процесу газофазового осадження.

Найбільш істотну роль відіграє температура на межі розділу конденсату й інструментального матеріалу. Від температури залежать структура покриття, міцність його адгезії із твердим сплавом, причому останнє визначається також можливістю дифузійної взаємодії пари «покриття – твердий сплав». Взаємна дифузія підвищує міцність зчеплення покриття і твердого сплаву й, у свою чергу, залежить від кристалохімічної спорідненості покриття, що осаджується, і твердого сплаву.

Практична реалізація методу CVD знайшла широке застосування в технології ГТ (газофазового титанування), де на змін-



Рисунок 6.6 –
Мікроструктура твердого
сплаву T5K10 з покриттям
TiC ГТ

ні багатогранні пластини (ЗБП) із твердого сплаву наносяться зносостійкі покриття (TiC, TiCN, TiC-TiCN-TiN та ін.).

На рис. 6.6 показана мікроструктура твердого сплаву T5K10 з покриттям TiC ГТ після травлення в реактиві Мураками. Між покриттям і твердосплавною матрицею спостерігається над-дрібнозерниста перехідна зона типу η-фази товщиною 0,5–1,0 мкм, що має формулу CO_3W_3C .

Тришарове покриття TiC-TiCN-TiN ГТ має високу міцність адгезії із твердим сплавом, тому що шар TiC товщиною 1,5–2 мкм, який безпосередньо контактує із твердим сплавом (рис. 6.7), має негативне значення вобарного потенціалу щодо твердосплавної матриці. Крім того, шар Ti збільшує опірність задньої поверхні твердосплавного інструмента адгезійно-утомленому зношуванню.

Супердрібнодисперсний поверхневий шар TiN, товщина якого становить 4–5 мкм більш пластичний і пасивний стосовно конструкційних сталей та чавунів і, таким чином, забезпечує підвищення опірності інструмента фізико-хімічним видам зношування й утворення лунки зношування передньої поверхні. Проміжний (перехідний) шар TiCN товщиною 1,5–2 мкм, маючи необмежену розчинність у TiC і TiN, забезпечує високу міцність їхньої адгезії. Таким чином, покриття TiC-TiCN-TiN збалансовано збільшує опір зношуванню передньої і зад-

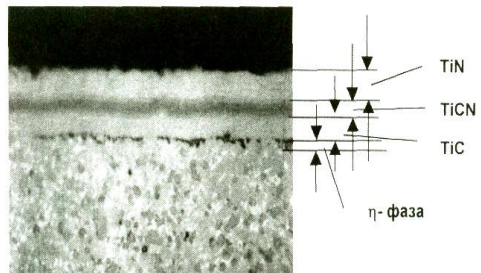


Рисунок 6.7 – Структура багатшарового покриття TiC-TiCN-TiN на трикарбідному твердому сплаві

ньої поверхонь твердосплавного інструмента. У зоні розділу «покриття – твердий сплав» також виявлений шар типу η - фази товщиною 0,5–1,0 мкм.

Галузі застосування твердосплавних пластин зі зносостійкими покриттями, нанесеними методом CVD, наведені в табл. 6.1

Таблиця 6.1 – Марки і галузі застосування твердосплавних пластин з покриттям CVD

Твердий сплав	Покриття	Галузь застосування
T5K10	TiC-TiCN-TiN	P20-P30
TT7K12	TiC-TiCN-TiN	P15-P40
BK6	TiC-TiCN-TiN	K10-K30
Група ТТК	TiC-Al ₂ O ₃	P01-P25, M05-M20, K01-K30

6.2.2. Методи термодифузійного насичення (ТДН)

Під час виробництва твердосплавних пластин із покриттям використовують також методи термодифузійного насичення (ТДН), до яких належить метод ДТ (дифузійне титанування).

Метод ДТ базується на термообробці твердосплавних пластин у спеціальній порошковій засипці з матеріалів, які містять титан, при температурах, достатніх для реалізації дифузійних реакцій у середовищі водню. Метод не вимагає спеціального обладнання, тому що здійснюється в стандартних водневих електропечах безперервної дії. При цьому методі виключається необхідність точного дозування і очищення газу - відновника (водню). Продуктивність процесу ДТ дуже висока і становить до 500 пластин за годину. Швидкість росту покриття – до 10–15 мкм/год. Разом з тим методи ТДН, що ґрунтуються на використанні порошко-

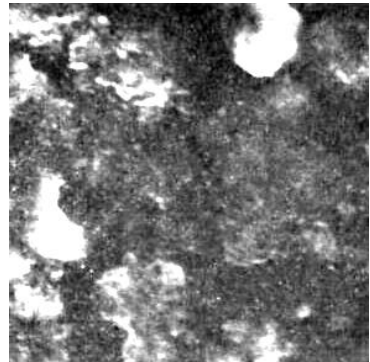


Рисунок 6.8 – Структура поверхні покриття TiC ДТ на твердому сплаві BK6

вої технології, мають помігні недоліки, пов'язані з налипанням порошкової суміші на робочі поверхні інструменту, з необхідністю герметизації контейнера або використання захисних газів, одноразовим використанням суміші. У наш час промисловістю випускаються пластини ВК6–TiC ДТ, які рекомендують для обробки чавуну в області застосування K10–K20. Покриття TiC ДТ має відносно крупнозернисту будову з високою неоднорідністю кристалів за обсягом покриття і геометричним пере-кручуванням зерен (рис. 6.8). Крім того, вона має нестехіометричний склад і складається в основному зі зрослих зерен TiC.

6.2.3. Методи фізичного осадження покриттів (PVD)

Методи PVD базуються на фізичному випарі або розпиленні речовини у вакуумний простір камери з подальшою подачею реакційного газу (N_2 , O_2 , CN_4 та ін.). Унаслідок плазмохімічної реакції іонізованого потоку металевої плазми і реакційного газу на поверхні інструмента конденсується покриття.

Серед методів PVD на сьогодні час найбільше поширення одержав метод конденсації речовини із плазмової фази у вакуумі з іонним бомбардуванням (метод КІБ), що ґрунтується на генерації речовини катодною плямою вакуумної дуги сильнострумного низьковольтного розряду, який розвивається в парах матеріалу електрода й реалізується на основі технології КІБ, створеної Фізико-технічним інститутом АН України, у спеціальних вакуумно-плазмових обладнаннях типу «Пуск», «Булат», «ННВ» та ін.

Подача у вакуумний простір реагуючих газів (азоту, метану та ін.) в умовах іонного бомбардування приводить до конденсації покриття на поверхні різального інструменту 2 (рис. 6.9) завдяки перебігу плазмохімічних реакцій. Усі процеси випару, утворення сполук, іонного бомбардування та конденсації покриття відбуваються у вакуумній камері 1, металевий корпус якої служить анодом. Катод 3 виготовляють із тугоплавкого матеріалу, що підлягає випару. Під дією первинних електронів та іонів, що генеруються у дуговий проміжок катодом, відбувається іонізація речовини, що випарувалася, і реагуючих газів, що

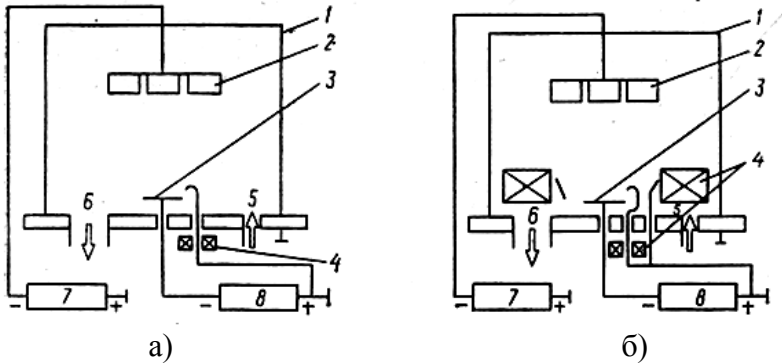


Рисунок 6.9 – Принципова схема вакуумно-плазмової установки (а) і установки із плазмооптичною системою (б): 1 – корпус вакуум-камери; 2 – різальні інструменти; 3 – катод-випарник металу; 4 – електромагніти; 5 – подача реакційного газу; 6 – до вакуумного насоса; 7 – джерело живлення для подачі негативного потенціалу до різального інструменту; 8 – джерело живлення дуги

приводить до утворення високошвидкісних потоків, які складаються як із заряджених, так і з нейтральних частинок матеріалу катода й реагуючих газів.

Особливістю методу КІБ є можливість прискорення іонів речовини шляхом створення негативного заряду (відносно корпусу камери) на різальному інструменті.

Через високу густину енергії в катодній плямі можливий випар будь-яких електропровідних матеріалів, у тому числі тугоплавких матеріалів IV–VI груп Періодичної системи елементів.

Характерною рисою методу КІБ є висока хімічна активність випаровуваного матеріалу, що обумовлена утворенням конденсату при електродуговому випаровуванні матеріалу катода, за рахунок якого конденсат перетворюється у високоіонізований потік низькотемпературної плазми. Ступінь іонізації випаровуваного металу і газу залежить від кристалохімічної природи випаровуваного металу, тиску газу, напруженості магнітного поля (для установок, обладнаних плазмооптичними пристроями (рис. 6.9 б)).

Примітка. Плазмооптичні пристрої, які називаються холлівськими ерозійно-плазмовими прискорювачами, служать для досягнення більшої щільності іонного потоку і дозволяють регулювати як фізичні характеристики плазмового потоку, так і його швидкість.

Конденсат у процесі осадження піддається інтенсивному бомбардуванню іонами випаровуваної речовини, тому відбувається часткове його розпилення, а також підвищення температури в зоні формування покриття. У результаті різко зростає рухливість атомів на поверхні інструмента, відбувається активація хімічних реакцій між конденсатом і компонентами реакційної газової суміші.

У такий спосіб процес КІБ можна передати у вигляді двох процесів, що проходять послідовно: іонного бомбардування і конденсації покриття.

Широкі можливості варіювання температурою від 200 до 1000 °С у зонах нанесення покриттів дозволяють використовувати методи PVD як універсальні для нанесення покриттів на різальний інструмент як зі швидкорізальної сталі, так і твердого сплаву (рис. 6.10).

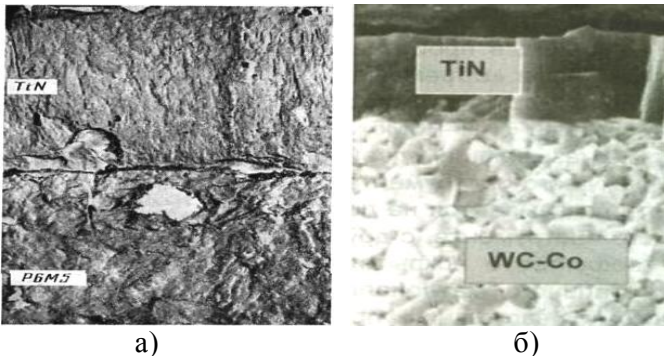


Рисунок 6.10 – Мікроструктура покриття TiN (КІБ), отриманого з репліки (просвічувальний електронний мікроскоп) торцевого перетину різця зі швидкорізальної сталі Р6М5 (а) і на твердому сплаві ВК6 (б) (растровий електронний мікроскоп)

Методи PVD універсальні також і з погляду можливості нанесення гама одношарових, багатшарових і композиційних покриттів.

Необхідно звернути увагу на те, що при нанесенні покриття на швидкорізальний інструмент методами PVD, зокрема за технологією КІБ, у зв'язку як із відносно високими температурами в зонах нанесення покриттів, так і сильного розходження властивостей матеріалів покриття і лез інструменту необхідне введення спеціального проміжного підшару між покриттям та інструментальним матеріалом, що має назву термостабілізуювального. Наявність такого підшару дозволяє практично повністю виключити характерне (як для швидкорізальних, так і твердо-сплавних інструментів) унаслідок діючих у процесі різання на передню поверхню нормальних напружень деформування різального клину (леза), що істотно підвищує ефективність покриття.

Примітка. Відомо, що деформація, яка необхідна для розриву, наприклад, шару з нітриду титану, становить усього 1%, тобто висока крихкість покриттів робить їх досить «вразливими» навіть при незначній деформації основи.

Формування зазначеного підшару можна здійснити шляхом стимульованої хіміко-термічної обробки (іонного азотування в несамоствійному вакуумно-дуговому розряді) інструментального матеріалу (матеріалу основи (субстрату) зі швидкорізальної сталі) при температурах 450–480 °С, включеної в технологію комбінованої іонно-плазмової обробки (КІПО). Таким чином, ІК для інструменту зі швидкорізальної сталі повинен складатися з термостабілізуювального, адгезійного підшарів і саме зносостійкого покриття, зокрема багатшарово-композиційної архітектури. У наш час розроблені технології одержання таких ІК унаслідок комбінованої обробки (азотування і подальше нанесення покриття) в одній установці типу «Пуск», «Булат», «ННВ» та ін.

Найбільше застосування як зносостійкі покриття КІБ для різальних інструментів одержали титановмісні покриття, що

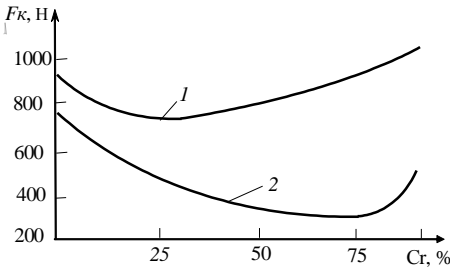


Рисунок 6.11 – Вплив складу композиційного покриття на основі (Ti–Cr)N на кінетичну силу тертя при постійній температурі 500° і нормальному тиску 1500 Н

мають такі властивості, які багато в чому задовольняють ті вимоги, що ставляться до покриттів для різального інструменту.

Процес КІБ дозволяє одержувати також композиційні покриття шляхом створення композиційних конденсатів за схемами як одночасного випару декількох різнойменних катодів, так і випару багатоконденсатних оплавлених катодів, що дозволяє ефективно керувати властивостями покриттів, зокрема характеристиками стружкоутворення і контактних процесів, залежно від необхідних умов обробки.

Наприклад, мінімальне значення кінетичної сили тертя F_k забезпечують зразки із твердого сплаву ВК6 з покриттям (Ti–Cr)N, які містять 20–25% (по масі) нітридів хрому, під час тертя по сплаву ХН77ТЮР (рис. 6.11, крива 1) і 70–75% (за масою) нітридів хрому – під час тертя по сплаву ВТ20 (рис. 6.11, крива 2).

Застосування методів PVD для одержання покриттів на різальному інструменті істотно розширює його технологічні можливості за рахунок більш ефективного, ніж для методів CVD, керування процесами одержання покриттів і їхніми властивостями.

6.3. Рекомендації щодо вибору зносостійких покриттів

Для виконання вимог, наведених у розд. 6.2.1, під час розроблення інструментального матеріалу з покриттям необхідно вирішувати такі завдання:

- вибір складу покриття повинен здійснюватися, виходячи з умови максимального забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик інструмента і відповідно ефективності покриття (див. табл. 6.2) залежно від умов обробки, наприклад,

зниження ймовірності схоплювання (адгезії) між оброблюваним матеріалом і покриттям;

- при виборі складу покриття необхідно забезпечувати достатню велику міцність адгезії між матеріалами покриття та інструмента;

- необхідна оптимізація параметрів покриття залежно від умов процесу різання, тому що задовільна працездатність інструменту з покриттям може бути забезпечена лише при оптимальних значеннях основних параметрів покриття (товщина, співвідношення товщини шарів, мікротвердість, фазовий склад, структура та т.ін.).

Найбільш ефективно властивостями композиційного інструментального матеріалу з покриттям можна керувати за рахунок варіювання хімічним складом покриття, його структурою і типом зв'язку з інструментальним матеріалом. У свою чергу, зазначені параметри сильно залежать від методу нанесення покриття та технологічних умов формування вихідних властивостей інструментального матеріалу. Зокрема, сильний вплив на структуру і дефектність покриття, тип зв'язку з інструментальною матрицею можуть зробити субструктура, забруднення і дефекти приповерхневих шарів інструментального матеріалу, що вимагає ретельної підготовки інструменту до процедури безпосереднього нанесення на нього зносостійкого покриття. Зокрема, перед нанесенням покриття методом КІБ рекомендується на попередньому етапі робити хімічно активовану мийку інструменту із застосуванням ультразвуку і подальше тонке очищення розчинником, наприклад, спиртом, та сушіння. Після установки і закріплення інструменту в спеціальних пристроях і розміщення їх у вакуумній камері необхідно при вакуумі порядку $p = 0,01$ Па робочі поверхні піддавати тонкому очищенню шляхом бомбардування іонами газу (Ar) і термоактивації електронами, що генеруються із тліючого газового (Ar) розряду.

До вибору складу і властивостей матеріалу покриття. Однією з найважливіших завдань під час проектування інструменту з покриттям є вибір складу і властивостей матеріалу покриття залежно від умов обробки і насамперед властивостей об-

роблюваного матеріалу з урахуванням їх змін при деформації і руйнуванні. Наприклад, для варіанта багатошарового-композиційного покриття надзвичайно важливим є вибір складу і властивостей верхнього (зносоустійкого) шару покриття 1 (див. рис. 6.3).

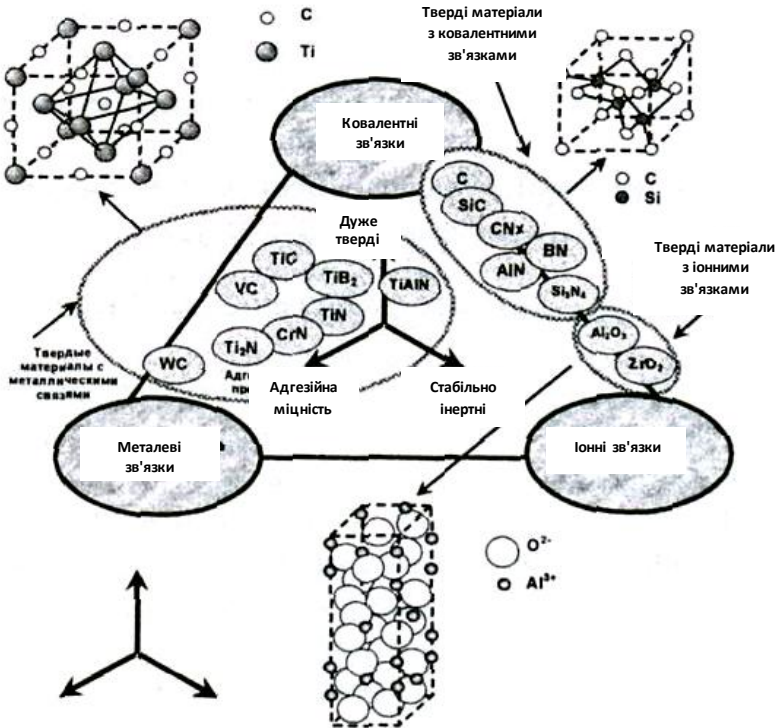


Рисунок 6.12 – Класифікація з'єднань, найбільш придатних для використання при проектуванні покриттів для різального інструменту зв'язок

Наприклад, якщо превалюючим видом зношення інструменту є адгезійно-утомний механізм, то при виборі матеріалу верхнього шару покриття 1 перевагу варто віддавати найбільш твердим і тугоплавким сполукам матеріалів, як із переважними металевими, так і зі змішаними та ковалентними або іонними зв'язками (TiC, TiB₂, TiAlN, SiC, Al₂O₃ та ін.).

Примітка. При виборі складу матеріалів шарів покриття можна керуватися даними рис. 2.11

Як бачимо із представлених на рис. 2.11 даних, найбільш придатними як проміжні перехідні адгезійні підшарів (шарів 2) є сполуки з металевими зв'язками (карбіди та нітриди перехідних тугоплавких металів), наприклад, сполуки типу TiN, CrN, TiCrN та ін.

Найбільш придатними для використання як адгезійного шару 3 є метали (Ti, V, Cr та ін.), металеві композити (Zr-Cr, Ti-Cr та ін.) і сполуки (ZrN, TiCrN, TiN тощо).

На рис.6.13 подані приклади ИК для обробки конструкційних сталей інструментом з різних інструментальних матеріалів та умов експлуатації, які мають багат шарово-композиційну архітектуру, і, в тому числі, – маючих нанорозмірні шари. Для поліпшення адгезії між покриттям та основою (субстратом) використані тонкі шари металів (Ti і Cr). Більш товсті проміжні шари різного функціонального призначення для наведених прикладів формуються на основі систем з TiCrN, TiN, CrN та TiAlN і служать не лише для забезпечення необхідних фізико-хімічних властивостей покриття та необхідної міцності зв'язків між окремими шарами,

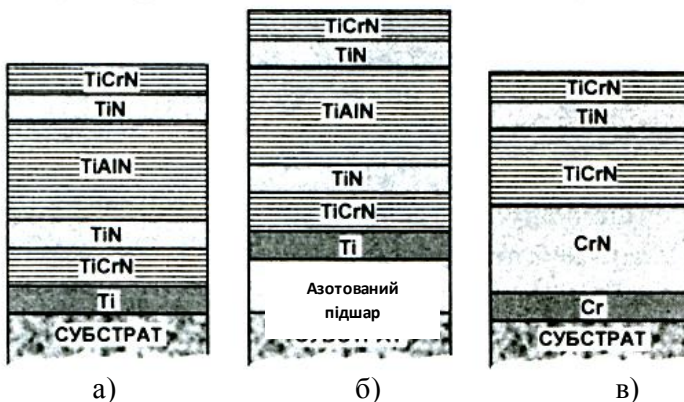


Рисунок 6.13 – Зносостійкі комплекси для обробки конструкційних сталей на інструментах із твердого сплаву (а) і швидкорізальної сталі (б) і для штампового інструмента (в)

а й для одержання покриттів із загальною товщиною, що відповідає умовам застосування покриття в цілому, наприклад по його товщині.

6.4. Ефективність застосування зносостійких покриттів

Досвід експлуатації інструментів з покриттям дозволяє визначати й умови, за яких досягається найбільше підвищення їхньої працездатності. Ефективність покриттів визначальною мірою і залежить не лише від їхніх властивостей (твердості, термостабільності, хімічної інертності до оброблюваного матеріалу, стійкості до утворення лунки зношення, розміру зерна та ін. (табл. 6.2), які змінюють характер перебігу контактних процесів під час різання, а й можливої зміни властивостей матриці (основи) у процесі нанесення покриття, що супроводжується зміною в першу чергу його міцнісних характеристик.

Таблиця 6.2 – Ефективність покриттів залежно від їхніх властивостей

Властивості покриттів	Покриття за спаданням ефективності
Термостабільність, хімічна інертність до конструкційної сталі, стійкість до утворення лунки зношення	Al_2O_3 ; TiN; TiC
Твердість	TiC; TiN; Al_2O_3
Стійкість до зношення при обробці конструкційної сталі	Al_2O_3 ; TiC; TiN
Коефіцієнт тертя щодо конструкційних сталей	TiN; Al_2O_3 ; TiC
Мінімально допустимий розмір зерна	TiN; TiC; Al_2O_3

Для високотемпературних методів нанесення покриттів найбільш характерними процесами, що приводять до сильних змін властивостей твердосплавної матриці, є дифузійна взаємодія конденсату і твердого сплаву, а також тепловий вплив на його структуру за об'ємом.

У результаті при осадженні покриття на твердий сплав змінюються не лише його поверхневі властивості (мікротвердість, стійкість проти окислювання, опірність мікроруйнуванню тощо), а й властивості, які проявляються в об'ємі всього матері-

алу (в'язкість руйнування, міцність, мікроповзучість і т.ін.). Процес фізичного осадження покриттів проходить при значно менших температурах, тому він впливає лише на поверхневі структури і мікрогеометрію інструментального матеріалу. Слабка дифузійна взаємодія покриттів, отриманих методом ФОП, і інструментальної матриці є головною причиною меншої міцності їхнього зчеплення порівняно з міцністю зчеплення матеріалу і покриття, отриманого методами хімічного осадження покриттів (ХОП). Ця обставина визначає специфічну галузь використання інструментів з покриттями, що одержані цими методами.

Сприятлива зміна властивостей інструментальної матриці після нанесення покриття приводить до істотного поліпшення експлуатаційних характеристик інструменту і до збільшення його працездатності. Наприклад, при більшій мікротвердості й теплостійкості, збільшенні стійкості проти окислювання спостерігається зростання зносостійкості контактних площадок інструменту. Стабілізація міцнісних властивостей інструментального матеріалу, зростання опірності контактних площадок макро- і мікроруйнуванню в умовах дії відносно високих напружень і температур, особливо якщо вони мають змінний характер, приводять до поліпшення різальних властивостей інструменту і збільшення його експлуатаційної надійності.

Таким чином, існує взаємозв'язок між зміною основних властивостей інструментального матеріалу при нанесенні покриття, характером перебігу контактних процесів під час різання і основними експлуатаційними характеристиками різального інструменту (рис. 6.14).

Широке промислове використання різального інструменту зі зносостійким покриттям дозволяє вирішувати такі завдання:

1) підвищення стійкості й надійності металорізального інструменту;

2) збільшення продуктивності процесів обробки деталей різанням;

3) скорочення питомих витрат дорогих інструментальних матеріалів і гостродефіцитних елементів (вольфрам, молібден, тантал, кобальт) для їхнього виготовлення;

4) розширення ефективної галузі використання твердих сплавів і скорочення номенклатури застосовуваних сплавів стандартних марок;

5) збільшення якості поверхневого шару і точності розмірів оброблених деталей;

6) поліпшення оброблюваності складнолегованих сталей і сплавів (важкооброблюваних матеріалів);

7) підвищення різальної здатності інструментів, виготовлених із низьколегованих матеріалів.

При обробці матеріалів зносостійкі покриття дозволяють на 20 – 30% збільшити швидкість різання, а отже, і продуктивність при одночасному підвищенні стійкості інструмента.

Найбільший ефект застосування інструментів досягається під час різання з малими ($a < 0,05$ мм) і середніми ($a = 0,1 - 0,25$ мм) значеннями товщини зрізу. У першому випадку – за рахунок підвищення зносостійкості задньої поверхні інструмента, а в другому випадку – за рахунок гальмування росту лунки зносу на передній поверхні.

При товщинах зрізу $a = 0,05 - 0,1$ мм, а також $a > 0,3$ мм покриття інтенсивно руйнується: у першому випадку через високі навантаження на покриття з боку задньої поверхні, а в другому – з боку передньої поверхні. Ці рекомендації необхідно враховувати під час призначення режимів різання.

Інструменти зі швидкорізальної сталі з покриттями показують значне підвищення стійкості при різних видах обробки вуглецевих, конструкційних і низьколегованих сталей, а також сірих чавунів низької і середньої твердості. Разом з тим при обробці титанових і жароміцних сплавів на основі нікелю, високолегованих і високоміцних сплавів ефективність від застосування швидкорізальних інструментів з покриттям істотно нижча, а в ряді випадків стійкість може навіть знижуватися.



Рисунок 6.14 – Взаємозв'язок між властивостями інструментального матеріалу після нанесення покриття, характеристиками процесу різання та експлуатаційними характеристиками інструменту

Твердосплавні пластини з покриттями з карбиду і нітриду титану ефективні для більшості найпоширеніших видів обробки різанням конструкційних сталей і сірих чавунів, особливо для точіння, а також чистового й напівчистового фрезерування з по-мірними подачами.

При важких умовах різання, коли спостерігаються викришування та відколи і на сплавах без покриттів, ефективність пластин зі зносостійкими покриттями знижується. Результати випробування пластин з різними покриттями при обробці важкооброблюваних матеріалів різних груп оброблюваності показують, що чим важче обробляється матеріал різанням (чим вища група оброблюваності), тим менше проявляється ефект покриття.

Необхідно відзначити, що, незважаючи на більш високу вартість інструментів з покриттями, витрати споживача на обробку одиниці продукції порівняно з аналогічними витратами при застосуванні непокритих інструментів нижчі завдяки підвищенню або стійкості інструмента, або швидкості різання та продуктивності обробки.

У промислово розвинених країнах випуск ЗБП зі зносостійкими покриттями становить 60–90% від загального випуску твердосплавних пластин і близько 70% усіх типів інструментів зі швидкорізальної сталі.

Ефективність застосування зносостійкого покриття значною мірою залежить від його товщини, вибір оптимального значення якої багато в чому визначається не лише складом покриття і його міцністю (крихкістю), але також і умовами перебігу процесу різання та фізико-хіміко-механічними властивостями власне самої інструментальної матриці. Наприклад, ефективність покриттів зростає зі збільшенням твердості матриці та її здатностей опиратися термопластичній деформації.

Значною мірою на товщину покриття впливають умови перебігу процесу різання. З одного боку, «товсте» покриття помітно підвищує зносостійкість інструментальної матриці за рахунок зростання твердості, температурної стійкості проти окислення і корозії, зростання пасивності інструментального матеріалу проти твердофазних і рідкофазних дифузійних реакцій з оброблюваним матеріалом, зниження граничної адгезії. З іншого боку, зростання товщини покриття призводить до помітного збільшення кількості дефектів в об'ємі покриття, причому таких небезпечних дефектів, як макро- і мікропори, мікротріщини, не-

стехіометрія (ступінь сталості) складу, неоднорідність зерна та зростання його розміру по перетину покриття залежно від віддалення від матриці тощо. Таким чином, зі збільшенням товщини покриття різко зростає ймовірність появи того або іншого небезпечного дефекту, що може призвести до динамічного руйнування покриття. Звідси й зв'язок оптимальної товщини покриття з умовами перебігу процесу різання.

Для квазістаціонарних процесів різання з утворенням зливних стружок (тобто процесів, що проходить при високих швидкостях різання і малих товщинах зрізу під час обробки відносно пластичних матеріалів) товщина покриттів може бути гранично збільшена. Для нестационарного і переривчастого різання (тобто при формуванні дискретних типів стружок, виражених адгезійно-втомних процесах, різких коливаннях за часом швидкості, перетину зрізу, напруженнями і температурами) товщину покриттів необхідно знижувати через їхню схильність до крихкого руйнування. Наприклад, оптимальна товщина покриття TiC ГТ (рис. 6.15) знижується до 5,0–7,0 мкм при точінні чавуну (крива 3) і збільшується до 6,0–10 мкм при точінні сталі (криві 1 і 4). При цьому покриття TiC більш ефективне на сплаві ВК6 (криві 1 і 3), ніж на сплаві Т5К10 (крива 4): при оптимальній товщині 8 мкм для пластин із ВК6 їхня стійкість в 1,5–рази вища, ніж для пластин з Т5К10 з оптимальною товщиною покриття 6 мкм.

Для операцій переривчастого різання (фрезерування, зубодовбання, стругання та ін.) екстремальний характер залежності стійкості від товщини покриття проявляється в значно більшому ступені, ніж для безперервного різання, причому оптимальне значення товщини покриття зрушується в менший бік (рис. 6.15 криві 2, 5 і 6). Так, для покриття TiC ГТ це значення перебуває в межах 2,5–3,0 мкм (крива 5), для покриття TiN КІВ оптимальна товщина покриття коливається в межах 4,0–6,0 мкм (криві 2 і 6).

Таким чином, товщина покриття є параметром, який підлягає оптимізації в кожному конкретному випадку. У загальному випадку оптимальні товщини покриттів для твердосплавних інструментів широкої галузі використання наведені в табл. 6.3.

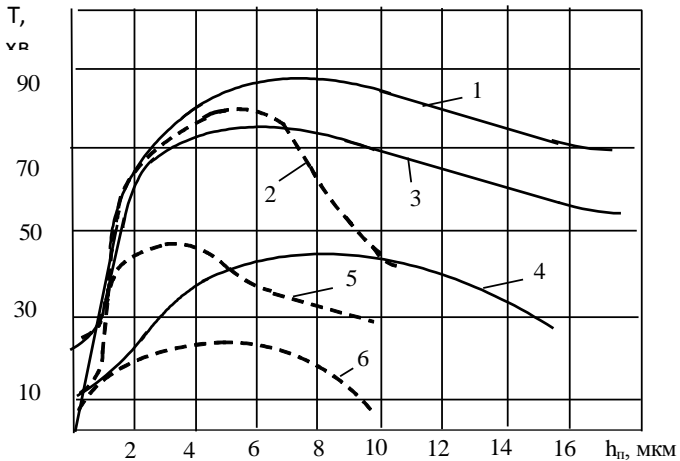


Рисунок 6.15 – Вплив товщини h_p покриття на середню стійкість $T_{сер}$ твердосплавних інструментів під час точіння (1, 3, 4) сталі 45 (1, 4) і чавуну СЧ32 (3) і фрезеруванні сталі 40Х (2, 5, 6) пластинами:

- 1 – BK6 – TiC ГТ ($v=150$ м/хв; $S=0,15$ мм/об.; $t=1$ мм);
 2 – TT10K8Б – TiN КІБ ($v=170$ м/хв; $S_z=0,32$ мм/об.; $t=2$ мм; $z=1$; $B=140$ мм);
 3 – BK6 – TiC ГТ ($v=130$ м/хв; $S=0,15$ мм/об.; $t=2$ мм);
 4 – T5K10 – TiC ГТ ($v=170$ м/хв; $S_z=0,32$ мм/об.; $t=2$ мм; $z=1$; $B=140$ мм);
 5 – TT10K8Б – TiC ГТ ($v=170$ м/хв; $S_z=0,32$ мм/об.; $t=2$ мм; $z=1$; $B=140$ мм);
 6 – BK6 – TiN КІБ ($v=170$ м/хв; $S_z=0,32$ мм/об.; $t=2$ мм; $z=1$; $B=140$ мм)

Таблиця 6.3 – Оптимальні товщини покриттів для твердосплавних пластин

Покриття	h_p , мкм для твердосплавних пластин					
	BK6	T5K10	TT10K8 Б	BK6	TT10K8 Б	TT7K12
	Точіння			Фрезерування		
	Чавун	Сталь	Сталь			
TiC ГТ; TiCN ГТ; TiN ГТ; TiC-TiCN-TiN ГТ	4–6	6–8	3–6			
TiC ДТ	8–10	14–18	6–10			
TiN КІБ; ZrN КІБ; (Ti- Cr)N КІБ; MoN КІБ; CrN КІБ	6–8	6–8	3–5			

Максимальна ефективність різального інструменту зі зносостійкими покриттями, які мають оптимальну величину, досягається на швидкостях різання, що перевищують на 20–60% швидкості різання для звичайного інструменту. При цьому доцільно використовувати низькі та середні значення подач. Можливість використання більш високих швидкостей різання для інструменту з покриттям пов'язана зі зниженням рівня термомеханічного навантаження контактних площадок леза (зменшення температур, тертя, контактних напружень, фізико-хімічних процесів).

Ефективність різального інструменту з покриттям значною мірою визначається оптимальністю його складу для заданих оброблюваного матеріалу і вимог до обробки.

У табл. 6.4 поданий рекомендований склад покриттів для широкого діапазону умов обробки і гама оброблюваних матеріалів.

Таблиця 6.4 – Покриття, рекомендовані для різального інструменту

Оброблюваний матеріал	Операція	Інструментальний матеріал основи	Рекомендований склад покриттів	V, м/хв	Кст
1	2	3	4	5	6
Конструкційні сталі (45, 40X, 38XC, 35XGA, ШХ15 та ін.)	Точіння	T5K10, TT10K8B, MC221	TiC-TiCN-TiN, TiC- TiN, (Ti-Cr)N, TiC-Al ₂ O ₃	200–280 (150–200)	3–5
		P6M5	TiN, (Ti-Al)N, (Ti-Cr)N	60–100 (40–70)	2–4
	Фрезерування	TT7K12, MC146	TiC-TiCN-TiN, (Ti-Cr)N, (Ti-Mo)N	140–200 (100–150)	2,5–3
		P6M5	TiN (Ti-Al)N	50–80 (20–60)	2–3
Чавуни	Точіння	BK6, BK10-XOM, MC321	TiC-TiCN-TiN, (Ti-Cr)N, TiC-Al ₂ O ₃ -TiN	160–250 (120–180)	3–5
	Фрезерування	P6M5	TiCN, (Ti-Al)N	40–80 (20–60)	2–2,5

Продовження табл. 6.4

1	2	3	4	5	6
Аустенітні сталі (X18H10T, X18H12T, X23H18, X15H5 та ін.)	Гочіння, фрезерування	BK6-M, BK6 BK10-XOM P6M5K5, P12Ф4K5	TiC-TiCN-TiN (Ti-Mo)N (Ti-Cr)N, TiCN, (Ti-Al)N (Hf-Zr-Cr)N	150–180 (120–150) 15–30 (10–20)	2–2,8 1,5–2,2
Жароміцні деформівні сплави (XH608, XH77TЮ, XH35BTЮ та ін.)	Гочіння	BK6, BK8 BK10-XOM	TiCN, (Ti-Al)N, (Ti-Cr)N, (Ti-Mo)N	25–60 (20–45)	1,8– 2,5
Сплави на титановій основі	Гочіння, фрезерування	BK6, BK8 BK10-XOM	(Ni-Zr)N (Ti-Cr)N (Mo-Zr)N	50–100 (40–60)	1,8– 2,5

Примітка. 1 У колонці «5» без дужок зазначені швидкості різання інструменту з покриттям, у дужках – без покриття. 2. Кст – коефіцієнт підвищення стійкості: визначається як відношення середнього значення періоду стійкості інструменту з покриттям до відповідного значення стійкості інструменту без покриття

Відносно незадовільні результати використання інструменту з покриттям для операцій важкого і переривчастого різання пояснюються відносно поганою опірністю порівняно крихких покриттів руйнуванню в умовах циклічних навантажень, схильності різальної частини інструмента до пружних прогинів і пластичних деформацій, що супроводжується «розтріскуванням» покриття або його «відшаруванням» від матриці.

Таким чином, застосування інструментів зі зносостійкими покриттями дозволяє вирішувати досить широку гаму технологічних завдань щодо підвищення ефективності процесу обробки: підвищення продуктивності праці, зниження трудомісткості виготовлення виробів, а отже, і зниження їхньої собівартості; підвищення надійності різальних інструментів; підвищення точності та якості оброблених поверхонь і т.ін.

Питання для самоперевірки

1. Охарактеризуйте перспективи поліпшення різальних властивостей інструментальних матеріалів шляхом нанесення на їхні робочі поверхні зносостійких покриттів.
2. Охарактеризуйте вимоги, що ставлять до зносостійких покриттів для різального інструменту.
3. Охарактеризуйте схему багатошарового покриття для різального інструменту.
4. Якими методами наносять зносостійкі покриття на різальний інструмент?
5. Охарактеризуйте методи хімічного осадження покриттів на поверхні різального інструменту.
6. У чому суть методу термодифузійного насичення?
7. Охарактеризуйте методи фізичного осадження покриттів.
8. Які структури і фазовий склад основних типів інструментальних покриттів?
9. Поясніть, чому ІК для інструмента зі швидкорізальної сталі, сформований методами PVD, повинен містити термостабілізуючий підшар?
10. Назвіть галузі ефективного та малоефективного застосування покриттів на різальному інструменті.
11. Охарактеризуйте завдання, які дозволяє вирішувати використання різального інструменту зі зносостійким покриттям.
12. Охарактеризуйте взаємозв'язок між властивостями інструментального матеріалу після нанесення покриття, характеристиками процесу різання та експлуатаційними характеристиками інструменту.
13. Опишіть вплив покриттів на трансформацію зони деформації під час різання та на основні характеристики процесу стружкоутворення.
14. Охарактеризуйте взаємозв'язок між товщиною зносостійкого покриття та ефективністю його застосування.
15. Як обирається оптимальна товщина покриття?

Слова і скорочення в розділі 6

Гетерофазний (-ість) (від грецьк. heterogen – неоднорідний) – такий, що складається з двох або декількох різних фаз.

Ізобарний (потенціал) (від грецьк. isos – рівний, однаковий, baros – вага) – процес, що проходить при сталому тиску в системі.

Квазістаціонарний, квазістатичний процес (від лат. quasi – нібито, начебто – частина складних слів зі значенням «уявний», «несправжній») – відносно повільний мінливий процес, так що процес залишається близьким до стану рівноваги.

КІБ – конденсація (речовини) іонним бомбардуванням.

КІПО – комбінована іонно-плазмова обробка.

Метод ТДН – термодифузійне насичення поверхні.

Метод ФОП – фізичне осадження покриттів у вакуумі або англійською мовою PVD – Physical Vapour Deposition.

Метод ХОП – хімічне (газофазне) осадження покриття, або англійською мовою CVD – Chemical Vapour Deposition.

Рекристалізація – процес росту кристалічних зерен полікристала за рахунок інших. Протікає особливо інтенсивно в пластично деформованих матеріалах.

Стехіометрія – (від грецьк. stoicheion – елемент і ... метрія) – співвідношення між масами речовин, які вступають у хімічну реакцію.

Нестехіометрія – відхилення кількісних співвідношень між компонентами хімічних сполук від співвідношень, обумовлених правилами стехіометрії. Найбільш характерна для молекулярних кристалічних сполук – оксидів, халькогенідів та ін. бінарних з'єднань метал - неметал, потрійних сполук (наприклад, оксидних бронз).

Трибоактивний (від грецьк. tribos – тертя) – активне зношування під час тертя.

7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА МАТЕРІАЛИ АБРАЗИВНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

7.1. Абразивне оброблення

Абразивне оброблення використовується практично в усіх галузях промисловості для забезпечення високої якості та точності оброблених поверхонь. Розширення застосування високоміцних, жаростійких, нержавіючих, титанових сталей і сплавів, композиційних конструкційних матеріалів із вимогою одержання високого квалітета, малої шорсткості та взаємозамінності зумовлюють усе більше використання різноманітних абразивних матеріалів. Застосування нових способів виготовлення заготовок (порошкова металургія, виливання під тиском, виливання за моделями, що виплавляються, формоутворення вибухом та ін.) дає змогу наблизити їхні габаритні розміри до розмірів готових деталей і в подальшому використовувати тільки абразивне оброблення.

Абразивне оброблення в ряді випадків застосовується як єдино можливий спосіб оброблення – тонке шліфування та полірування листової сталі (в тому числі нержавіючої), шліфування і розрізування тонкостінних труб з нержавіючої сталі, зачищення зварних швів, абразивне пневмо- та гідрооброблення деталей вільним абразивом, оброблення криволінійних поверхонь типу лопаток газових турбін і компресорів та ін.

При абразивному обробленні твердих сплавів і різноманітних стійких проти спрацювання матеріалів, скла, склопластиків, пластмас та інших матеріалів застосовуються інструменти на основі алмазу і надтвердих матеріалів.

Використання абразивних алмазних і надтвердих матеріалів дає змогу механізувати й автоматизувати процеси оброблення, значно підвищити продуктивність праці, полегшити працю робітників, підвищити загальну культуру виробництва.

Абразивне оброблення можна умовно розбити на дві групи: 1) оброблення зв'язаним абразивом; 2) оброблення вільним абразивом. При обробленні зв'язаним абразивом абразивні зерна (леза інструменту) за допомогою додаткового матеріалу (зв'язки) достатньо міцно між собою «зв'язані» (закріплені) у



Рисунок 7.1 –
Мікрофотографія
шліфа шліфувального
круга на рівні 50 мкм:
1 – абразивне зерно;
2 – зв'язка; 3 – пори

єдиному інструменті (круг, брусок, сегмент тощо), який має відповідну форму, розміри та геометрію, тобто абразивні зерна у цьому інструменті не можуть відносно одне одного переміщатися, повертатися тощо. Винятково важливе значення мають структура й геометрія різальної поверхні абразивних інструментів зі зв'язаним абразивом, тому що вони визначають їхню ефективність та експлуатаційні властивості. Структура такого абразивного інструменту складається із абразивних зерен, зв'язки з наповнювачем та пор (рис. 7.1), а рельєф різальної поверхні (рис. 7.2) може характеризуватися різними величинами: числами утворених самими абразивними зернами різальних елементів (або кромки), що припадають на одиницю площі поверхні інструменту (lx/l); середньомірною відстанню між різальними кромками; різновисотністю різальних кромки, що характеризує їхнє розташування по висоті рельєфу; величиною контактної площі рельєфу різальної поверхні зі зриваним шаром та оброблюваною поверхнею F_{Σ} :

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n F_i.$$

При обробленні вільним абразивом (порошки, пасти, суспензії, гідроабразивні емульсії на водній або масляній основі тощо) зерна знаходяться у специфічному середовищі, у якому вони зовсім (порошки, суспензії та ін.) або майже зов-

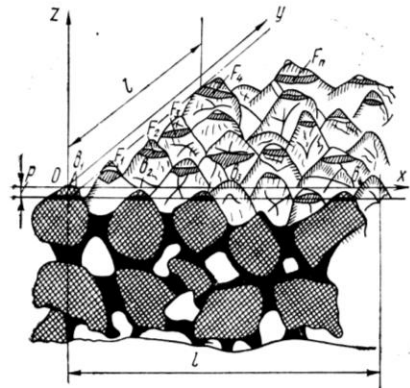


Рисунок 7.2 – Структура і рельєф різальної поверхні абразивного інструменту: l – базова довжина уздовж профілю рельєфу; F_1, \dots, F_n – площі переріз рельєфу площиною на рівні p ; $v_1 - v_i$ – довжини відрізків профілю на рівні p

всім (пасти з «квазітвердою основою») між собою не «зв'язані» й можуть вільно відносно одне одного переміщатися, повертатися тощо.

Примітка. При абразивному обробленні використовуються і такі інструменти, в яких зерна між собою відносно міцно «зв'язані», але сам інструмент виготовляється на еластичній основі, наприклад шкірки.

Кожна з груп абразивного оброблення залежно від властивостей оброблюваного матеріалу та виду оброблення (шліфування, хонінгування, суперфінішування, магнітоабразивна обробка, гідроабразивна обробка, доводка, притирка, полірування тощо) має характерні особливості інструментального забезпечення, вибору інструментального матеріалу, призначення режимів різання тощо. Характерні для кожного виду оброблення, незалежно від приналежності його до тієї чи іншої групи, роблять робочий процес (процес різання) при абразивному обробленні дуже мало схожим на процес різання при обробці лезовим інструментом.

До характерних особливостей абразивного оброблення можна віднести:

- процес абразивного оброблення – процес масового різання-дряпання, внаслідок якого формується відповідний мікропрофіль обробленої поверхні (рис. 7.3), причому у роботі за рахунок різновисотності одночасно беруть участь зерна, що різують (рис. 7.3, зерна 3, 6, та 7; рис. 7.4, зерно 3), тобто утворюють стружку; зерна, що тільки знаходяться у контакті зі зрізуваним шаром (рис. 7.3 зерно 5 та рис. 7.4, зерна 6), але хоч і спостерігається пластична деформа-

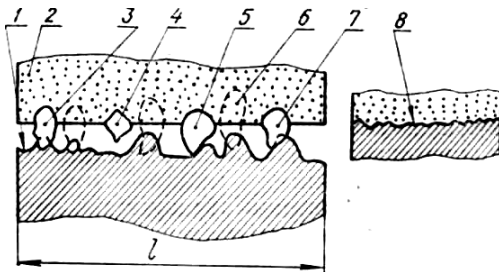


Рисунок 7.3 – Умовна схема роботи зерен абразивного інструменту:

1 – оброблювана поверхня; 2 – зв'язка абразивного інструменту; 3 – 7 – абразивні зерна; 8 – сформований мікропрофіль обробленої поверхні

решткою обробленої поверхні (рис. 7.3), причому у роботі за рахунок різновисотності одночасно беруть участь зерна, що різують (рис. 7.3, зерна 3, 6, та 7; рис. 7.4, зерно 3), тобто утворюють стружку; зерна, що тільки знаходяться у контакті зі зрізуваним шаром (рис. 7.3 зерно 5 та рис. 7.4, зерна 6), але хоч і спостерігається пластична деформа-

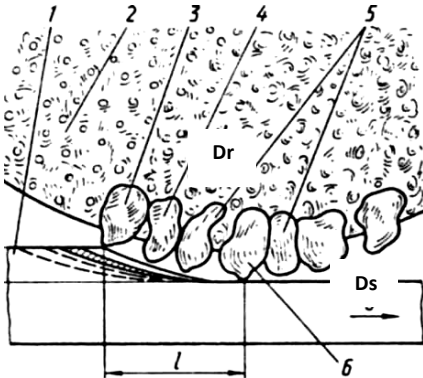


Рисунок 7.4 – Схематичне зображення процесу шліфування:
1 – зрізуваний шар; 2 – зв'язка;
3 – 6 – абразивні зерна

ленні з дуже малою подачею. Шорсткість поверхні при цьому зменшується;

- абразивне оброблення зв'язаним абразивом потрібно вважати обробленням хаотично розташованими зернами в усьому об'ємі інструменту. В зоні різання оброблювана елементарна поверхня на ділянці l за час її контакту з інструментом, у даному випадку зі шліфувальним кругом, стикається не з одним рядом зерен, а з кількома;

- різання здійснюється великою кількістю безладно розташованих абразивних зерен, що мають відносно високу мікротвердість. Ці зерна, утворюючи переривчастий різальний контур, під час різання зрізують тонкі стружки дуже малого об'єму (рис. 7.4);

- абразивні зерна розташовуються в тілі середовища або інструменту, наприклад, шліфувального круга, хаотично; вони найчастіше мають від'ємні передні кути, що визначають від'ємні кути різання, при цьому зерна, як правило, мають округлу форму, що за наявності малої товщини зрізуваного шару супроводжується відносно великим об'ємом пластичної деформації і значним виділенням теплоти;

- для деяких видів абразивного оброблення, наприклад шліфування, процес зрізування стружки окремим абразивним

ція, прото стружка відсутня; зерна, у яких контакт зі зрізуваним шаром взагалі відсутній (рис. 7.3, зерно 4; рис. 7.4, зерна 4 та 5). В реальному процесі абразивного оброблення переважна більшість зерен (приблизно 85–90%) не різють, а пластично деформують найтонший поверхневий шар, тобто наклепує його. Ефект наклепування різко зростає при тонких процесах оброблення, особливо при виходжуванні або оброб-

зерном здійснюється на високих швидкостях різання (10 – 100 м/с) і за дуже короткий проміжок часу (протягом тисячних часток секунди), що супроводжується високими температурами різання, й, у зв'язку з цим, структурними перетвореннями у поверхневому шарі та зниженням якості обробленої поверхні. Таким чином, високі швидкості різання та погіршена геометрія різальних абразивних кромок сприяють розвитку в зоні різання високих температур, що може спричинити появу на обробленій поверхні ділянок припідкання;

- для видів оброблення інструментом зі зв'язаним абразивом характерним є явище «засалювання» робочої поверхні інструменту за рахунок розміщення та закріплення між зернами утворюваної у процесі різання стружки, що потребує специфічної для цих видів оброблення технологічної процедури – правки, тобто видалення з поверхні інструменту частини абразивоутримуючого шару з метою відновлення різальної здатності абразивного інструменту;

- керувати процесом абразивного оброблення можна тільки зміною режимів та умов різання, а не геометрії абразивного зерна.

Механічне оброблення абразивними зернами і зернами з НТМ (алмаз, кубічний нітрид бору) можна використовувати при обробці практично всіх матеріалів, оскільки твердість абразивних зерен дуже висока. Для порівняння можна відзначити, що їх твердість (при переведенні у відносно однакові одиниці вимірювання) становить: алмазу – НВ 7000, абразиву – НВ 2200–3100, цементиту – НВ 2000, твердого сплаву – НВ 1300, загартованої сталі – НВ 600–700.

Абразивне оброблення, як правило, використовується як завершальна (фінішна або суперфінішна) операція для одержання на деталях з твердих і важкооброблюваних матеріалів високої точності (9-й квалітет і вище) та високих класів чистоти (7-й клас ($Ra=1,25$ мкм) і вище) оброблюваних поверхонь.

Примітка. У деяких випадках такий вид абразивного оброблення, як шліфування, застосовується для обдирання поковок і виливків, зачищення зварних швів, тобто як підготовчі та

чорнові операції. Найчастіше для цього рекомендується силове шліфування для знімання великих припусків із великою подачею (до 6 мм/об.).

7.2. Характеристики абразивних інструментів

Властивості абразивних інструментів характеризуються такими параметрами: *родом (матеріалом) абразивних зерен, зернистістю, видом зв'язки, твердістю, номером структури, типом інструменту, розмірами.*

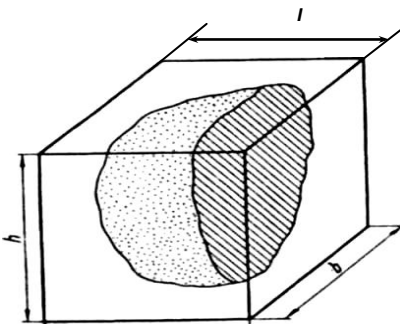


Рисунок 7.5 – Форма абразивного зерна

Ці параметри визначають експлуатаційні можливості абразивних інструментів, а їх правильний вибір впливає на стабільність їхніх різальних властивостей.

Для правильного вибору характеристик абразивних інструментів необхідно знати конкретні умови оброблення: верстат, режим його роботи, марку оброблюваного матеріалу, припуск на оброблення, задану шорсткість оброблення, вид і характер подачі, мастильно-охолодну рідину, спосіб та інструменти для правки тощо.

Якість абразивних матеріалів визначається формою та розміром зерен, твердістю, теплостійкістю, іншими фізико-механічними властивостями.

Форма і розміри абразивних зерен характеризуються довжиною l , висотою h і шириною b (рис. 7.5). Якщо ці розміри однакові або їх відношення близьке до одиниці, то такі зерна називають нормальними. Вони мають найбільшу міцність. При $l:h:b=1:3:1/3$ зерна називають пластинчастими, а при більшому співвідношенні – подібними.

7.3. Абразивні матеріали

Абразивного оброблення зазнають багато деталей з металевих і неметалевих матеріалів.

Абразивними матеріалами називають речовини природного та штучного походження, що мають високі твердість, міцність і стійкість проти спрацювання, частинки яких придатні для оброблення деталей дряпанням або стиранням.

Мікротвердість, теплостійкість та відносну абразивну здатність основних абразивних матеріалів наведено в табл. 5.3 та 7.1.

Таблиця 7.1 – Фізико-механічні властивості *основних* абразивних матеріалів

Абразивний матеріал	Мікротвердість, МПа	Термостійкість, °С	Відносна абразивна здатність*
<i>Електрокорунд:</i>			
нормальний	180–200	1250–1300	0,20
білий	200–210	1700–1800	0,20
хромистий	200–220	1700–1800	0,21
титанистий	220–230	1750–1850	0,15
цирконієвий	230–240	1900–2000	0,30
монокорунд	210–260	1700–1800	0,21
<i>Карбід кремнію:</i>			
чорний	280–260	1300–1400	0,55
зелений	280–260	1300–1400	0,60
<i>Карбід бору</i>			
<i>Кубічний нітрид бору</i>	730–950	1200–1500	0,80
<i>Синтетичні й натуральні алмази</i>	800–1000	700–850	1,00

Примітка. Абразивна здатність матеріалів наведена стосовно абразивної здатності алмазу, яку прийнято за одиницю

Усі абразивні матеріали умовно можна розбити на дві великі групи.

1. *Абразивні матеріали природного* (корунд, наждак, кварц, кремій) та *штучного* (різні електрокорунди, карбіди кремнію, карбід бору й ін.) походження.

2. *Надтверді абразивні матеріали природного* (алмаз) та *штучного* (синтетичні надтверді матеріали: а) на основі алмазу, б) на основі кубічного нітриду бору) походження.

7.3.1. Природні й синтетичні абразивні матеріали та їх властивості

7.1.1.1. Природні абразивні матеріали

У металообробній промисловості найчастіше застосовують такі абразивні природні матеріали: кварц, наждак, корунд.

Кварц – це безводна кристалічна кремнієва кислота SiO_2 . Вміст кремнезему у кварці 1-го сорту – 99,5% і 2-го сорту не менш 98,5%; твердість кварцу за шкалою Мооса 7, його мікротвердість 1100–1130 кГ/мм^2 ; густина 2,4–2,7 г/см^3 ; залежно від домішок, що містяться у кварці, він має різні забарвлення (від безбарвного до чорного) і назви.

Для виготовлення абразивного інструменту кварц майже не застосовується внаслідок недостатньої твердості, а також у зв'язку з тим, що у шліфувальних ккругах, виготовлених з нього, швидко змінюються розміри. Різновид кварцу – **кремній**, що містить не менш 97% SiO_2 , застосовується для виготовлення шліфувальної шкурки на тканевій і на паперовій основах, призначеної для обробки дерева й шкіри.

Наждак містить до 60% окису алюмінію Al_2O_3 і має кристалічну будову. Твердість наждаку за шкалою Мооса – 7–8.

Корунд – це кристалічний глинозем, і залежно від домішок, що містяться в ньому, має різні коляри, властивості й назви. Застосовуваний у промисловості корунд містить до 95% Al_2O_3 ; густина корунду 3,9–4,1 г/см^3 ; він більш в'язкий і менш крихкий порівняно з наждаком; його твердість за шкалою Мооса близько 9. Корунд застосовують у вигляді порошків і мікропорошків для шліфування, доведення й полірування.

Природні абразивні матеріали (кварц, гранат, корунд, кремій, наждак (табл. 7.2) дуже засмічені природними домішками, мають відносно низькі рзальні властивості, через що рідко використовуються в абразивному обробленні деталей машинобудівної галузі.

Найчастіше в машинобудівній галузі застосовують велику гаму штучних (синтетичних) абразивних матеріалів.

Карбід бору B_4C – абразивний матеріал, який виплавляють в електричних печах з борної кислоти та нафтового коксу. Він складається з кристалічного карбіду бору та невеликої кількості домішок бору, графіту й інших елементів. Містить до 93 % B_4C і 1,5 % вільного вуглецю. Мікротвердість карбіду бору становить 330–450 МПа.

Таблиця 7.2 – Позначення та властивості абразивних матеріалів

Матеріал		Умовні позначення марок матеріалів	Основні компоненти (масовий вміст, %)	Температурна межа втрати абразивних властивостей, °C
1		2	3	4
Природні надтверді та абразивні матеріали				
Алмаз		А, АМ, АН	С	600–700
Корунд		Е	Al_2O_3 (80–85)	1700–1800
Наждак		Н	Al_2O_3 (25–60)	1700–1800
Кремій		К _в	SiO_2 (98)	1500–1600
Синтетичні надтверді та абразивні матеріали				
Алмаз		АС, АРВ, АРК, АРС, АСМ, АСН	С	600–700
Кубічний нітрид бору (ельбор)		КНБ	Сполуки BN	1400
Карбіди	бору	КБ	B_4C (85–94)	700–800
	кремнію (зелений)	64С, 63С, 62С	SiC (96–99)	1300–1400
	кремнію (чорний)	55С, 54С, 53С	SiC (95–98)	1300–1400
Електрокорунд:	нормальний	12А, 13А, 14А, 15А, 16А	Al_2O_3 (92–95)	1250–1300
	білий	25А, 24А, 23А, 22А	Al_2O_3 (96–99)	1700–1800
	хромистий	32А, 33А, 34А	Al_2O_3 (97–98)+ CrO ₃	1700–1800
	монокорунд	43А, 44А, 45А	Al_2O_3	1700–1800
	титанистий	37А	Al_2O_3 (97–98)+ TiO	1750-1850

Продовження табл. 7.2

1		2	3	4
	цирконієвий	38А	$Al_2O_3(55-90)+ZrO_2$	1900–2000
	хромотитаністий	91А, 92А, 93А, 94А	$Al_2O_3(95-98) + (CrO_3+TiO)$	1770–1820

У зв'язку з високою крихкістю карбїду бору, особливо великих зерен, його, як правило, переробляють у шліфувальні та мікропорошки. Рекомендований технологічний процес з використанням карбїду бору – доведення металорізальних інструментів і деталей типу плунжер – втулка та ін.

Силікокарбїд бору одержують методом відновлювального плавлення суміші борної кислоти, нафтового коксу і кварцового піску. Його різальна здатність набагато вища, ніж карбїду бору. Застосовується у вигляді високоякісних мікропорошків для оброблення технічних рубїнів, твердих сплавів та інших дуже твердих матеріалів.

Електрокорунд одержують методом електричного плавлення багатих на оксид алюмінію (бокситу, глинозему) матеріалів у дугових печах при температурі 1850–2000 °С. Електрокорунд – достатньо твердий, щільний і термостійкий матеріал. Промисловість залежно від вмісту Al_2O_3 випускає кілька різновидів електрокорунду, в тому числі: нормальний, білий, хромистий, титаністий, хромотитаністий, цирконієвий, моно- й сферокорунд та ін.

Нормальний електрокорунд містить до 95 % Al_2O_3 і невелику кількість шлаку та феросплаву. Він позначається індексом 1А, випускається марок 12А, 13А, 14А, 15А і 16А, найбільше – марки 15А зі вмістом 95 % Al_2O_3 . Він має колір від сіро- до темно-коричневого та від рожевого до темно-червоного.

Високі твердість і механічна міцність зерен нормального електрокорунду дають змогу широко використовувати його при шліфуванні металів. Він має значну в'язкість, необхідну для виконання робіт зі змінними навантаженнями.

З нормального електрокорунду одержують шліфувальне зерно, шліфувальні та мікропорошки різних розмірів. Вони за-

стосовуються для виготовлення різноманітних абразивних інструментів, якими користуються при шліфуванні, хонінгуванні та інших видів абразивного оброблення сталей, ковких чавунів, твердої бронзи тощо.

Білий електрокорунд містить більш як 97 % Al_2O_3 і позначається індексом 2А. Випускається марок 22А, 23А, 24А та 25А. Марка 22А містить 97 % Al_2O_3 , а марки 24А і 25А – 99 % та більше. Має білий, сірувато-білий або світло-рожевий кольори. Він твердіший, ніж нормальний електрокорунд. За хімічним і фізичним складом білий електрокорунд більш однорідний, ніж нормальний. Його зерна мають високу міцність та гострі кромки, зерна легко проникають у тверді міцні матеріали (азотовані, жароміцні), менше нагріваються, ніж зерна інших різновидів електрокорунду. Абразивні інструменти з білого електрокорунду відрізняються стабільними властивостями, мають хорошу самозаточуваність, тобто можуть працювати без «засалювання», і забезпечують високу чистоту обробленої поверхні.

Білий електрокорунд переробляють на шліфувальне зерно, шліфувальні та мікропорошки для виготовлення абразивних інструментів на різних зв'язках і шліфувальної шкурки. Цей корунд застосовується при виготовленні відповідальних різшліфувальних заточувальних кругів, призначених для виконання точних робіт, а також при виготовленні брусків до хонінгувальних і суперфінішних головок головним чином для обробки сталей.

Хромистий електрокорунд (технічний рубін) виготовляють з глинозему з добавкою 0,4–2 % оксиду хрому CrO_3 . Він містить близько 97 % Al_2O_3 . Зерна цього електрокорунду порівняно з білим мають вищу стабільність фізико-механічних властивостей і містять більше монокристалів. Він твердіший, ніж білий електрокорунд. Наявність у хромистому електрокорунді твердого розчину хрому істотно змінює його мікроструктуру і властивості: зростають механічна міцність та абразивна здатність зерна порівняно із зерном білого електрокорунду. При збільшенні вмісту оксиду хрому механічна міцність зерна знижується, а абразивна здатність підвищується.

Абразивні інструменти з хромистого електрокорунду забезпечують на 20–30% вищу продуктивність оброблення конструкційних і вуглецевих сталей при інтенсивних режимах шліфування порівняно з інструментами із білого електрокорунду. Хромистий електрокорунд за кольором схожий на рубін: має темно-рожеве або темно-вишневе забарвлення. Позначається індексом 3А і випускається марок 32А, 33А, 34А.

Шліфувальне зерно та шліфувальні порошки хромистого електрокорунду застосовуються для виробництва абразивних інструментів на різних зв'язках, а також шліфувальних шкурок.

Титанистий електрокорунд (технічний сапфір) одержують плавленням глинозему з присадками 2–3 % оксиду титану. Його зерна мають підвищену різальну здатність, він твердіший від хромистого електрокорунду, позначається індексом 3А і випускається марки 37А. За своїм складом та мікроструктурою титанистий електрокорунд аналогічний високоякісному звичайному електрокорунду.

Титанистий електрокорунд випускається у вигляді шліфувальних зерен і шліфувальних порошків, призначений для виготовлення абразивних інструментів, що використовуються при обробленні вуглецевих, конструкційних та інших загартованих і незагартованих сталей.

Виробництво **хромотитанистого** ($\text{CrO}_3 + \text{TiO}$) електрокорунду почалось у 1977 р. Він має всі позитивні якості хромистого та титанистого електрокорундів. За експлуатаційними властивостями наближається до монокорунду. Позначається індексом 9А і випускається марок 91А, 92А, 93А, 94А. Шліфувальні круги із **хромотитанистого** електрокорунду мають підвищену стійкість: відносна витрата **хромотитанистого** електрокорунду знижується в 1,6 рази порівняно електрокорундом білим.

Цирконієвий електрокорунд виготовляють плавленням в електричній печі шихти, що містить глинозем, цирконієвий концентрат або чистий діоксид цирконію, вміст якого становить 10–45 % залежно від призначення електрокорунду. Випускається марки 38А. Основні складові – баделейт та корунд. Будова – монокристалічна. При виготовленні цирконієвого електрокорунду

створюються умови для його твердіння з утворенням кристалів розміром не більш як 50 мкм. Один зі способів виробництва цирконієвого електрокорунду – пропускання розплавленого матеріалу між охолодженими валками. В цьому разі одержують пластини завтовшки 2–5 мм, які складаються з мікрокристалічного щільного міцного матеріалу. Охолоджені пластини переробляють на шліфувальні зерна і шліфувальні порошки. Шліфувальні зерна, що йдуть на виробництво обдирних кругів, піддають спеціальному обробленню та перевіряють на крихкість. Стійкість інструментів із цирконієвого електрокорунду на обдирних операціях у 10–40 разів вища від стійкості інструментів із звичайного електрокорунду.

Монокорунд – один із різновидів електрокорунду, зерна якого складаються з окремих кристалів або їх осколків. Містить близько 97% Al_2O_3 . За твердістю він перевищує білий електрокорунд. Позначається індексом 4А, випускається марок 43А, 44А, 45А. Його особливість – наявність великої кількості граней, а отже, і різальних кромek зерна. Зі збільшенням розміру зерна структура його погіршується і міцність знижується. Зерна монокорунду мають ізотермічну форму, високу механічну міцність. Під час шліфування зерна сколюються, набуваючи високих різальних якостей, унаслідок чого процес різання супроводжується відносно малими зусиллями різання.

Монокорунд випускається у вигляді шліфувальних зерен та шліфувальних порошків різної зернистості, які йдуть на виготовлення абразивних інструментів для шліфування: міцних конструкційних сталей, ковкого чавуну, швидкорізальної сталі, важкооброблюваних легованих сталей і сплавів.

Сферокорунд – абразивний матеріал, який виготовляють із глинозему у вигляді корундових сфер. У ньому міститься 99 % Al_2O_3 , а також невелика кількість домішок. Випускається марки ЕС. Абразивні інструменти, виготовлені зі сферокорунду на основі різних зв'язок, ефективно застосовують при обробленні м'яких і в'язких матеріалів: кольорових металів, пластмас, гуми, шкіри, деревини та ін. Під час роботи таких інструментів їх сфери руйнуються й оголюються гострі різальні кромки, що забез-

печує продуктивне шліфування з малим виділенням теплоти. Інколи використовується як пороутворювач.

Формокорунд – абразивний матеріал, який містить 80–87% Al_2O_3 і не більше 1,5% Fe_2O_3 . Випускається у вигляді зерен циліндричної і призматичної форм із розмірами: діаметр або ширина перерізу 1,2–2,8 мм, довжина 3,8–8 мм. Переважно використовується для важких обдирних робіт при шліфуванні сталей і чавунів.

Рубін і лейкосапфір. Серед синтетичних абразивних матеріалів як інструментальні матеріали знаходять застосування і такі, як синтетичний корунд у вигляді рубіну та монокристали безбарвного корунду, або лейкосапфіри.

Рубін – це модифікація α – Al_2O_3 з невеликими домішками хрому, а лейкосапфір – синтетичний монокристал Al_2O_3 у вигляді α -модифікації, що майже не містить домішок. Останній має більш високі механічні властивості, внаслідок чого й знаходить більш широке застосування. Він виготовляється у вигляді монокристалів, які в основному мають вигляд булі. Величина й вага булей зазначені у ГОСТ 9618–61. Рубін і лейкокосапфір застосовуються (після подрібнення) для виготовлення шліфувальних кругів, порошоків і паст. Ці матеріали й інструменти, виготовлені з них, рекомендується використовувати в основному для обробки кольорових металів.

Карбід кремнію SiC виплавляють в електropечачах при температурі 1500–2200 °С з матеріалів, багатих на кремнезем (кварцового піску), та з невисоким вмістом вуглецю (нафтового коксу, антрациту тощо). Карбід кремнію має більшу твердість (280–360 МПа) і крихкість, ніж електрокорунд, але в нього гостріші різальні кромки. З карбіду кремнію одержують шліфувальне зерно, шліфувальні та мікропорошки, які застосовують для виготовлення абразивних інструментів на твердій і гнучкій основах, а також паст. Останні використовують для довідних робіт.

Розрізняють *чорний* та *зелений* карбід кремнію.

Чорний карбід кремнію позначається індексом 5С, містить 95–98 % SiC і має чорний або темно-синій колір. Він випускається марок 52С, 54С, 55С. Марка 52С містить 95 % карбіду крем-

нію, а 55С – 98 %. Застосовується для заточування твердосплавних інструментів, шліфування твердих сплавів, твердих і крихких металів (чавуну, бронзи), скла, пластмас, гуми та ін.

Зелений карбід кремнію позначається індексом 6С, містить більш як 97 % SiC. Має колір від світло-зеленого до темно-зеленого. Випускається марок 62С, 63С, 64С. Марка 62С містить 97 % карбіду кремнію, марка 63С – 98 %, а марка 64С – 99 %. У зеленому карбіді кремнію менше домішок, він має гостріші різальні кромки, більшу абразивну здатність, але він крихкіший, ніж чорний карбід кремнію. Застосовується для заточування інструментів зі швидкорізальних сталей і твердих сплавів, а також для оброблення деталей з керамічних матеріалів, різних каменів та ін.

У табл. 7.3 наведені приклади використання абразивних матеріалів в інструментальному виробництві.

Таблиця 7.3 – Абразивні матеріали з електрокорунду та карбіду кремнію

Абразивний матеріал	Позначення	Рекомендовані операції
1	2	3
Електрокорунд нормальний	12А 13А 14А 15А 16А	Попереднє шліфування корпусів збірних інструментів з конструкційних сталей. Ведучі круги при безцентровому шліфуванні
Електрокорунд білий	22А 23А 24А 25А	Попереднє й остаточне шліфування та заточування інструментів зі швидкорізальних сталей
Електрокорунд хромистий	32А 33А 34А	Попереднє й остаточне шліфування з підвищеною продуктивністю інструментів зі швидкорізальних сталей
Електрокорунд титанистий	37А	Шліфування заготовок із вуглецевих і конструкційних сталей
Монокорунд	43А 44А 45А	Шліфування й заточування інструментів зі швидкорізальних сталей погіршеної шліфовані
Карбід кремнію зелений	63С 64С	Попереднє шліфування й заточування інструментів із твердих сплавів при зніманні великого припуску

Продовження табл. 7.3

1	2	3
Хромотитанистий електрокорунд	91А 92А	Остаточне шліфування інструментів зі швидкорізальних сталей кругами підвищеної стійкості

7.3.2. Природні й синтетичні надтверді матеріали та їх властивості

7.3.2.1. Природні абразивні надтверді матеріали

Із надтвердих матеріалів у природі існує тільки алмаз. Згідно з прийнятими термінами та визначеннями алмаз – кристалічна речовина, що є однією з поліморфних модифікацій вуглецю кубічної сингонії.

Примітка. Сингонія – поділ кристалів за ознакою симетрії їх елементарної структури

Розрізняють монокристал і полікристал алмазу: перший – це одиничний кристал із практично незмінною структурою, другий – зрощення монокристалів.

Слово «алмаз» походить від грецького слова «адамас» (незламний) або від тюркського «алмас» (найтвердіший). Алмаз – найтвердіший у природі мінерал, що утворився на великій глибині при величезному тиску (більше 100 тис. атмосфер) земних надр і високій температурі (більше 2000 °С) з розплавленої магми, яка містила вуглець.

Природний алмаз – мінерал, що складається з кристалічного вуглецю. Атоми вуглецю в кристалічній ґратці алмазу дуже міцно зв'язані, що забезпечує їх високу твердість (1000 МПа). Алмази стійкі до фізичних і хімічних реагентів. Вони приблизно у п'ять разів твердіші від корунду, в три рази – від карбіду кремнію та в 2,6 рази – від карбіду бору. Висока твердість дає змогу алмазним зернам легко проникати в дуже тверді оброблювані матеріали, зберігаючи при цьому високу стійкість зерен проти спрацювання (наприклад, у 140 разів вищу, ніж у корунду) на режимах швидкісного оброблення, і забезпечити необхідні точність і продуктивність оброблення.

Твердість алмазів залежить від кристалічної будови, тобто від розташування атомів вуглецю. Найтвердішим є алмаз, що має атомну ґратку у вигляді октаедра.

Алмази мають виключно високу теплопровідність, приблизно у п'ять разів вищу, ніж карбід кремнію. Ця важлива властивість алмазних зерен сприяє прискореному відведенню теплоти із зони різання і зниженню миттєвих температур різання.

Густина алмазів дорівнює $3,5 \text{ г/см}^3$. Природні алмази – діелектрики. Термостійкість їх невисока. В атмосфері, що не окислюється (у водні, азоті), алмази можна нагрівати до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ і вище практично без зміни їх властивостей. Помігне окислення алмазів у середовищі кисню починається при $700 \text{ }^\circ\text{C}$, повне згоряння – при $876 \text{ }^\circ\text{C}$. При температурі $780 \text{ }^\circ\text{C}$ спостерігається алотропічне перетворення природного алмазу у графіт.

Міцність алмазних зерен невисока. Це визначає технологічні особливості застосування алмазів як різальних інструментів: тонкі стружки, малі навантаження, безударна та безвібраційна робота. Кристали алмазів анізотропні за твердістю і міцністю. У зв'язку з цим їх потрібно орієнтувати так, щоб оброблення (гранування) кристала здійснювалося в «м'якому», а різальні грані розташовувалися у «твердому» напрямках.

Природні алмази класифікують на ювелірні та технічні. Перші – це найвисоко сортніші алмази. До 80 % натуральних алмазів використовуються для технічних цілей (найчастіше для виготовлення довідних паст і шліфувальних кругів, алмазних олівців для правки абразивних інструментів, а також, у дуже малих обсягах, різців).

Технічні алмази поділяються на бортси масою $0,25\text{--}1,00$ карат, баласи масою $1,25\text{--}2,00$ карата та карбонадо масою $1,25\text{--}3,00$ карата. Крайні з них – карбонадо (тонкозернисті тверді та щільні кристали, що мають гострі ребра).

Примітка. Карат – одиниця маси алмазу, що дорівнює $0,202 \text{ г}$.

Природні алмази поділяються на сім категорій. Алмази першої та другої категорій застосовуються в основному в ювелірній промисловості. Третя категорія – технічні алмази для різців, свердел, правильних олівців, наконечників до вимірюваль-

них приладів, волок та ін. Четверта категорія – технічні алмази для бурових інструментів й алмазно-металевих олівців. П'ята – сьома категорії – алмази зниженої якості, що використовуються для подальшого дроблення і виготовлення абразивних інструментів, порошків, паст тощо. Природні алмази позначають літерою А. Як абразивні матеріали використовують алмазні порошки марок А1, А2, А3, А4 та А5 головним чином для шліфування та заточування інструментів з надтвердих матеріалів (з алмазу або кубічного нітриду бору) та кераміки. Природні алмази марки А8 використовують для правки шліфувальних кругів. Крім того, з природних алмазів виготовляють мікро – (АМ) та нано – (АН) порошки, які використовують під час фінішних довідних та полірувальних операцій (табл.7.4).

Таблиця 7.4 – Природні алмазні абразивні матеріали і рекомендовані операції для їх використання

Марка алмазних порошків (ГОСТ 9206-80)	Рекомендована операція
А1, А2, А3, А5	Шліфування й заточення інструментів з алмазу, надтвердих матеріалів, кераміки
А8	Виправлення шліфувальних кругів
АМ	Доведення, полірування інструментів із твердих сплавів, кераміки й надтвердих матеріалів
АН	Доведення й полірування інструментів з надтвердих матеріалів
АМ5	Надтонке доведення й полірування інструмента із твердих сплавів

Потрібно враховувати ту обставину, що природні алмази хоч і мають високі різальні властивості, але дуже дорогі. У ряді випадків, наприклад, вартість природних алмазів третьої категорії близька до вартості ювелірних алмазів. Тому найчастіше для зазначених цілей замість природних алмазів застосовують синтетичні надтверді матеріали на основі алмазу та кубічного нітриду бору.

7.3.2.2. Синтетичні абразивні надтверді матеріали

Основні відомості про синтетичні надтверді матеріали на основі алмазу та кубічного нітриду бору наведені у розділі 0.

Разом з тим у 5-му розділі ці матеріали розглядаються в основному під кутом зору виготовлення з них лезових інструментів.

Примітка. Абразивні надтверді інструментальні матеріали, головним чином, застосовуються в інструментальному виробництві під час виготовлення інструментів із загартованих швидкорізальних сталей, твердих сплавів, кераміки, надтвердих матеріалів тощо.

Синтетичні абразивні надтверді матеріали на основі алмазу. На рис. 7.6 показані основні групи алмазних порошків (шліфпорошки, мікропорошки, субмікропорошки та нанопорошки) і області їх застосування при виготовленні абразивних інструментів, паст і суспензій для різних технологічних процесів (шліфування, хонінгування, суперфінішування, відрізування, полірування, доводки, буріння, оброблення каменю тощо).

В залежності від вихідної сировини синтетичні алмазні порошки позначають: АР – синтетичний полікристалічний алмаз, АС – синтетичний монокристалічний алмаз.

До позначення синтетичного полікристалічного алмазу АР додають літеру, що визначає тип полікристалічного алмазу: АРБ – балас; АРК – карбонадо; АРС – спеки. Загалом промисловістю випускається більше 20 марок алмазних порошків, які відрізняються типом алмазу та зернистістю.

Найчастіше для абразивних інструментів використовують синтетичні алмази таких модифікацій:

- АСВ – алмаз синтетичний високої міцності, призначений для виготовлення інструментів на металевій зв'язці, що працюють при великих питомих навантаженнях, характерних для чорнових операцій;

- АСК – алмаз синтетичний кристалічний з міцністю, близькою до міцності природних алмазів;

- АСКС – алмаз синтетичний кристалічний сортований, який у деяких випадках зао міцністю може перевищувати природні алмази.

Відзначимо, що міцність синтетичних алмазів визначається шляхом вимірювання сили роздавлювання зерен між двома паралельними корундовими пластинками. Вона залежить від зернистості алмазу й коливається в межах: АСО (зернистістю 4–25) – 0,14–0,25 кГс; АСП (зернистістю 5–32) – 0,2–0,74 кГс і т.д.

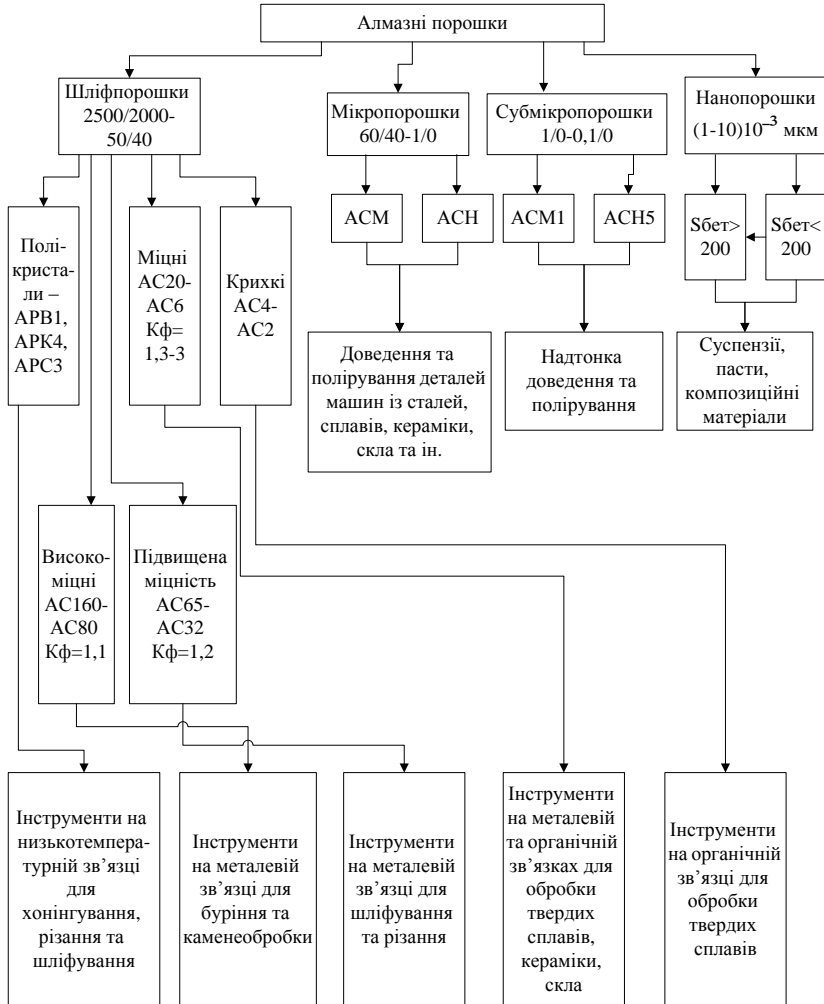


Рисунок 7.6 – Основні групи алмазних порошоків і галузі їх застосування

Алмази марок АСК і АСКС призначені для виготовлення алмазних інструментів: алмазно-металевих олівців і роликів для виправлення шліфувальних кругів, різців, склорізів, філь'єр і т.д.

Крім зазначених марок синтетичних алмазів, нашою промисловістю виготовляються алмазні мікропорошки двох марок: АСМ і АСПМ. Перша марка призначена для притиральних і довідних робіт при обробці твердих сплавів і сталей. Мікропорошки марки АСПМ мають підвищену абразивну здатність і застосовуються при обробці найбільш твердих матеріалів, таких як алмаз, діамант, рубін та ін.

Негативною властивістю алмазу є те, що при обробці матеріалів на залізній основі при температурі близько 850–900°C спостерігається активна дифузія вуглецю алмазу в залізо, що різко підвищує зношування алмазного інструменту.

Стійкість проти спрацювання твердосплавних інструментів, заточених та доведених алмазними кругами, у два-три рази вища, ніж після оброблення карбідом кремнію. При обробленні деталей такими твердосплавними інструментами знижується шорсткість обробленої поверхні на один-два класи.

Синтетичні абразивні надтверді матеріали на основі кубічного нітриду бору. Це тверді, теплостійкі і хімічно стійкі матеріали. За твердістю кубічний нітрид бору близький до алмазу. Його теплостійкість значно перевищує теплостійкість алмазу. Однією з основних переваг кубічного нітриду бору є його здатність протистояти циклічному впливу високих температур. Крім того, цей матеріал, на відміну від алмазів, хімічно інертний до залізвуглецевих сплавів (сталей), що особливо важливо при шліфуванні загартованих сталей, високоміцних і важкооброблюваних сталей і сплавів та при заточуванні швидкорізальних інструментів, коли контактна температура в зоні різання досягає 1000 °C й більше.

У табл. 7.5 наведені марки та приклади використання абразивних матеріалів з **кубічного нітриду бору** в інструментальному виробництві.

Мікроскопічний аналіз продуктів синтезу кубічного нітриду бору показав, що останній має вигляд зерен і кристаликів з різними розмірами. Основна маса зерен кубічного нітриду бору має розміри 30–90 мкм. Часто зустрічаються зерна й кристалики розміром 120–170 мкм. Останнім часом отримані більші зерна й кристали кубічного нітриду бору і навіть розміром 5 мм і крупніше.

Випускається кубічний нітрид бору у двох модифікаціях: у Росії – ельбор (Л); в Україні – кубаніт (К). Кристалізується кубічний нітрид бору подібно до алмазу. Осередок елементарних ґраток кубічного нітриду бору – це гранецентрований куб з атомів бору. Чотири атоми азоту розміщені всередині куба. Розташовані атоми азоту й бору (див. рис. 5.3 б) аналогічно атомам вуглецю в комірниці кристалічних ґрат алмазу (див. рис. 5.3 а). Постійна ґратка кубічного нітриду бору близька до постійних ґраток алмазу й становить 0,3615–0,3616 Нм. Її значення змінюється залежно від умов синтезу.

Таблиця 7.5 – Приклади використання абразивних матеріалів з кубічного нітриду бору в інструментальному виробництві

Зерно	Позначення		Рекомендовані операції
	ельбору	кубоніту	
1	2	3	4
Звичайної міцності	ЛО	КЛ	Остаточне шліфування й заточення інструментів зі швидкорізальних сталей
Підвищеної міцності	ЛП	КР	Попереднє й остаточне шліфування інструментів зі швидкорізальних сталей
Високої міцності	ЛКВ	-	Профільне шліфування, різьшліфування, вишліфовування канавок інструментів зі швидкорізальних сталей
Дроблене з полікристалів	ЛД	-	Профільне шліфування, різьшліфування, вишліфовування канавок інструментів зі швидкорізальних сталей
Звичайної міцності з металевим покриттям	ЛОМ	КОМ	Остаточне шліфування й заточення інструментів зі швидкорізальних сталей колами підвищеної стійкості на органічній зв'язці

Продовження табл. 7.5

1	2	3	4
Підвищеної міцності з металевим покриттям		КРМ	Попереднє й остаточне шліфування й заточення інструментів зі швидкорізальних сталей колами підвищеної стійкості на металевій зв'язці
Звичайної міцності зі склопокриттям	ЛОС	КОС	Остаточне шліфування й заточення інструментів зі швидкорізальних сталей колами підвищеної стійкості на органічній зв'язці
Агрегатоване з металевим покриттям		КОМА	Попереднє й остаточне шліфування й заточення інструментів зі швидкорізальних сталей кругами з підвищеною стійкістю
Мікропорошки	ЛМ	КМ	Остаточне шліфування, заточення й доведення інструментів зі швидкорізальних сталей

Відстань між зв'язаними атомами бору та азоту в осередку ґраток кубічного нітриду бору дорівнює 0,157 Нм. Енергія цього зв'язку становить 166,538 мДж/кмоль, що в 2,4 раза менше, ніж в алмазі (355,45932 мДж/кмоль).

Абразивна здатність кубічного нітриду бору зернистості 10–12 при шліфуванні скла становить 0,58–0,64 стосовно абразивної здатності природного алмазу, прийнятого за одиницю. При шліфуванні сталей кубічний нітрид бору за абразивною здатністю перевищує природний алмаз.

Відповідно до технічних умов МРТУ 036-1-68 промисловістю ельбор (кубічний нітрид бору) випускається двох марок: ЛО (КО) – звичайної механічної міцності, зі звичайним вмістом основної фракції; ЛП (КР) – підвищеної механічної міцності, зі збільшеним вмістом основної фракції.

7.4. Зернистість абразивних матеріалів

Однією з найважливіших характеристик абразивних матеріалів є зернистість, яка характеризує розміри абразивних зерен, що становлять геометричні тіла неправильної форми. *Зернистість* – це умовне позначення шліфувального матеріалу, що пов'язане з розмірами абразивних зерен, які належать до так званої основної фракції. *Основною фракцією* називається сукуп-

ність зерен певного розміру, що переважають у складі цього порошку за кількістю (у шліфзерні і в шліфпорошках) або за числом зерен (у мікропорошках). Основним розміром зерна є його ширина. Залежно від вмісту зерен основної фракції абразивні матеріали поділяються на чотири групи (табл. 7.6).

Таблиця 7.6 – Вміст зерен основної фракції в абразивних матеріалах

Група абразивних матеріалів	Вміст зерен основної фракції, %	Інструмент, виготовлений з абразивних матеріалів
1	2	3
В	60–55	Круги на всіх видах зв'язки
П	55–15	Круги на керамічній зв'язці діаметром до 300 мм
Н	45–10	Заточувальні круги діаметром понад 300 мм
Д	42–37	Круги на органічних зв'язках, абразивні шкурки

Розмір зерен основної фракції і позначення зернистості абразивних матеріалів згідно з ГОСТу 3647-80 наведено на рис. 7.8. На рис. 7.7 наведена зернистість алмазних та кубонігових шліфпорошків, яка регламентується ГОСТ 9206-70.

У табл. 7.7 наведені приклади вибору зернистості абразивного порошку в інструментальному виробництві.

Шорсткість поверхні визначається роботою зерен граничних малої (мілкої) й великої (крупної) фракцій, а знімання оброблюваного матеріалу – роботою зерен крупної або основної фракцій залежно від того, у якому кількісному співвідношенні вони є в абразивному інструменті (див. табл. 7.6).

Зернистість	Розміри сторони вічка сита у світлі, при якому зерна основної фракції	
	проходять через сито	затримуються на ситі
Широкий діапазон зернистостей		
2500/1600	2500	1600
1600/1000	1600	1000
1000/630	1000	630
630/400	630	400
400/250	400	250
250/160	250	160
160/100	160	100
100/63	100	63
63/40	63	40
Вузький діапазон зернистостей		
2500/2000	2500	2000
2000/1600	2000	1600
1600/1250	1600	1250
1250/1000	1250	1000
1000/800	1000	800
800/630	800	630
630/500	630	500
500/400	500	400
400/315	400	315
315/250	315	250
250/200	250	200
200/160	200	160
160/125	160	125
125/100	125	100
100/80	100	80
80/63	80	63
63/50	63	50
50/40	50	40

Рисунок 7.7 – Зернистість алмазних та кубонітових шліфпорошків, мкм

Абразивний матеріал	Розмір зерен, мкм	Позначення	
Шліфувальне зерно	2500–2000	200	
	2000–1600	160	
	1600–1250	125	
	1250–1000	100	
	1000–800	80	
	800–630	63	
	630–500	50	
	500–400	40	
	400–315	32	
	315–250	25	
	250–200	20	
	200–160	16	
	Шліфувальні порошки	160–125	12
		125–100	10
		100–80	8
80–63		6	
63–50		5	
50–40		4	
Мікрошліфувальні порошки	63–50	M63	
	50–40	M50	
	40–28	M40	
	28–20	M28	
	20–14	M20	
Тонкі мікрошліфувальні порошки	14–10	M14	
	10–7	M1	
	7–5	M7	
	5–3	M5	

Рисунок 7.8 – Розміри зерен і позначення зернистості абразивних матеріалів (ГОСТ 3647- 80)

Таблиця 7.7 – Приклади вибору зернистості абразивного порошку в інструментальному виробництві

Зернистість порошку		Шорсткість обробленої поверхні Ra , мкм	Вид операції
абразивного	алмазного, ельборового (кубонітового)		
200–100	–	12,5–6,3	Обдирання та зачищення виливків, кованих та великих штампованих заготовок
80–50	–	3–3,2	Попереднє плоске шліфування торцем круга, відрізнi роботи
40–25	–	2,5–1,6	Попереднє шліфування й заточення, виправлення алмазних кіл
20–12	160/125–100/80	1,6–0,8	Попереднє шліфування, заточення
10-8	80/63–63/50	0,8–0,4	Остаточне шліфування й заточення тврдосплавного інструмента
6-5	50/40	0,4–0,2	Фінішне шліфування, доведення, різешліфування
M40–M28	40/28–28/20	0,2–0,1	Суперфінішування, доведення, притирання
M20–M10	20/14–10/7	0,1–0,05	Доведення, притирання, фінішна обробка
M7–M5	7/5–3/2	0,05–0,04	Фінішна обробка

При вмісті зерен крупної фракції більше 20% інтенсивність знімання буде такою самою, як при обробці абразивом більшого (наступного) номера зернистості, а при вмісті зерен дрібної фракції понад 50% – як при обробці абразивом меншого номера зернистості.

Чим більший номер зернистості абразивного інструменту, тим більше навантаження він витримує й тим більшу продуктивність він забезпечує при обробці. Щодо шорсткості шліфованої поверхні зернистість абразивного інструменту дає

зворотний ефект: чим більший номер зернистості, тим гірше шорсткість поверхні.

7.5. Твердість абразивних інструментів

Важливою характеристикою абразивних інструментів (зі зв'язаним абразивом) є їх твердість.

Під твердістю абразивних інструментів розуміють силу, з якою абразивне зерно утримується зв'язкою. Це умовне позначення здатності зв'язки утримувати зерна в інструменті. Це поняття характеризує властивості абразивного інструменту в неробочому стані, але під час роботи зв'язка може змінювати свої властивості, а, відповідно, і сили, що утримують зерна в ній.

Як правило, м'яким абразивним інструментом на відміну від твердого називають такий, з якого зерна легко викришуються. Шліфувальні круги з електрокорунду й карбиду кремнію підрозділяються за твердістю на групи й ступені (табл. 7.8). Більший номер ступеня відповідає більшій твердості.

Таблиця 7.8 – Ступінь твердості абразивних інструментів

Характеристика інструменту за твердістю	Зв'язка абразивного інструменту		
	керамічна	бакелітова	вулканітова
М'який	M1, M2, M3		
Середньом'який	CM1, CM2	CM1, CM2	—
Середній	C1, C2	C1, C2	C
Середньотвердий	CT1, CT2, CT3	CT1, CT2, CT3	CT
Твердий	T1, T2	T1, T2	T

За твердістю абразивні інструменти поділяються на м'які (M1, M2 та M3), середньом'які (CT1, CT2, CT3), тверді (T1, T2), дуже тверді (BT1, BT2) і надзвичайно тверді (CT1, CT2). Визначення та контроль твердості абразивних інструментів проводяться за глибиною лунки, яку одержують на спеціальних приладах: піскоструминному, Роквелла або конусному твердомірі.

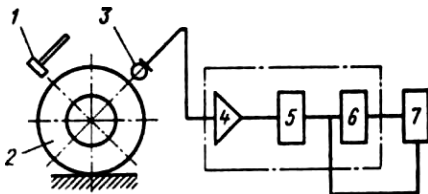


Рисунок 7.9 – Функціональна схема приладу «Звук-202»

Визначення твердості абразивних інструментів з електрокорунду, карбїду кремнію на керамічній та бакелітовій зв'язках зернистістю 12 і вище провадиться за допомогою спеціального піскоструминного апарата шляхом вимірювання глибини лунки, яка утворюється на абразивному інструменті під дією струменя кварцового піску, що викидається з камери приладу стисненим повітрям під тиском 1, 5–103 Па. Твердість шліфувальних кругів з електрокорунду та карбїду кремнію при зернистості від 12 до М14 і твердість ельборових кругів на керамічній зв'язці визначаються на твердомірі «Роквелл» шляхом вимірювання глибини лунки, утвореної при вдавлюванні сталевий кульки під дією певного навантаження. Твердість абразивних інструментів на вулканітовій зв'язці вимірюється на приладі ТЧІ методом вдавнення конуса з вершиною із твердого сплаву.

Для оцінки твердості абразивних інструментів (головним чином плоских, шліфувальних кругів) може бути використаний акустичний метод, що базується на визначенні резонансних частот механічних коливань, рівень яких для певного типорозміру абразивного інструменту відповідає ступеням твердості. Цей метод можна використовувати за допомогою приладу «Звук-202» (рис. 7.9), у якому порушення у крузі вільних коливань здійснюється за допомогою удару ударником 1 по циліндричній поверхні кола 2. Механічні коливання приймаються й перетворюються в електричний сигнал чутливим елементом – мікрофоном 3. Далі електричний сигнал посилюється підсилювачем 4 і потрапляє у фільтр 5, за допомогою якого із сигналу виділяються власні коливання круга. Частота виділених коливань вимірюється за допомогою частотоміра 7. Увімкнення частотоміра виконується синхронізатором 6.

Шліфувальні круги високого ступеня твердості забезпечують найбільший період стійкості круга, але вони працюють із затупленням як самих зерен, так і шліфувального інструменту в цілому (засалюванням). Це викликає небезпеку утворення дефектів на поверхні, що шліфується, і тому необхідне часте правлення круга. М'які шліфувальні круги працюють із інтенсивним самозаточуванням, тому абразивні зерна мають невеликий сту-

пінь затуплення, що дає можливість проводити більш продуктивно обробку. Однак такі круги не мають достатньої стійкості і відрізняються підвищеним зношуванням абразивного інструменту в цілому за рахунок передчасного видалення абразивних зерен з його робочої поверхні і майже не придатні для обробки фасонних поверхонь. Найкращі результати зі зносостійкості й продуктивності забезпечують круги середньої твердості, що працюють у режимі обмеженого самозаточування. При цьому чим вищий ступінь твердості шліфувального круга, тим більше він працює затупленими зернами й тим вища небезпека утворення дефектів на оброблюваній поверхні.

При виборі твердості абразивного інструменту варто керуватися такими правилами: чим нижчі твердість і вібросталість верстата, тим більш твердим повинен бути інструмент; під час роботи торцем круга варто застосовувати більш м'які круги, ніж під час роботи периферією; при обробці фасонних і переривчастих поверхонь твердість круга повинна бути вищою; застосування мастильно-охолоджувального технологічного середовища (МОТС) дозволяє використовувати більш тверді круги; чим більша площа контакту круга з оброблюваною поверхнею, тим м'якшим повинен бути круг; з появою дефектів на оброблюваній поверхні необхідно застосовувати більш м'які круги; круги на бакелітовій зв'язці повинні бути на один - два ступені більш твердими, ніж круги на керамічній зв'язці; для оброблення твердих матеріалів обираються м'які абразивні інструменти, а м'яких – тверді. Цей принцип вибору абразивного інструменту за твердістю впливає з умов найкращого його самозаточування і зменшення ймовірності його «засалювання» і необхідності внаслідок цього правлення шляхом видалення відповідного шару робочої поверхні інструменту.

7.6. Зв'язки абразивних інструментів

Зв'язка абразивних інструментів впливає на ефективність оброблення. У металообробній галузі найчастіше використовуються три види зв'язок: неорганічні, органічні та металеві. У табл. 7.9 наведені приклади використання зв'язок шліфувальних кругів в інструментальному виробництві.

Неорганічні зв'язки – керамічна (К), магнезіальна (М) і силікатна (С). Найпоширенішою є керамічна зв'язка, яка входить до складу більш як 50 % усіх абразивних інструментів.

Неорганічні зв'язки – багатокомпонентні, складаються з подрібнених сирих матеріалів: вогнетривкої глини, плавенів (польового шпату, борного скла), тальку та інших матеріалів. З метою підвищення пластичності та формовності в абразивно-керамічні маси додають клеючі речовини: рідке скло, декстрин та ін. Застосовуються також однокомпонентні зв'язки (фритові сплавлені), які мають вигляд скла. *Керамічні зв'язки* мають високі вогне- та водотривкість, хімічну стійкість, відносно високу міцність.

Залежно від термічного оброблення зв'язки поділяються на плавкі та спікливі. Перші після охолодження перетворюються в скло, а другі розплавляються тільки частково і за своїм складом та станом близькі до фарфору.

Абразивні інструменти з електрокорунду виготовляють на плавких, а з карбїду кремнію – на спікливих зв'язках. Плавкі зв'язки забезпечують більшу міцність абразивних інструментів, тобто електрокорундові інструменти значно міцніші, ніж круги з карбїду кремнію.

Абразивні інструменти на керамічних зв'язках знайшли ширше застосування порівняно з інструментами на органічних зв'язках, хоча технологія виготовлення перших складніша і триваліша, ніж технологія виготовлення інструментів на інших зв'язках.

Одним із істотних недоліків керамічних зв'язок (з точки зору міцності абразивних інструментів) є їх крихкість.

Таблиця 7.9 – Приклади використання зв'язок шліфувальних кругів в інструментальному виробництві

Зв'язки	Абразивний матеріал	Рекомендовані операції та умови обробки
1	2	3
Керамічні зв'язки		
К1 –К10	Електрокорунд	Попереднє й остаточне шліфування й заточення інструментів зі швидкорізальних сталей з охолодженням і насухо

Продовження табл. 7.9

1	2	3
К	Карбід кремнію	Попереднє кругле й плоске шліфування й заточення твердосплавного інструменту при зніманні великих припусків і обробці твердого сплаву разом з державкою
К	Алмаз	Заточення інструменту при обробці твердого сплаву разом з державкою
С10	Ельбор	Попереднє й остаточне шліфування й заточення інструменту зі швидкорізальних сталей з охолодженням і насухо
К19	Кубоніт	Заточення інструментів зі швидкорізальних сталей безоохолодження
Органічні зв'язки		
Б	Електрокорунд	Шліфування й заточення інструментів зі швидкорізальних сталей насухо й при підвищених вимогах до якості шліфованих поверхнь
В		Відрізання, вишліфовування канавок інструменту зі швидкорізальних сталей
В2-01 (Б1)	Алмаз	Остаточне шліфування, заточення й доведення інструменту із твердих сплавів, керамічних і надтвердих матеріалів з охолодженням і насухо
Б1	Ельбор, кубоніт	Остаточне шліфування, заточення, доведення інструментів зі швидкорізальних сталей
В1-04 (Б2)	Алмаз	Профільне шліфування, різешліфування, вишліфовування канавок твердосплавного інструменту
В3-01 (БР)		Остаточне шліфування й заточення інструментів із твердих сплавів і швидкорізальних сталей
В1-01 (БП-2)		Високопродуктивне механізоване шліфування й заточення твердосплавних інструментів, шліфування твердосплавних багатограних пластин
В1-02 (Б156)		Шліфування й заточення інструменту із твердого сплаву й надтвердих матеріалів з підвищеною продуктивністю, профільне шліфування, заточення вузькокрючними кругами
Металеві зв'язки		
М2-01 (М1)	Алмаз	Попереднє шліфування й заточення при підвищених вимогах до стійкості кіл, профільне шліфування, різешліфування твердосплавного інструменту з охолодженням
М1, МФ	Ельбор, кубоніт	Профільне шліфування, вишліфовування канавок інструменту зі швидкорізальних сталей
М1-01 (МВ1) М1-05 (М013)	Алмаз	Попереднє шліфування, заточення, вишліфовування канавок твердосплавного інструменту з охолодженням
М2-04Е (М15)		Електрохімічне шліфування й заточення твердосплавного інструменту
М4-01 (гальванічна)		Профільне та внутрішнє шліфування твердосплавного інструменту

Тому ці зв'язки не можна використовувати для виготовлення інструментів, що працюють в умовах великих навантажень, наприклад шліфувальні круги, які застосовують при обдирному та силовому шліфуванні.

Відносно низька мета міцності при вигині обмежує використання таких кругів на відрізних операціях, оскільки тонкі круги легко руйнуються від бічних навантажень.

Органічні зв'язки – бакелітова (Б), гліфталева (Г), вулканітова (В) та ін. З них найбільш поширена бакелітова зв'язка. Абразивні інструменти, виготовлені на рідкому і порошкоподібному бакеліті, мають вищу міцність і пружність, ніж інструменти на керамічних зв'язках. Висока міцність бакелітової зв'язки дає змогу працювати з великими швидкостями (80 м/с і вище), що є дуже важливим для таких інструментів, як шліфувальні круги. Саме такі круги рекомендується застосовувати при обдирному шліфуванні та на відрізних операціях.

Однак бакелітова зв'язка має низьку теплостійкість – вигорає при тривалій роботі та температурах до 250–300 °С.

Абразивний інструмент на бакелітовій зв'язці виготовляють зі звичайного електрокорунду і чорного карбїду кремнію. Для виконання прорізних та відрізних робіт випускають бакелітові тонкі круги з товщиною до десятих часток міліметра.

Бакелітова зв'язка досить стійка до дії охолодних рідин, які містять лужні розчини. Для нормальної роботи круга в охолодній рідині має бути не більше як 1,5 % лужного розчину. Іноді круги на бакелітовій зв'язці покривають сіркою або суриком, лаком чи якою-небудь водонепроникною фарбою.

Гліфталева зв'язка складається з гліцерину та фталієвого ангїдриду. Абразивні інструменти, зокрема шліфувальні круги, на цій зв'язці мають підвищену пружність і застосовуються, як правило, на чистових і довідних операціях.

Вулканітова зв'язка має велику еластичність і високу густину, тому інструменти на її основі можна застосовувати як для грубого попереднього оброблення, так і для полірувальних операцій. Абразивні зерна закріплено у вулканітовій зв'язці слабкіше, ніж в інструментах на керамічній і бакелітовій зв'язках. При підвищенні тиску на оброблювану деталь та нагріванні зерна заглиблюються у зв'язку і ріжуть з меншою глибиною, створюючи чистішу поверхню. Інструменти на вулканітовій зв'язці зумовлюють підвищене виділення теплоти. Невисока теплостійкість каучуку (250–300 °С) приз-

водить до того, що інструмент розм'якшується, каучук набивається в проміжки між абразивними зернами, а це збільшує тертя та виділення теплоти. Тому щільні круги на вулканітовій зв'язці незамінні при безцентровому шліфуванні, як ведучі круги, а також під час виконання прорізних і відрізних робіт.

Алмазні й ельборові (кубонітові) шліфувальні круги виготовляють на органічних (бакелітових), керамічних і металевих зв'язках. Бакелітові зв'язки мають більш низьку міцність порівнян з металевими, що дозволяє кругам на цих зв'язках працювати з більшим ступенем самозаточування, тим самим забезпечуючи сталість їхніх різальних властивостей.

У табл. 7.10 рекомендації з вибору марки алмазів і кубоніту залежно від матеріалу зв'язки.

Таблиця 7.10 – Рекомендації з вибору марки алмазів і кубоніту залежно від матеріалу зв'язки

Зв'язка	Марки алмазів, кубоніту	Зернистість алмазів, кубоніту
Органічна жорстка	Мікропорошки АСМ, АСН, шліфпорошки АС2, АС4, АС6, АС15, АС2МА, АС2М, АС4М, АС4МА, АС6М, АС6МА, АС15М, АС15МА з металевим покриттям; КО, КР, КІС, КРС, КОМУ – зі склопокриттям і металевим покриттям	Мікропорошки 1/0 і крупніше, шліфпорошки алмазу 50/40 і крупніше; шліфпорошки кубоніту 50/40 і крупніше
Органічна еластична (каучукотривальна)	Мікропорошки АСМ; шліфпорошки АС2, АС4	Мікропорошки 1/0 і крупніше, шліфпорошки 50/40 і крупніше
Керамічна	Мікропорошки АСМ, АСН, КМ; шліфпорошки КО, КР, АС4 – АС15	Мікропорошки 3/2 і крупніше; шліфпорошки 50/40 і крупніше
Металева	Мікропорошки АСМ, АСН; шліфпорошки АС6 – АС200	Мікропорошки 14/10 і крупніше; шліфпорошки 50/40 і крупніше
Металева гальванічна	Мікропорошки АСМ, АСН; шліфпорошки АС15 – АС50	Мікропорошки 28/20 і крупніше; шліфпорошки 50/40 і крупніше

Для поліпшення різальної здатності інструментів у зв'язки вводять наповнювачі різного функціонального призначення. Так, сульфіді, графіті і фториди виконують роль твердих зма-

щень. Наявність у різальному шарі таких речовин сприяє зменшенню коефіцієнта тертя в зоні контакту, а отже, і зниженню теплонапруженості у системі різання. Для зниження пластичності в матрицю на основі системи «мідь-олово» вводиться деяка кількість крихких і твердих добавок – диборидів, оксидів та інших сполук. Об'ємна частка наповнювача залежно від матеріалу зв'язки становить 3–20%.

Металеві зв'язки, що складаються з металевої основи (пошків міді, олова, алюмінію та ін.) і наповнювача, використовують в абразивних інструментах з надтвердих матеріалів, частіше за все, алмазних.

Металеві зв'язки МІ та МК виготовляються на мідній основі з наповнювачем з карбїду кремнію та електрокорунду. Зв'язка М5 виготовляється на основі алюмінію та міді, а зв'язка М1 – на основі міді й олова. Металеві зв'язки міцніше утримують зерна і забезпечують ефективніше використання різальних властивостей алмазів, ніж органічні зв'язки.

7.7. Структура абразивних інструментів

Під структурою абразивного інструменту розуміють співвідношення об'ємів зерен, зв'язки та пор (див. рис. 7.1). Загалом структура абразивного інструменту характеризує об'ємний вміст зерен (V_z), зв'язки ($V_{зв}$) з наповнювачем (V_n) та пор (V_p) у шліфувальному інструменті (рис. 7.10) і позначається номерами від 0 до 12. Потрібно звернути увагу на те, що фазові склади для різних абразивних інструментів можуть істотно відрізнятися. Зі збільшенням номера структури число зерен в абразивному інструменті зменшується, а об'єм зв'язки – збільшується.

Розрізняють чотири групи структур абразивних інструментів: № 0–3 – щільні; № 4–6 – середньощільні щільні; № 7–12 – відкриті; № 13–18 – високопористі.

Нульова структура має мінімальну відстань між зернами і найбільший їх об'єм ($Q=62\%$). При збільшенні номера структури на одиницю об'єм абразивних зерен зменшується на 2%.

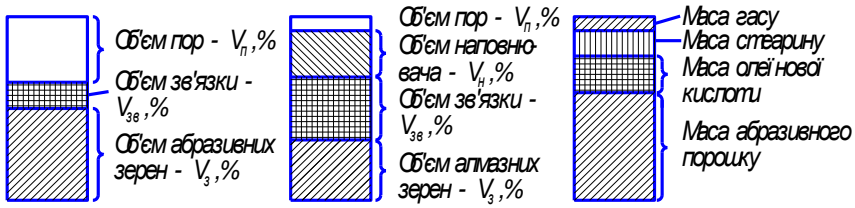


Рисунок 7.10 – Фазовий склад абразивних інструментів і паст: а – інструменти зі звичайних абразивів; б – інструменти з НТМ; в – довідна паста

Абразивні інструменти структур 0–3 (рис. 7.11 а, д) мають дуже щільне розташування зерен з малими проміжками між ними й малими порами. Такі інструменти доцільно використовувати для робіт, що вимагають високої точності профілю абразивного інструменту (профільне шліфування, прорізування точних пазів і ін.), і для зниження шорсткості поверхні.

Абразивні інструменти 5–8-ї структур (рис. 7.11 б) мають середнє співвідношення об'ємів зерен і зв'язки, застосовуються для всіх видів робіт, забезпечують більшу інтенсивність знімання й мають достатній період стійкості. Для круглого зовнішнього й безцентрового шліфування рекомендуються круги 5–6-ї структур, а для плоского шліфування периферією круга й внутрішнього шліфування – круги 7–8-ї структур, для відрізування рекомендуються круги 8–9-ї структур.

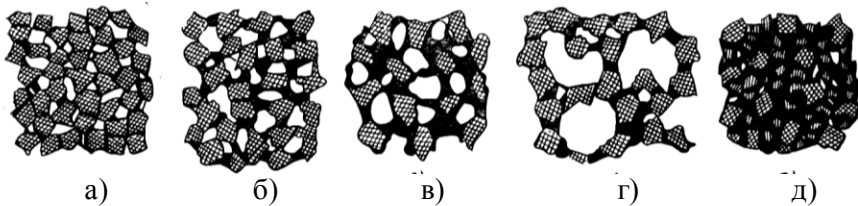


Рисунок 7.11 – Відносне розташування абразивних зерен, зв'язки, наповнювача й пор у кругах різної структури при сталій пористості ($V_{п} = 36\%$) і твердості С2:

а) структура 3 ($V_3 = 56\%$, $V_{зв} = 8\%$); б) структура 8 ($V_3 = 46\%$, $V_{зв} = 18\%$); в) структура 16 ($V_3 = 30\%$, $V_{зв} = 34\%$); г) те саме, з вигорілим наповнювачем ($V_{п} = 30\%$, $V_{зв} = 34\%$); д) із дрібнозернистим наповнювачем при малій пористості ($V_3 = 25\%$, $V_{зв} = 45\%$, $V_{п} = 25\%$, $V_{п} = 5\%$)

Абразивні інструменти з відкритою структурою (9–12) мають найменший об'ємний вміст зерен, що збільшує відстань між сусідніми абразивними зернами й забезпечує більші розміри пор. Робота такими інструментами поліпшує умови відведення стружки, охолодження круга й заготовки, зменшує «засалювання» інструменту, що дозволяє працювати такими кругами на підвищених режимах і запобігає появі дефектів на шліфованих поверхнях. Однак інструменти з відкритою структурою мають меншу міцність. Інструменти з відкритою структурою рекомендується застосовувати: при обробці м'яких і в'язких матеріалів; при шліфуванні дрібнозернистими абразивами; для попереднього шліфування інструментів зі сталей погіршеної шліфованості; при великій площі контакту круга із заготовкою.

Останнім часом у машинобудівній галузі все більше починають використовуватися високопористі круги, у яких розмір пор становить 2–3 мм. Високопористі шліфувальні круги (рис. 7.11 в, г) краще охолоджуються під час роботи, оскільки швидкість руху повітря в зоні різання на 25–35% вища від швидкості обертання звичайного круга, що дає змогу працювати з більшою глибиною різання та меншою небезпекою припикання оброблюваної поверхні. Наявність великих пор і підвищена швидкість повітряного струменя створюють кращі умови для видалення стружки, зменшуючи можливість застрягання її в порах, тобто «засалювання». Пори створюються при виготовленні абразивного інструменту внаслідок вигорання наповнювачів (вугілля, деревного борошна, пластмас) під час термічного оброблення. Об'ємна маса високопористих абразивних інструментів значно менша, ніж маса звичайних, і потребує меншої витрати енергії на обертання. При обробленні м'яких та в'язких матеріалів (алюмінію, міді, пластмас, гуми, дерева тощо) робоча поверхня високопористого круга довше залишається працездатною і рідше потребує правки. Тому їх питоме спрацювання в 1,5 раза менше від питомого спрацювання звичайних кругів.

Зернистість високопористих кругів вибирається на один – три номери меншою, ніж рекомендована зернистість для звичайних кругів.

Загалом вибір структури абразивних інструментів залежить від їх призначення, властивостей оброблюваного матеріалу та інших умов оброблення. Інструменти зі щільною структурою, як правило, застосовуються для виконання довідних робіт, а також тоді, коли необхідно довше зберегти профіль інструменту. Відкриті та високопористі круги застосовуються при обробленні металів, у яких можуть виникати припікання. На практиці найчастіше використовуються абразивні інструменти зі структурою середньої щільності.

Примітка. Якщо об'ємний вміст абразивної фази для інструментів зі звичайних абразивів прийнято характеризувати номером структури, то для абразивних інструментів з НТМ – концентрацією зерен.

7.8. Концентрація алмазних або ельборових абразивних інструментів

Концентрація алмазних або ельборових інструментів характеризує об'ємний вміст у них алмазних або ельборових зерен. За 100% концентрацію прийнятий вміст 4,4 кар (0,88 г) в 1 см^3 робочого шару, що становить 25% об'єму незалежно від виду зв'язки. В абразивних інструментах з надтвердих матеріалів максимальною прийнята 200% концентрація. Концентрація алмазного й ельборового абразивного інструменту визначає його різальні властивості, питому витрату алмазів або ельбору й вибирається залежно від виконуваної операції. Зі збільшенням концентрації підвищуються різальна здатність і період стійкості кругів на органічних зв'язках, тому для остаточного шліфування й доведення рекомендують круги 100% 150% концентрації, а для профільного шліфування – круги 150% і 200% концентрації. Для попереднього шліфування й заточення твердосплавного інструменту рекомендується застосовувати круги на металевій зв'язці зі 100% або 150% концентрацією; для шліфування стружколомних канавок і лунок, різшліфування та заточування твердосплавних мігчиків і дрібномодульних фрез та профільного шліфування застосовують, як правило, круги зі 150% концентрацією алмазів.

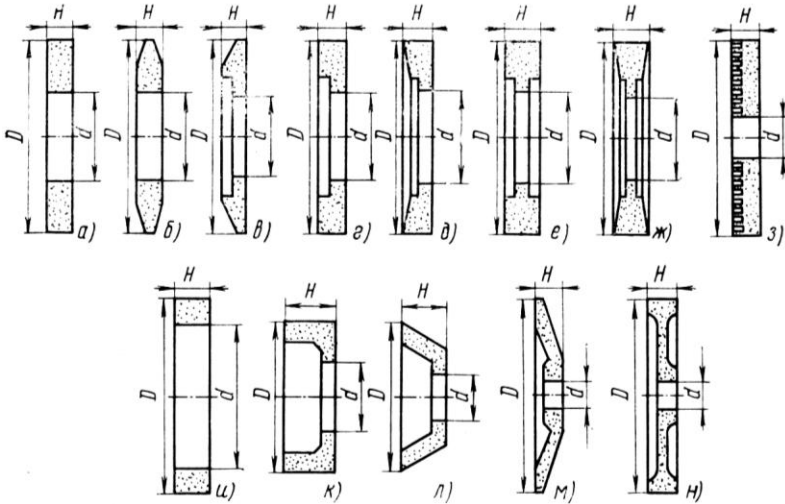


Рисунок 7.12 – Форми перетинів (профілі) абразивних шліфувальних кругів: а) ПП – прямого профілю; б) 2П – з двобічним конічним профілем; в) 3П – з конічним профілем; г) ПВ – з виточкою; д) ПВК – з конічною виточкою; е) ПВД – з двобічною виточкою; ж) ПВДК – з двобічною конічною виточкою; з) спеціальні ПР; і) К – кільцеві; к) ЧЦ – чашки циліндричні; л) ЧК – чашки конічні; м) Т (1Т) – тарілчасті; н) С – спеціальні

7.9. Форми і розміри абразивних інструментів

Цільні та збірні інструменти для абразивного оброблення залежно від форми поділяються на чотири групи: шліфувальні круги, головки, сегменти, бруски. Промисловість випускає 736 стандартних типорозмірів абразивних інструментів. Наприклад, стандартом ГОСТ2424–75 передбачено випуск 22 форм абразивних шліфувальних кругів (діаметром від 3 до 1060 мм) 14 типів (рис. 7.12).

Позначення форм шліфувальних кругів з НТМ регламентується стандартом ISO 6104 – 79 залежною від форми і модифікації корпусу, а також форми і розташування НТМ – утримувального шару (див. додаток Е; слайди 1 та 2). Наприклад, ельборові (кубанігові) та алмазні круги виготовляються таких типів: 1А1, 1А2 – плоскі прямого профілю; 1Е1, 1Е6Q, 1Д1 – плоскі з

двобічним конічним профілем; 1Q1, 1R1 – плоскі з однобічним конічним профілем та ін. (див. додаток Е, слайд 3)

Інструменти з традиційних абразивних матеріалів виготовляються у своїй переважній більшості цільними так званими методами порошкової металургії, тобто пресуванням і відповідним темічним обробленням, у той час як абразивні інструменти з НТМ виготовляються збірними (складеними).

7.10. Особливості виготовлення алмазо- та кубонітоабразивних інструментів

Алмазний або кубонітовий абразивний інструмент (рис. 7.13) має ряд конструктивних особливостей, що обумовлюють його переваги. Основна з них – наявність корпусу 1

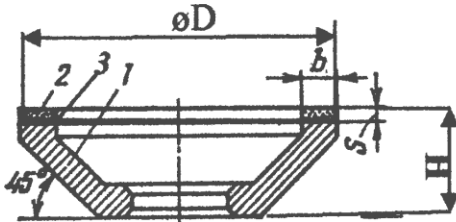


Рисунок 7.13 - Абразивний інструмент з НТМ

з алюмінієвого сплаву АК6 або Д16, сталі, пластмаси, кераміки, тканини) і робочого шару 2 з НТМ, що може бути суцільним, переривчастим і багатошаровим з різними зернистістю й концентрацією алмазів. Крім того, можливість виготовлення збірного інструменту, у яко-

го елементи з НТМ з'єднані з корпусом, а також зміни складу, структури, співвідношення м'яких і твердих фаз і фізико-механічних властивостей зв'язок, чим забезпечуються рівна міцність утримання зерна, висока працездатність інструменту в конкретних умовах обробки й рельєф різальної поверхні, можливість виготовлення профільного інструменту.

Наявність корпусу є основною ознакою, що відрізняє інструмент з НТМ від звичайного абразивного (див. рис. 7.12). Така конструкція інструменту дозволяє використовувати шар з НТМ до повного зношування, у той час як використання, наприклад, шліфувальних кругів із SiC , Al_2O_3 та інших становить не

більше 65–70%, тому що та частина інструменту, що затиснута в оправці, не використовується.

Нарешті, досить важливою особливістю й перевагою інструменту з НТМ є те, що його робочий шар можна нарощувати методами гальваностегії й виготовляти прокаткою.

Алмазо- і КНБ-утримувальні шари міцно з'єднуються з корпусом інструменту шляхом склеювання, паяння, дифузійного зварювання. Тому між металевим корпусом та абразивоутримувальним шаром може бути і відносно тонкий проміжний шар 3 (див. рис. 7.13).

Абразивні круги з НТМ характеризуються (рис. 7.14):

- видом (шліфувальні, полірувальні, відрізні, правлячі та ін.);
- структурними елементами (корпус, абразивоутримувальний шар з НТМ і проміжний шар);
- конструктивними характеристиками (форма перетину круга, форми посадкової і приєднувальної поверхонь, взаємне розташування і спосіб з'єднання складових елементів, розміри круга D , H та складових елементів b , S (див. рис. 7.13).

З використанням кубоніго- та алмазоутримувальних композиційних матеріалів випускається широка гама абразивних інструментів із НТМ різних форм і розмірів, на різних зв'язках. Марки надтвердих матеріалів і галузі їх використання залежно

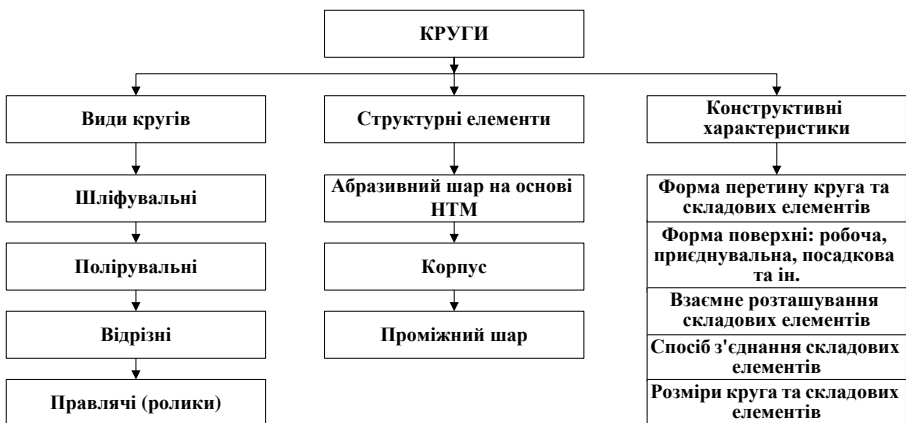


Рисунок 7.14 – Структура та конструктивні характеристики абразивних кругів з НТМ

від оброблюваного матеріалу, виконуваної операції та зв'язки круга наведені у ДСТУ 3292-95.

У кубоніто- та алмазно-абразивних інструментах робоча частина (абразивний шар на основі НТМ) складається із зерен алмазного або кубонітового порошку, які розподілені й міцно закріплені в суцільній або пористій матриці (зв'язці). Для виготовлення таких інструментів використовують в основному шліф- і мікропорошки синтетичних алмазів та кубоніту.

Алмазо- або кубонітоутримувальний шар можна розглядати як композиційний матеріал, що становить собою двофазну матричну систему, у якій один з компонентів є безперервною фазою (зв'язка), другий (зерна алмазів або кубоніта), – рівномірно розподілений у ній у вигляді включень. Основною проблемою під час розроблення таких шарів є забезпечення міцного закріплення часток твердої фази в матриці (зв'язці) і в той же час максимальне збереження її хімічної індивідуальності під час виготовлення й експлуатації.

Абразивоутримувальний шар із НТМ залежно від виду призначення і конструкції круга характеризується формами перетину і робочої поверхні, розмірами і конструкцією, показниками НТМ, основними показниками якості (рис. 7.15)

Під час розроблення абразивних композицій із НТМ прагнуть до того, щоб інструменти, виготовлені на їхній основі, працювали в режимі самозаточування. При цьому в міру зношування круга й притуплення зерен з НТМ зношується зв'язка й оголюються нові зерна. Якщо зв'язка зношується повільніше абразивних зерен – інструмент втрачає різальні властивості (засалюється), якщо швидше – відбувається інтенсивне зношування алмазо- або кубонітоутримувального шару.

Одним з важливих компонентів зв'язки є наповнювач, що підвищує стійкість, поліпшує різальні властивості абразивного інструменту, визначає фізико-механічні, теплофізичні й інші властивості кубоніто- або алмазозносного шарів. Як наповнювачів використовують абразивні й металеві порошки, органічні речовини, наприклад карбіди бору, кремнію, бориди, графіт, тальк та ін. Вид і структура зв'язки, поряд з концентрацією, мар-

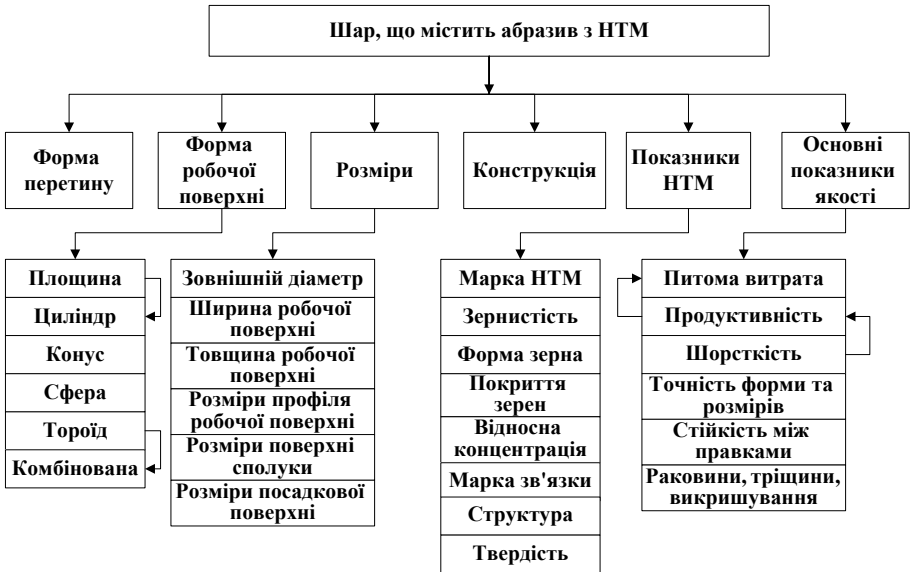


Рисунок 7.15 – Конструктивні та функціональні характеристики абразивоутримувального шару кругів із НТМ

кою й зернистістю алмазного й кубонітового порошоків, є основними характеристиками, що визначають працездатність і ефективність кубоніто- та алмазного абразивних інструментів. Тому до неї ставиться цілий ряд вимог. Зв'язка повинна:

- володіти гарною змочуваністю відносно НТМ;
- міцно втримувати абразивні зерна;
- забезпечувати самозаточування, тобто в міру затуплення абразивних зерен повинна зношуватися, сприяючи випаданню зерен, що затупилися, і розкриттю різальних граней нових зерен;
- мати достатні й гарні термостійкість і теплопровідність;
- у парі з оброблюваним матеріалом мати мінімальний коефіцієнт тертя;
- мати коефіцієнт лінійного розширення, що наближається до коефіцієнту лінійного розширення алмазу або кубоніту;
- не вступати в хімічну взаємодію з оброблюваним матеріалом і охолодною рідиною.

Рекомендації з вибору марок алмазів і кубоніту залежно від матеріалу зв'язки подані у табл. 7.11.

Таблиця 7.11 – Рекомендації з вибору марки алмазів і кубоніту залежно від матеріалу зв'язки

Зв'язка	Марка алмазів, кубоніту	Зернистість алмазів
Органічна жорстка	Мікропорошки АСМ, АСН, шліфпорошки АС2, АС4, АС6, АС15, АС2МА, АС2М, АС4М, АС4МА, АС6МА, АС15М, АС15МА з металевим покриттям; КО, КР, КІС, КРС, КОМУ – зі скло- і металевим покриттям	Мікропорошки 1/0 і крупніше, шліфпорошки 50/40 і крупніше; шліфпорошки кубоніту 50/40 і крупніше
Органічна каучукоутримувальна	Мікропорошки АСМ; шліфпорошки АС2, АС4	Мікропорошки 1/0 і крупніше, шліфпорошки 50/40 і крупніше
Керамічна	Мікропорошки АСМ, АСН, КМ; шліфпорошки КО, КР, АС4, АС6, АС15	Мікропорошки 2/3 і крупніше; шліфпорошки 50/40 і крупніше
Металева	Мікропорошки АСМ, АСН; шліфпорошки АС6, АС15 - АС200	Мікропорошки 14/10 і крупніше; шліфпорошки 50/40 і крупніше
Металева гальванічна	Мікропорошки АСМ, АСН; шліфпорошки АС15, АС20, АС32, АС50	Мікропорошки 28/20 і крупніше; шліфпорошки 50/40 і крупніше

Типові технології виготовлення абразивних інструментів з НТМ на органічних жорстких, органічних еластичних та металевих зв'язках методами порошкової металургії наведені на рис. 7.16 - 7.18 відповідно.

У цей час як в Україні, так і за кордоном випускається багато алмазних інструментів на різних *органічних жорстких* (полімерних) зв'язках (до 70% від загального споживання абразивних інструментів з НТМ), що відрізняються між собою зв'язувальним, наповнювачем, співвідношенням компонентів і т. д. Це викликано тим, що виготовляються інструменти різних форм і розмірів, які призначені для обробки матеріалів з різними фізи-

ко-механічними властивостями у машино-, верстато-, судно- і авіабудуванні, деревообробній, паперовій, металургійній та інших галузях промисловості.

Тому для кожного оброблюваного матеріалу й виду обробки вибирають абразивний інструмент, виготовлений з НТМ-утримувального композиційного матеріалу на полімерній (органічній) зв'язці оптимального складу.

Найбільш відповідальною операцією технологічного процесу виготовлення кругів з НТМ на органічній зв'язці (рис. 7.16) є гаряче пресування шару з НТМ на корпусі у пресформах закритого типу, що здійснюють на гідравлічних пресах з підігрівними плитами. Технологічні режими пресування – тиск, температура нагрівання й час екзотермічної витримки – встановлюють залежно від хімічного складу полімерутримувального композиту з НТМ. Наприклад, якщо виготовляють інструмент на фенолформальдегідному зв'язувальному, то тиск пресування – 5000 Н/см^2 , температура нагрівання – $180 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, час витримки – 20 хв.



Рисуюнок 7.16 – Технологічна схема виготовлення кругів з НТМ на жорсткій органічній зв'язці

У промисловості створені та широко використовуються *еластичні інструменти* із НТМ на основі вулканізованого каучуку, тобто на *еластичних зв'язках*.

Технологічна схема виготовлення інструменту на еластичній зв'язці наведена на рис. 7.17.

Основні види еластичного інструменту з НТМ, широко використовуюваного в промисловості:

- полірувальні стрічки – для полірування сталевих, чавунних деталей;
- еластичні диски – для приготування найрізноманітніших металло- і мінералографічних шліфів, полірування каменів – самоцвітів, оздоблювального каменю;
- хонінгувальні блок-бруски – для хонінгування отворів у

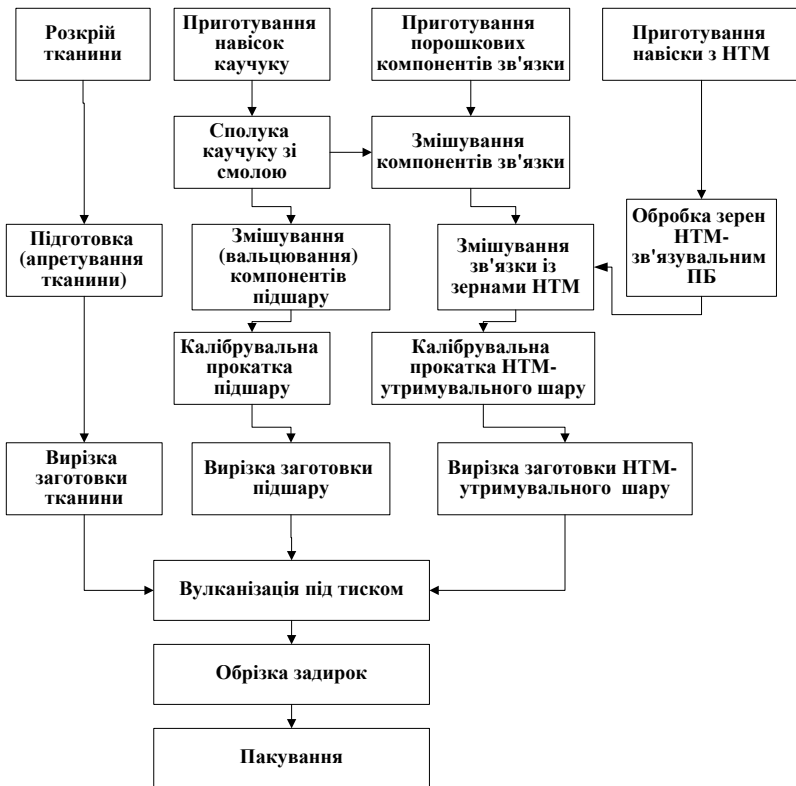


Рисунок 7.17 – Технологічна схема виготовлення інструментів із НТМ на еластичній зв'язці

сталевих і чавунних деталях;

- термопластичні полірувальні стрічки – для полірування й віброполірування складнопрофільних деталей із залізовуглецевих, титанових, жароміцних сплавів і інших матеріалів.

Особливістю еластичних зв'язок, на відміну від відомих вулканігових, є застосування каучуку, з'єднаного з полівинилхлоридною смолою, наприклад, бакелігом, і фенолформальдегідним зв'язуючим. Для виготовлення каучукоутримувальної зв'язки використовують суміші синтетичного бугадиен-нитрильного каучуку, з полівинилхлоридною смолою, з добавками вулканізуючих агентів (10–15 % сірки), наповнювачів, прискорювачів вулканізації й зм'ягшувателів. Отримані на такій основі матеріали залишаються достатньо еластичними, перевершуючи чистий каучук по міцності. У тих випадках, коли кількість сірки становить 30–40 %, одержують тверді ебонітові або напівебонітові зв'язки.

Абразивні інструменти з алмазів і КНБ на *керамічних зв'язках* ефективно використовуються в промисловості на різних операціях обробки металевих і неметалевих виробів. Цей вид абразивного інструменту розглядається як один з перспективних у виробництві різних виробів на операціях внутрішнього, зовнішнього, плоского й врізного шліфування та хонінгування. Темпи застосування інструментів на керамічних зв'язках в останні роки збільшуються.

Шліфувальні інструменти на керамічних зв'язках легко правляться, є можливість регулювання їхньої пористості. При роботі ці абразивні інструменти забезпечують менші сили різання при рівній продуктивності в порівнянні з інструментами на інших видах зв'язках. Завдяки ряду властивостей (висока зносостійкість, низький коефіцієнт тертя, висока теплостійкість і ін.) керамічні зв'язки є перспективними на ряді операцій чорнової й фінішної обробки матеріалів. Основою більшості керамічних зв'язок є скла різного хімічного складу, від властивостей яких у значній мірі залежать властивості абразивного інструменту. Склооснова зв'язки повинна мати високу змочувальну здатність стосовно НТМ і наповнювачів. Адгезійна активність стеклооснови до

НТМ повинна забезпечувати високу міцність утримання їх у матриці інструменту. Однією з основних умов є мінімальна різниця в температурних коефіцієнтах лінійного розширення матеріалів, що входять у композит зв'язки.

Різальний шар інструментів на керамічних зв'язках являє собою композиційний матеріал, до складу якого входить НТМ, скло й наповнювачі. Основне завдання при розробці таких матеріалів – забезпечити міцне закріплення часток абразиву в матриці, створити умови максимально можливої фізичної й хімічної сумісності компонентів матеріалу, а також збереження властивостей склооснови, абразиву й наповнювачів в умовах виготовлення й експлуатації інструментів.

Для зменшення взаємодії матриці з наповнювачем використовують низькотемпературні й високошвидкісні технології виготовлення інструментів.

Інструменти на керамічних зв'язках зі *звичайних абразивів* одержують пресуванням і спіканням при температурах 1000–1250 °С без захисного середовища або вакууму. У якості основи зв'язок використовують глини, польові шпати, перліги з добавками тальку, кварцового борошна й інших кремнійутримувальних матеріалів.

Вказані температури не можуть бути застосовані для виготовлення інструментів з алмазів, тому що їхня теплостійкість значно нижче й залежно від зернистості НТМ її нижня границя знаходиться на рівні 700–800 °С. Для інструментів з алмазів розроблені склокомпозити на основі натрійборосилікатного скла ($\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$), що включають у себе як інертні, так і хімічно активні добавки. Інструменти на таких зв'язках мають пористість 20–40% і виготовляються методом вільного спікання при температурах 700–800 °С.

Для інструмента із КНБ розроблені композиційні матеріали зв'язок на основі боросилікатних стекол з литійутримувальними наповнювачами. Так, наприклад, зв'язки марки С10 складаються з боросилікатного скла, сподумену й кріоліту. До складу зв'язок на основі такого скла можуть входити літій, сурик, баделей і піролюзит, а також тальк, бетт-сподумен і кріоліт. Ін-

струмент на таких зв'язках спікається при температурах 1050–1150 °С.

Знайшли застосування низькотемпературні зв'язки для інструментів з алмазів і КНБ на основі свинецьотримувальних стекел у системах $\text{PbO-ZnO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, PbO-ZnO-SiO_2 , $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, $\text{PbO-B}_2\text{O}_3$ і PbO-SiO_2 . Залежно від призначення зв'язки в такі стекла вводять легкоплавкі метали (олово, свинець, цинк, кадмій) з масовою 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%). Відоме застосування зв'язок на основі суміші свинецьотримувального композиту (59–82%) і боросилікатного скла (2–11%) із графітом (11–31%). У таких зв'язках металеві наповнювачі дозволяють збільшити теплопровідність, зносостійкість та ударну міцність отриманих на їхній основі алмазотримувальних композитів. Для зниження коефіцієнта тертя таких зв'язок по оброблюваному матеріалу до їх складу вводять тверді змащувальні елементи (гексагональний нітрид бору, графіт, дисульфід молібдену й ін.).

Залежно від призначення інструментів з НТМ і необхідних властивостей застосовують різні технології їх виготовлення. Використовується традиційна керамічна технологія, що полягає у випалі брикету робочого шару інструмента у вільному стані. Ця технологія чутлива до зміни параметрів пресування й випалу. Вона не виключає розкиду властивостей зв'язки й порушення розмірів і форми інструменту.

Використовують також метод термопластичного формування. Для виготовлення виробів за цим методом необхідні пресформи, у яких здійснюють брикетування й спікання. До переваг цього методу можна віднести можливість одержання робочого шару інструмента з точно заданими формами і розмірами. Матеріал зв'язки в момент гарячої допресування звичайно перебуває у в'язкотекучому стані. Це дозволяє впливати на фізико-механічні властивості матеріалу (підвищити міцність, створити певну пористість і т.д.). Метод дозволяє домогтися стабільних

властивостей матеріалу за рахунок створення сприятливих умов перебігу процесів в об'ємі матеріалу (більш рівномірне прогрівання, відсутність прямого випромінювання й ін.). Порівняно з технологією випалу у вільному стані час виготовлення виробів на операції спікання знижується до 10 разів, а весь цикл від завантаження до вивантаження виробу з печі до 20 разів. При виборі технології виготовлення абразивного інструменту на керамічній зв'язці потрібно мати на увазі, що якість інструмента залежить як від матеріалу зв'язки, так і від тих операцій, які складають цю технологію (змішування, засипання й розрівнювання, брикетування, термооброблення тощо).

Для обробки неметалевих і металевих матеріалів застосовують абразивні інструменти (шліфувальні й відрізні кола, хонінгувальні й суперфінішні бруски та ін.) на *металевих зв'язках*, одержуваних *методами порошкової металургії*. Для цих зв'язок використовують металеві композиції на основі заліза, міді, олова, алюмінію, нікелю, кобальту й ін., які є багатокомпонентними і, як правило, містять один - три метали. Найбільше поширення одержали мідно-олов'яні й мідно-алюмінієві композиції. Зв'язки на основі системи «мідь-алюміній» відрізняються більш низькою температурою плавлення, ніж зв'язки на основі системи «мідь-олово». Для виготовлення металевих зв'язок використовуються металеві порошки з розміром зерен основної фракції менше 100 мкм. Порошки повинні бути не окислені й мати розвинену поверхню. Для поліпшення різальної здатності інструментів у зв'язки вводять наповнювачі різного функціонального призначення, що поліпшують антифрикційні й корозійні властивості та міцність. Так, у зв'язки вводять сульфіди, графіт, фториди, які виконують роль твердих змащень. Наявність у різальному шарі таких речовин сприяє зменшенню коефіцієнта тертя в зоні контакту, а, отже і зниженню теплонапруження процесу абразивної обробки. Для зниження пластичності в матрицю на основі системи «мідь-олово» вводять деяку кількість хрупких і твердих добавок – дибориди, оксиди й інші сполуки. Кількість наповнювача залежно від матеріалу зв'язувального становить 3–20% (за

об'ємом). Розподіл наповнювача в робочому шарі інструмента є стохастичним.

Металеві зв'язки позначаються індексом «М» і цифрами: перша характеризує групу зв'язки, друга – порядковий номер складу в цієї групі. До першої групи належать зв'язки переважно на основі алюмінію, наприклад М1-01; до другого – універсальні зв'язки широкого призначення на основі системи мідь-олово, наприклад М2-09; до третьої групи - зв'язки, використовувані для виготовлення інструментів методом прокату й вакуумної технології. Четверта група поєднує зв'язки, що виготовляються методом гальваностегії з одношаровим розташуванням алмазів. До п'ятої групи відносять зв'язки для хонінгування, притирання, доведення, суперфінішування, до шостої – зв'язки для інструментів для обробки каменю, будівельних матеріалів, гірських порід.

Алмазні й кубонітові зерна в металевій зв'язці можна закріплювати різними методами, але промислове значення мають два методи: порошкової металургії й електрохімічного осадження, причому в загальному об'ємі випуску переважають інструменти, виготовлені методами порошкової металургії.

Технологія виготовлення абразивного інструменту із НТМ методом порошкової металургії наведена на рис. 7.18. Суть методу порошкової металургії полягає в тому, що суміш металевих порошоків з іншими компонентами піддають ущільненню й подальшій термічній обробці (спіканню) при температурі нижче температури плавлення хоча б одного з компонентів.

У результаті процесів дифузії та оплавлення легкоплавких компонентів з утворенням розчинів спресоване тіло після термічної обробки й подальшого поступового охолодження отримує високі міцність і електропровідність. Використання металевих порошоків дозволяє одержувати за допомогою пресформи заготовки абразивного шару, точні за формою й розмірами, що зводить до мінімуму обсяг механічної обробки важкооброблюваного шару з НТМ-утримувальних композитів. Потрібно врахувати також, що при використанні у якості компоненти шихти зв'язки металевих порошоків легко забезпечити рівномір-

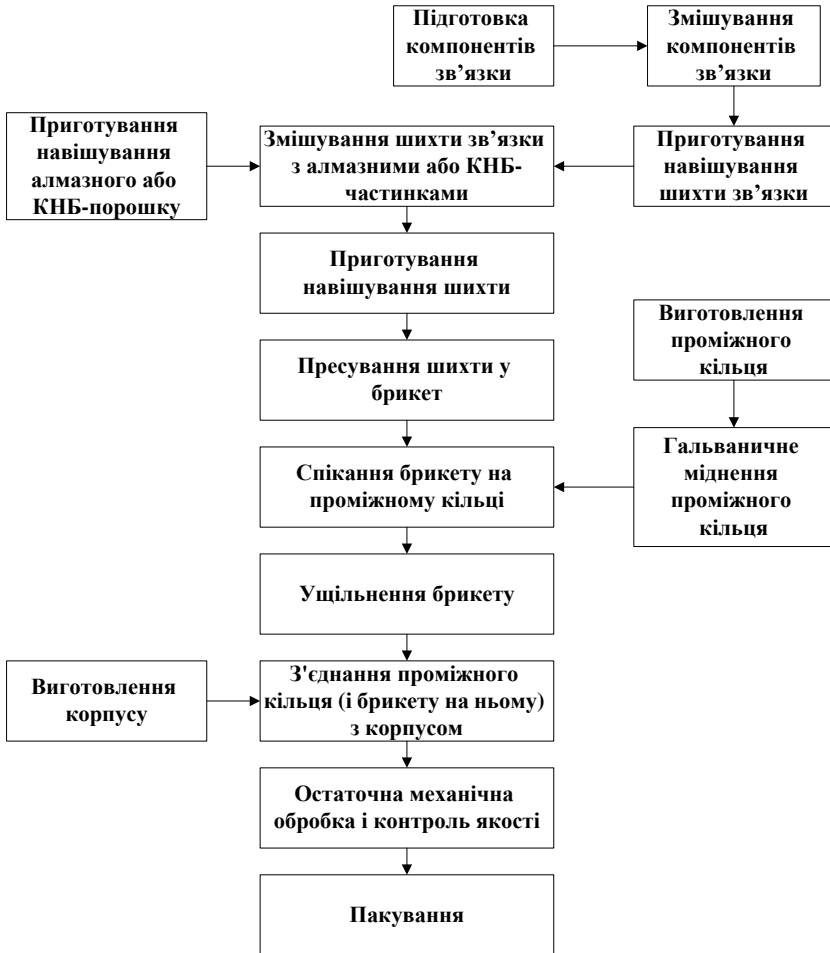


Рисунок 7.18 – Технологічна схема виготовлення інструментів із НТМ на металевій зв'язці методами порошкової металургії

ний розподіл зерен кубоніту й алмазів по всьому об'єму формованого шару.

Технологія виготовлення алмазних інструментів на металевій зв'язці методом порошкової металургії передбачає такі основні операції: змішування шихти, пресування, спікання й гаряче допресування композиції у пресформі. Після цього проводять остаточну обробку й розкриття робочого шару інструменту.

При виготовленні інструментів з об'ємним розподілом алмазів або кубоніту їх вміст задають умовною відносною концентрацією. Відносна концентрація кубоніту й алмазів в абразивоутримувальному шарі не перевищує 200%. Після засипання шихти в пресформу встановлюють пуансон і потім на гідравлічному пресі проводять пресування із заданим тиском, що, наприклад, для зв'язок на основі Cu-Al становить 200–300 МПа. При такому тиску забезпечується міцність брикету, необхідна для його укладання в пресформу для подальшого спікання й ущільнення. Температура спікання становить $0,8T_{пл}$ основного компонента.

У результаті спікання суміші з мідного й олов'янистого порошоків при температурі 800 °С із витримкою 0,5–1 ч і подальшим допресуванням при 100 МПа в композиції відбуваються складні структурні зміни. Олово розчиняється в міді, відбувається гомогенізація сплаву, й внаслідок гарячого допресування одержують безпористу структуру. При цьому, як показали дослідження, у композиції утворюються високоміцна й пластична α -фаза, більш крихка δ -фаза й евтектоїдні включення. Високотемпературні наповнювачі, введені в композиції, практично не змінюють структуру й знаходяться у зв'язці у вигляді включень. Низькотемпературні наповнювачі (скло й ін.) розташовуються по межах зерен.

Зв'язки на основі системи «мідь-алюміній» відрізняються низькою температурою плавлення. Температура спікання цих зв'язок на 200–250°С нижча, ніж на основі системи «мідь-олово». При спіканні відбувається інтенсивна взаємодія алюмінію з міддю з утворенням інтерметалідів такого складу: Cu_9Al_4 , $CuAl_2$, $CuAl$.

Металева гальванічна зв'язка виготовляється методом електрохімії, тобто алмазно (кубоніто) - гальванічний шар (покриття) утворюється в процесі електрохімічного осадження металу (рис. 7.19) з одночасним включенням в осад алмазних зерен, що перебувають у контакті з катодом, яким є деталь (проміжне кільце), на яку наноситься абразивоутримувальний шар. Контакт порошку 4 з НТМ з поверхнею катода 3 здійснюють

декількома способами. Наприклад, алмазний порошок перебуває у ванні 5 у спеціальному пристрої (пориста перегородка 1 та шар ізоляції 2), що перешкоджає поширенню його по всьому об'єму електроліту 6, але, разом з тим, не перешкоджає проникненню електроліту у білякатодний простір.

Як прикріплювальний метал, як правило, використовують нікель, який є складовою електроліту як нікельутримувальних (сіркокислий або хлористий

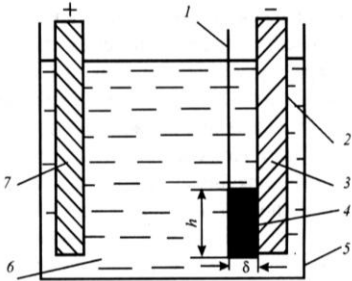


Рисунок 7.19 – Схема отримання НТМ – утримуючих гальванічних зв'язок

нікель) добавка. Деталь (проміжне кільце), на яку наноситься порошок НТМ, поміщають у товщу цього порошку та підключаються до негативного полюса джерела струму. Порошок НТМ знаходиться на дні ванни й перемішується після занурення деталі 3 в електроліт, при цьому осідаючий порошок НТМ, що осідає, покриває поверхню деталі, після

чого за спеціальною технологією виконують остаточне закріплення зерен НТМ. Таким чином, процес утворення електроутримувального шару складається із двох основних етапів: прикріплення й остаточного закріплення порошку НТМ на проміжному кільці.

Оптимальна величина гальванічного шару закріплення порошків з НТМ або, інакше кажучи, товщина нікелегальванічної зв'язки h , що забезпечує надійне з'єднання зерен НТМ з металевою основою інструмента (проміжним кільцем) й міцне утримання їх до максимально можливого зношування, становить $h = (0,3 - 0,5)d$, де d – середній розмір зерна основної фракції (рис. 7.20).

З огляду на унікальні фізико-хімічні властивості алмазів і кубоніту (ельбору), насамперед їхню високу зносостійкість, що у сотні разів переважає зносостійкість абразивних зерен з електрокорунду та карбиду кремнію, розміщення шліфпорошків син-

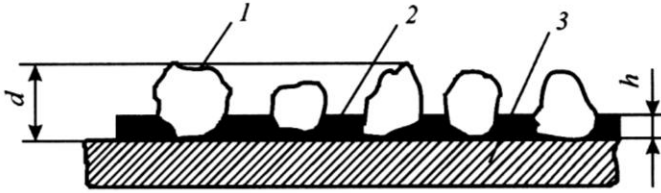


Рисунок 7.20 – Фрагмент НТМ-утримувального шару, виготовленого гальванічним методом:

- 1 – алмазне (кубонігове) зерно; 2 – гальванічна зв'язка;
3 – металева основа (проміжне кільце)

тетичних алмазів або кубаніту (ельбору) на робочій поверхні абразивного, наприклад, калібрувально-шліфувального, інструменту може здійснюватися способом гальваностегії і в один шар.

7.11. Пасти та суспензії з порошків НТМ

Для фінішної обробки (доведення й полірування) деталей зі сталей, сплавів і неметалевих матеріалів широко застосовуються пасти й суспензії з надтвердих матеріалів (НТМ). Це складні багатокомпонентні структуровані системи з порошків природних і синтетичних алмазів і кубічного нітриду бору (КНБ) та основи – композиційної зв'язки.

Як абразивні складові паст із НТМ використовують шліфпорошки із синтетичних алмазів (АС) марок АС2, АС4, АС6 зернистістю від 125/100 до 50/40, мікропорошки марок АМ, АН, АСМ, АСН й ін. зернистістю від 60/40 до 1/0, субмікропорошки марок АСМ1, АСМ5 зернистістю 1/0,5, 0,7/0,3, 0,5/0, 0,3/0, 0,1/0, мікропорошки з кубоніту (КМ) зернистістю від 60/40 до 1/0. Суспензії виготовляються з алмазних і кубонігових мікропорошків зернистістю від 10/7 до 1/0 та субмікропорошків.

За основу використовують такі речовини, як мінеральні масла, поверхнево-активні речовини (ПАР) (суміші складних ефірів, одно- і багатоатомних спиртів; високомолекулярні жирні кислоти і полімерні сполуки), структуроутворювачі (воски, стерарини, парафін), мастильні матеріали, присадки й ін.

Усі складові, що містяться у пастах та суспензіях, обумовлюють дію багатьох процесів при фінішній обробці з їх використанням (рис. 7.21):

- антистатична дія (зниження статичної електроізоляції полімерів);
- інгібування корозії (гальмування (стримування) деяких хімічних процесів, у першу чергу процесів окислювання);
- змочування та гідрофобізація (зменшення гігроскопічності (водопоглинення та водопропроникності) оброблюваної поверхні);
- диспергуюча дія (тонке здрібнювання твердих тіл та рідини);
- емульгування та деемульгування (відповідно, підвищення або зниження у разі потреби стабільності та утворення високодисперсної емульсії);

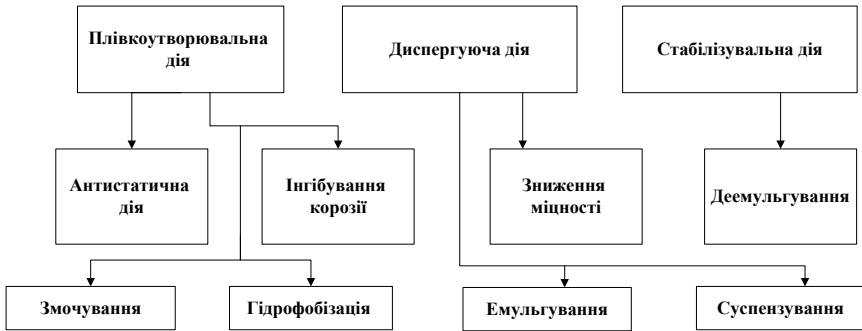


Рисунок 7.21 – Дії складових речовин в основах паст і суспензій

- суспензування (створення дисперсної системи, що складається з двох фаз – рідини і твердої, де дрібні тверді частинки (абразивні (зерна) знаходяться в рідині у зваженому стані).

Хімічна промисловість випускає досить багато ПАР, які широко використовуються у довідних і полірувальних пастах, суспензіях, мастильно-полірувальних рідинах, водних мийних композиціях, присадках, адгезійних сполуках тощо. Використання високомолекулярних полімерних ПАР дозволяє одержувати пасту і суспензії з високими фізико-механічними властивостями, підвищити їх диспергуючі показники, поліпшити в цілому якість композиційної системи.

В ІНМ НАН України створені нові алмазні пасти, що володіють одночасно підвищеними колоїдною, механічною й термічною стабільністю. Характеристика й призначення паст, що виготовляються з різних компонентів, наведені в табл. 7.12.

Таблиця 7.12 – Характеристики і призначення паст і суспензій

Змочувальність	Компоненти паст	Призначення
органічними розчинниками	Алмазний порошок, карбід бору, олеїнова кислота, стеарин, кремнійорганічна рідина	Обробка поверхні металів в умовах високих температур
органічними розчинниками	Алмазний порошок, вуглеводні метанового ряду, консистентне змащення	Обробка поверхонь точних металевих деталей при звичайних і підвищених температурах
органічними розчинниками	Алмазний порошок, олеїнова кислота, стеарин, віск	Обробка важкооброблюваних матеріалів
водою	Алмазний порошок, моноалкілоамід, діалкілоамід	Обробка крихких неметалевих матеріалів, наприклад, кремнію, германію, кварцу
водою	Алмазний порошок, моноалкілоамід, алюмосилкат натрію, діалкілоамід	Обробка крихких неметалевих матеріалів
водою (суспензія)	Алмазний порошок, сульфатол НП-3, спирт етиловий	Обробка крихких неметалевих матеріалів
водою з органічними розчинниками	Алмазний порошок, стеарин, віск, блок-композиційний полімер з оксидів, етилену й пропілену	Обробка металів і тендітних металевих матеріалів
водою з органічними розчинниками	Алмазний порошок, гірчичне масло, віск, оксиетилірований продукт (ентанол)	Обробка металів, сплавів і металевих матеріалів
водою з органічними розчинниками	Алмазний порошок, циклімід, стеарин, синтанол	Обробка металевих матеріалів, а також металів у випадках, коли для промивання оброблених деталей неприпустиме застосування вогнебезпечних розчинників.
водою з органічними розчинниками	Алмазний порошок, вазелін, гліцерин, синтанол	Фінішні операції механічної обробки деталей машин і приладів

Пасти з підвищеною термостійкістю оцінюються максимальною температурою, при якій вони втримуються в зоні оброб-

ки. Їх доцільно застосовувати у випадках, коли процес супроводжується виділенням великої кількості тепла.

На сьогодні вже створений ряд вискоефективних складів паст і суспензій на основі ПАР, структуроутворювачів, термостійких сполук, що мають змочувальні, диспергуючі, адгезійні, антистатичні й інші властивості, які забезпечують високу працездатність останніх.

Процес виготовлення паст (суспензій) з НТМ (рис. 7.22) передбачає такі стадії: готування компонентів основи паст (підігрівання, фільтрацію й зважування); підготовка порошків у НТМ (зважування й розтирання дрібнозернистих порошків у етиловому спирті до однорідної суспензії); змішування в ємностях відповідних компонентів і порошків під час нагрівання до одержання гомогенної маси й подальше охолодження готової паст (суспензії); контроль якості паст (визначення консистен-



Рисунок 7.22 – Технологічна схема виготовлення паст і суспензій з НТМ

ції), абразивної здатності й шорсткості поверхні зразків, оброблених пастою (суспензією); розфасування паст (суспензій) у підготовлені ємності й тару; маркування й упакування готової продукції.

7.12. Основні тенденції вдосконалювання абразивних інструментів і матеріалів

При обробці матеріалів інструментами зі звичайних абразивів (електрокорунду, карбиду кремнію й ін.) внаслідок їхньої недостатньої твердості й міцності, низьких теплофізичних характеристик, а також нераціональних, як правило, геометричних параметрів зерен виникають великі сили різання, зерна абразиву зрізують матеріал з високою температурою в контактній зоні різання. У результаті теплового й механічного впливу погіршуються стан і властивості поверхневого шару оброблюваної деталі: в оброблюваному матеріалі можливі фазові й структурні зміни та у більшості випадків утворюються залишкові напруження розтягання – джерела розвитку мікро- і макротріщин. Усе це разом узятє приводить до зниження зносостійкості й довговічності виробів. Разом з тим прогрес у машинобудуванні підвищує вимоги до надійності й довговічності машин. Продуктивність, швидкохідність, точність і економічність сучасних машин неспинно зростають. При цьому одночасно ускладнюються конструкції машин і деталей, підвищуються вимоги до точності розмірів і геометричної форми деталей, до якості поверхні й поверхневого шару, посилюються норми на контактну жорсткість з'єднань, розширюється застосування важкооброблюваних матеріалів. У цих умовах роль абразивного інструменту в технології машинобудування ще більше зростає, тому що багато вимог до деталей практично неможливо виконати без абразивної обробки.

Технологічні процеси шліфування, суперфінішування, хонінгування, стрічкового шліфування, абразивне доведення тощо легко піддаються механізації й автоматизації, що забезпечує ще більш високу якість деталей, підвищує стабільність їхніх експлуатаційних властивостей, поліпшує економічні показники обробки деталей, підвищує продуктивність праці.

Саме тому останніми роками проводиться робота з поліпшення якості абразивного інструменту як за рахунок покращання різальних властивостей традиційних абразивних матеріалів (наприклад, легування електрокорунду шляхом введення в нього присадок окису титану й хрому, зменшення в абразивних матеріалах шкідливих домішок тощо), так й істотного розширення впровадження процесів абразивного оброблення інструментами з НТМ (синтетичних алмазів та ельбору (кубаніту)): якщо у 1970 р. свігове виробництво промислових алмазів становило не більше 60 млн каратів (12 тонн), то вже у 2000 р. – 1000 млн каратів (200 тонн). Висока конкурентоспроможність та ефективність абразивних інструментів з НТМ припускають їх неодмінну реалізацію у високих технологіях для машинобудування, наприклад завдяки можливості:

- виконувати обробку незалежно від структурного й фазового стану оброблюваних матеріалів, тобто «тверді» та «м'які» матеріали однаково ефективно піддаються обробці;
- виключити термічний вплив на структуру оброблюваних матеріалів за рахунок застосування теплонапружених процесів з температурою менше 600° С;
- збільшити продуктивність обробки у два-три рази на напівчистових і фінішних операціях;
- збільшити стійкість інструменту не менш ніж удвічі;
- застосовувати прогресивні шліфувальні інструменти з НТМ: великогабаритні круги форм 1А1 і 6А2 діаметром від 400 до 900 мм (рис. 7.23 а); мілкорозмірні круги форм 1А1, 1VІ, 12R4 діаметром від 30 до 100 мм; з переривчастим (рис. 7.23 б) і двошаровим робочим шаром (рис. 7.23 в).

Дуже важливим для використання потенційних можливостей НТМ є вдосконалення геометрії робочого шару й конструкції абразивного інструменту. Закономірності утворення робочої поверхні абразивного інструменту з НТМ і розрахунок параметрів геометрії й товщини робочого шару показують, що можливе створення профілю різальної поверхні абразивного інструменту з НТМ, що не змінюється в процесі його роботи, якщо кожна

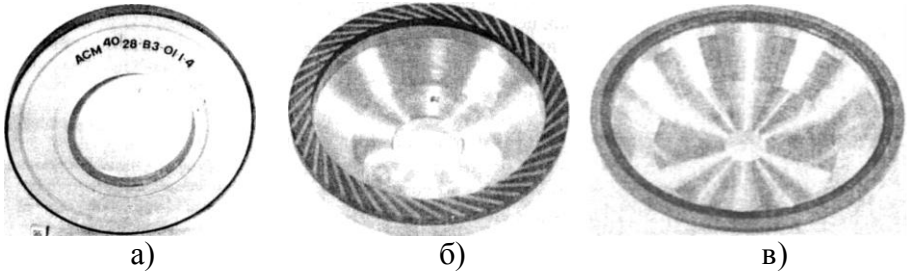


Рисунок 7.23 – Круги шліфувальні алмазні на органічній зв'язці форм: а) 1А1 – діаметром 600 мм; б) 12А 2-450 – переривчастою робочою поверхнею; в) 12А 2-45° – із двошаровим робочим шаром

ділянка робочої поверхні таких інструментів забезпечує однако-
ве знімання оброблюваного матеріалу.

Переривчасті круги застосовуються для усунення ударних навантажень і вібрацій, оскільки забезпечують практично постійну (квазіпостійну) площу контакту робочої поверхні абразивного інструменту та оброблюваного виробу. Застосування таких інструментів дозволяє різко знизити теплову й динамічну напруженість процесу абразивної обробки, виключити брак виробів, підвищити продуктивність обробки й зносостійкість оброблюваних виробів. Змінюючи конструктивні елементи інструмента з переривчастою й ексцентрично розташованою робочими поверхнями, можна керувати термічним режимом шліфування, знизити середню контактну температуру в зоні різання. Застосування багатошарових і збірних кругів розширює технологічні можливості інструмента, дозволяє об'єднати процеси попереднього й остаточного шліфування в одну операцію, підвищити продуктивність, досягти зростання зносостійкості абразивних кругів, знизити шорсткість обробленої поверхні.

Нові абразивні інструменти з НТМ відрізняються високими продуктивністю, зносостійкістю й надійністю, а також особливими тепло- і електрофізичними властивостями. Їхнє застосування значною мірою обумовлює якість виготовлення й високі технічні параметри відповідальних деталей багатьох машин і приладів, виробів електроніки, підвищує продуктивність буріння нафтових і газових свердловин, забезпечує обробку будівель-

них виробів. Використання абразивних інструментів з НТМ сприяє технічному прогресу при формоутворенні деталей на основі важкооброблюваних, у т.ч. і нових, матеріалів (композиційних, наплавлених та напилених термозносостійких покриттів, скла, кераміки, корунду, кремнію, пластиків і гуми, будівельних матеріалів, під час бурінні гірських порід тощо) і використанні енергозберігаючих технологічних автоматизованих процесів машино- і приладобудування.

Великі резерви закладені у використанні можливостей НТМ як у самих абразивних інструментах, так і в процесах обробки. Наприклад, до перспективних методів шліфування належать: глибинний, врізний, електрохімічний та електроерозійний, з накладенням низько- і високочастотних коливань (ультразвуковий), зі стабілізацією швидкості й сили різання, швидкісний і надшвидкісний та ін. Ці методи дають можливість у багато разів збільшити продуктивність і працездатність кругів з НТМ і повністю виключити застосування інструментів зі звичайних абразивів при шліфуванні різних металів і сплавів.

Останніми роками все частіше під час виготовлення абразивних інструментів використовують суміші порошків різних абразивних матеріалів. Доведено, що наявність додаткового абразивного матеріалу в суміші поліпшує якість обробленої поверхні. Зазвичай у такі суміші додатково вводять абразивний матеріал, зернистість якого менша або дорівнює зернистості основного абразивного порошку. Наприклад, деякі алмазні пасти містять карбід кремнію меншої зернистості, ніж алмаз. Однак дослідження показали, що в цьому випадку абразивна здатність паст практично не змінюється. Для її збільшення як додатковий абразив варто використовувати порошок, зернистість якого більша від зернистості основного порошку і міцність його (при досить високій твердості) повинна бути меншою.

В ІНМ НАН України проведені дослідження фізико-механічних характеристик складів паст, які, з метою зниження витрати порошку з НТМ і вартості пасти, містять суміші порошків кубоніту й карбиду бору. При використанні паст із суміші цих порошків під час зрізання матеріалу спочатку працюють

більш крупні зерна карбїду бору, що полегшує подальше доведення зернами кубонїгу. Після того, як зерна карбїду бору при руйнуванні (зношуванні) зменшуються до величин зерен кубонїгу, знімання матеріалу почне здійснюватися, головним чином, кубонїгом, зерна якого зношуються значно повільніше зерен карбїду бору. Завдяки меншим розмірам у кінці процесу оброблення саме останні й забезпечують необхідну шорсткість обробленої поверхні.

При обробці оптичних деталей і багатьох деталей електронної техніки найбільш перспективними виявились абразивні інструменти зі зв'язаними у складі полімерних і металевих зв'язок абразивом та алмазом.

Потрібно мати на увазі й те, що особливо важливе значення мають склади (об'ємна кількість зерен, зв'язувального, наповнювачів, пор) і властивості зв'язки інструментів, оскільки вона є не лише засобом утримання зерен НТМ, а й самостійним фактором взаємодії з оброблюваним матеріалом, що істотно впливає на процес різання та контактну взаємодію робочої поверхні інструменту з оброблюваним матеріалом.

Одним з важливих резервів залежно від характеристики інструменту та умов обробки є забезпечення оптимальної сталості й міцності закріплення зерен НТМ у робочому шарі. Останнім часом усе частіше для практичної реалізації цієї вимоги у технологічному процесі виготовлення шліфувальних кругів з НТМ, особливо на органічних та металевих зв'язках, передбачається операція нанесення на поверхні зерен з НТМ покриттів (див. рис. 7.16). При цьому необхідно мати на увазі, що покриття, яке наноситься на на поверхню зерен з НТМ, повинне мати теплопровідність значно (у десятки разів) нижчу, ніж теплопровідність самих зерен. Це покриття служить тепловим бар'єром між зерном і зв'язкою, що різко зменшує вплив теплових потоків від зони різання, де температура може досягати 700 °С і вище, через зерно з НТМ, яке має високу теплопровідність, на полімерне зв'язувальне, що може призвести до його деструкції. Унаслідок деструкції складових зв'язки міцність утримання зерна в матриці круга різко падає, тобто зерно, не вико-

навши корисної роботи, випадає з робочої поверхні інструменту, що супроводжується підвищеним зношуванням інструменту і збільшенням питомої витрати НТМ. У ІНМ НАН України для ефективного виконання цієї операції розроблені технологічні процеси нанесення на порошки НТМ скло- і металопокриттів, які істотно підвищують ефективність роботи алмазних інструментів за рахунок забезпечення кращого утримання зерен зв'язкою, підвищення їхньої міцності та поліпшення умов тепловідведення із зони оброблення. Найкращий ефект досягається при використанні кругів на органічній зв'язці з металізованими агрегатованими зернами, що становлять собою агрегати, які містять кілька зерен НТМ, покритих і спаяних між собою мідно-олов'яним, мідно-сурм'яним та іншими сплавами. Підвищення самозаточуваності інструментів з НТМ, зниження засалюваності, а також зменшення температури й потужності абразивного оброблення можуть бути досягнуті, особливо при абразивному обробленні полікристалічних НТМ, під час нанесення на зерна НТМ покриттів на основі натрій-боросилікатних стекел. Розм'якшене при контактуванні з таким оброблюваним матеріалом скло є гарним мастилом.

У табл. 7.13 наведені основні галузі ефективного застосування порошків НТМ із металевими покриттями (див. додаток Е, слайди 4 та 5).

7.13. Маркування абразивних інструментів

Система маркування абразивних інструментів наведена у додатку Е на слайді 7.

Маркування шліфувальних інструментів (кругів, брусків сегментів тощо) наноситься на одній із сторін інструменту водостійкою фарбою (для абразивних інструментів) або шляхом гравірування на металевому корпусі (для алмазних та кубонігових (ельборових) інструментів).

Приклад маркування абразивного круга:

ПП 500x50x305 24А 10-П 32 7 К5 35м/с А 1 кл ГОСТ 2424-83

Таблиця 7.13 – Основні галузі застосування порошків НТМ із металевими покриттями

НТМ, зернистість	Покриття і його маркування	Рекомендовані галузі застосування
Алмазні шліф- порошки всіх марок і зерни- стостей	Нікель HD	В інструменті на металевих, металоорганічних і органічних зв'язках для: обробки твердого сплаву й твердого сплаву разом зі сталлю; напівчистового хонінгування чавуну й сталі; обробки будівельних матеріалів, граніту, мармуру, феритів; у вільному стані – для обробки в магнітному полі
Алмазні мікропорошки зернистостей 60/40-7/5		В інструментах на металевих, металоорганічних і органічних зв'язках для: чистової обробки твердого сплаву разом зі сталлю; хонінгування чавуну й сталі; тонкого шліфування оптичного скла; у пастах для полірування граніту й мармуру; для шліфування й огранки діамантів
КНБ шліф- і мікропорошки зернистостей 200/160-7/5	Нікель HD	В інструментах на металевих і органічних зв'язках для: заточення бурякорізабельних ножів; круглого й плоского шліфування деталей зі сталі, кольорових металів і їхніх сплавів. У вільному стані - в пастах для довідного шліфування й полірування при виготовленні прецизійних інструментів і деталей зі сталі, кольорових металів і їхніх сплавів.
Алмазні шліф- порошки всіх марок і зерни- стостей	Мідь CID	В інструментах на органічних зв'язках для обробки титанових сплавів і сталей, що містять карбід.
	Титан Т	В інструментах на металевих зв'язках для обробки високотвердих інструментальних, будівельних і спеціальних матеріалів.

Тут: ПП – тип круга; 500 x 50 x 305 – зовнішній діаметр х висота x діаметр посадкового отвору; 24А – марка шліфувального матеріалу; 10-П – зернистість; 32 – ступінь твердості; 7 – номер структури; К5 – марка зв'язки; 35 м/с – робоча колова швидкість; А – клас точності; 1 кл – клас нерівноваженості.

Примітки.

1. *Точність абразивних інструментів.* Залежно від вимог до зернового складу, граничних відхилень поверхонь, їхнього взаємного розташування, наявності сколів, тріщин і раковин шліфувальні круги випускають трьох класів точності: АА, А та Б, а інші інструменти – двох класів: А та Б.

Круги класу АА мають найменші відхилення від заданих розмірів. Допустимі відхилення для інструментів класу Б у 1,5 – 2 рази перевищують відхилення аналогічних параметрів кругів класу А, які, у свою чергу, більші від тих, що відповідають класу АА.

Круги класу точності АА застосовують для прецизійної обробки шліфуванням високоточних заготовок із матеріалів усіх груп оброблюваності, а також для швидкісного й високошвидкісного прецизійного шліфування особливо точних заготовок.

Круги класу точності А застосовують для остаточної обробки шліфуванням заготовок із матеріалів усіх груп оброблюваності, а також для швидкісного й високошвидкісного остаточного шліфування.

Для менш відповідальних операцій абразивної обробки застосовують інструменти класу точності Б.

2. *Незрівноваженість шліфувальних кругів* виникає при розбіжності їхнього центра мас із центрами обертання. Причинами незрівноваженості можуть бути похибки установлення круга на планшайбі й планшайби з кругом на шпинделі верстата, похибки геометричної форми круга, його нерівномірне зношування в процесі шліфування й т.д.

Незрівноваженість круга призводить до появи вібрацій і, як наслідок, до погіршення якості оброблюваної поверхні (з'являються огранювання, хвилястість, припіки й т.д.), передчасного виходу з ладу шпиндельного вузла верстата, а іноді й до руйнування круга.

Контроль незрівноваженості звичайно провадять на верстатах для статичного балансування, основною частиною яких є два паралельно розташованих циліндричних валики однакового діаметра (рис. 7.24). Суть статичного балансування полягає в

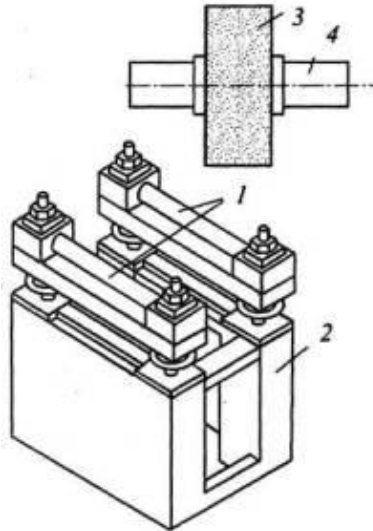


Рисунок 7.24 – Балансувальний верстат:

1 – паралельні циліндричні валики; 2 – станина;
3 – шліфувальний круг; 4 – оправка

такому: круг на балансувальній оправці встановлюють на валики й легким поштовхом повільно обертають. При цьому «важка» частина круга прагне зайняти крайнє нижнє положення. Після зупинки круга відзначають верхню точку його периферії й до неї кріплять затискач із тягарцем певної маси. Тягарець підбирають доти, поки круг не буде перебувати в байдужому стані рівноваги. Потім абразивний круг встановлюють на шліфувальний верстат

Приклад маркування алмазного шліфувального круга:

1 А 1 300x40x76x5 АС4 100/80 100 БП2 2720-0139 ГОСТ 16167-90

Тут: 1 – форма перетину корпусу; А – форма перетину алмазоутримувального шару; 1 – розташування алмазоутримувального шару на корпусі круга; 300 x 40 x 76 x 5 – зовнішній діаметр x висота x діаметр посадкового отвору x товщина алмазоутримувального шару; АС4 – марка алмазного шліфпорошку; 100/80 – зернистість алмазного шліфпорошку; 100 – умовна концентрація шліфматеріалу; БП2 – марка зв'язки; 2720-0139 – позначення типорозміру круга.

Питання для самоперевірки

1. Охарактеризуйте особливості абразивного оброблення.
2. Перелічіть і поясніть ознаки, за якими розрізняють абразивні інструменти.
3. Що потрібно знати для правильного вибору характеристик абразивних інструментів?
4. Що розуміють під характеристиками абразивних інструментів?
5. Розкажіть про особливості абразивних матеріалів і їхніх умовних позначень.
6. Як класифікуються абразивні матеріали за родом зерна?
7. На які групи розділяються абразивні матеріали за зернистістю? Як позначається зернистість абразивних інструментів?
8. Охарактеризуйте властивості природних і синтетичних абразивних матеріалів.
9. Наведіть приклади вибору матеріалу зерен для різних умов абразивного оброблення.
10. Охарактеризуйте властивості природних абразивних надтвердих матеріалів і їх класифікацію.
11. Охарактеризуйте властивості синтетичних абразивних надтвердих матеріалів на основі алмазу і їх класифікацію.
12. Охарактеризуйте властивості синтетичних абразивних надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору і їх класифікацію.
13. Наведіть приклади вибору надтвердих матеріалів для різних умов абразивного оброблення.
14. Що таке зернистість абразивних матеріалів?
15. Охарактеризуйте класифікацію і позначення абразивних зерен за їх розмірами.
16. Як зернистість впливає на продуктивність оброблення і шорсткість обробленої поверхні?
17. Перелічіть основні види зв'язок, щозастосовуються при виготовленні абразивних інструментів та інструментів з НТМ.
18. Як класифікуються зв'язки абразивних інструментів і які зв'язки мають найбільше поширення?

19. Що таке концентрація абразивних інструментів з надтвердих матеріалів і яка умовність прийнята в позначенні концентрації алмазів?

20. Що розуміють під твердістю абразивного інструменту? Як прийнято позначати твердість абразивних інструментів?

21. Що таке структура абразивних матеріалів і на які групи вони поділяться?

22. Дайте коротку характеристику формам і розмірам абразивних інструментів.

23. Перелічіть основні форми кругів з НТМ.

24. Розкажіть про конструктивні особливості кругів з НТМ.

25. Охарактеризуйте типові технології виготовлення абразивних інструментів з НТМ на органічних жорстких, органічних еластичних та металевих зв'язках методами порошкової металургії.

26. Охарактеризуйте типову технологію виготовлення абразивних інструментів з НТМ на металевих зв'язках методом електрохімії.

27. Охарактеризуйте типові технології виготовлення паст і суспензій.

28. Охарактеризуйте дії складових речовин в основах паст і суспензій.

29. Охарактеризуйте основні тенденції вдосконалювання абразивних інструментів і матеріалів.

30. Для чого наноситься покриття на абразивні зерна під час виготовлення алмазних інструментів? Охарактеризуйте типові властивості цих покриттів.

31. Охарактеризуйте основні галузі застосування порошоків НТМ із металевими покриттями.

Слова і скорочення в розділі 7

АС – синтетичний монокристалічний алмаз. До позначення синтетичного монокристалічного алмазу **АС** додають літери, що визначають його тип: **АСВ** – алмаз синтетичний високої міцності; **АСК** – алмаз синтетичний кристалічний з міцністю; **АСКС** – алмаз синтетичний кристалічний сортований; **АСО** – алмаз син-

тетичний звичайної міцності; **АСП** – алмаз синтетичний підвищеної міцності.

АР – синтетичний полікристалічний алмаз. До позначення синтетичного полікристалічного алмазу **АР** додають літери, що визначають його тип: **АРБ** – балас; **АРК** – карбонадо; **АРС** – спек.

Зв'язка – додатковий (зв'язувальний) матеріал для виготовлення абразивних інструментів зі зв'язаним абразивом (абразивними зернами) для його закріплення у єдиному інструменті (круг, брусок, сегмент тощо), який має відповідну форму, розміри та геометрію.

Зернистість абразивного матеріалу – умовне позначення шліфувального матеріалу, що пов'язане з розмірами абразивних зерен, які належать до основної фракції.

Карат – одиниця маси алмазу, яка дорівнює 0,202 г.

Карбід бору – синтетичний абразивний матеріал (до 93 % V_4C і 1,5 % вільного вуглецю).

Карбід кремнію – синтетичний абразивний матеріал (не менше 95% SiC)

Кварц – природний абразивний матеріал: безводна кристалічна кремнієва кислота (до 99,5% SiO_2).

Концентрація абразивних інструментів (для інструментів з НТМ) – характеризує об'ємний вміст у них алмазних або ельборових зерен. За 100% концентрацію беруть вміст 4,4 кар (0,88 г) в 1 см^3 робочого шару, що становить 25% об'єму незалежно від виду зв'язки.

Корунд – природний абразивний матеріал - кристалічний глинозем (до 95% Al_2O_3).

Кремній – природний абразивний матеріал (рідновид кварцу, що містить не менше 97% SiO_2).

МОТС – мастильно-охолоджувальне технологічне середовище.

Наждак – природний абразивний матеріал, що містить до 60% окису алюмінію Al_2O_3 .

НТМ – надтверді матеріали (надтвердий матеріал).

Основна фракція абразивного матеріалу – сукупність зерен певного розміру, що переважають у складі одного порошку за масою (у шліфзерні і в шліфпорошках) або за числом зерен (у мікропорошках).

ПАР – поверхнево-активні речовини.

Сингонія – поділ кристалів за ознакою симетрії їх елементарної структури.

Структура абразивного інструменту – співвідношення об'ємів зерен, зв'язки та пор.

Твердість абразивних інструментів – сила, з якою абразивне зерно утримується зв'язкою. Це умовне позначення здатності зв'язки утримувати зерна в інструменті.

Електрокорунд – синтетичний абразивний матеріал (оксид алюмінію Al_2O_3). Залежно від вмісту Al_2O_3 й інших елементів має декілька різновидів.

8. ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ВУГЛЕЦЮ, ЗОКРЕМА ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ

8.1. Синтезовані алмазні нанопорошки

На порозі третього тисячоліття науково-технічний прогрес ставить нові вимоги до структури й властивостей виробів, а також до якості всіх видів продукції. Найчастіше промисловості потрібні дрібнорозмірні, міцні, зносостійкі матеріали, які різко відрізняються характеристиками від крупнозернистого матеріалу. Такими характеристиками володіють ультрадисперсні (нанометричні) матеріали, наприклад, ультрадисперсні (нанометричні) алмази (УДА) з розміром часток 1–100 нм, які синтезують шляхом детонації заряду вибухової речовини в спеціальних камерах у середовищі з негативним кисневим балансом.

Ще тридцять років тому термін «нано» майже не застосовувався у науковій термінології матеріалообробної галузі, тому нові порошкові синтетичні алмази творці назвали «ультрадисперсні алмазні порошки», які згодом стали називати «алмазні нанопорошки».

Ультрадисперсні алмази детонаційного синтезу, зберігаючи структурні характеристики, а також фізико-хімічні властивості алмазів статичного синтезу, істотно відрізняються від них поверхневими властивостями. Ці відмінності обумовлені значною кількістю некомпенсованих зв'язків, унаслідок чого УДА мають сильні адсорбційні властивості. Саме ця якісна характеристика нового виду алмазного порошку заслуговує більш пильної уваги. Відомо, що добавки УДА в різні матеріали сприяють формуванню дрібнозернистих структур із принципово новими властивостями.

Учені Російського Федерального державного унітарного підприємства (ФДУП) «Федеральний науково-виробничий центр» (ФНВЦ) «Алтай» у м. Бійську більше двадцяти років тому синтезували і впровадили в промислове виробництво кристали алмазів ультрадисперсних розмірів. Ультрадисперсні алмази (УДА) мають розміри 4–6 нанометрів, а агрегати із цих криста-

лів синтетичних алмазів мають розміри 50–1000 нм, які можна використовувати при виготовленні алмазно-абразивних інструментів.

Крім того, перспективним застосуванням ультрадисперсних алмазів і виробів на їхній основі є:

а) як добавки в електрохімічні й хімічні покриття; у присадки до індустриальних і моторних масел; у полімерні керамічні й гумовотехнічні матеріали, клеї;

б) для виготовлення полікристалів і різних дрібнокристалічних композитів; фільтрів і мембран, суспензій і паст для тонкого шліфування й доведення;

в) як алмазні адсорбенти.

8.1.1. Синтез та очищення УДА

Синтез УДА здійснюється детонацією твердих вибухових речовин (ВР) в інертному середовищі. У фронті детонаційної хвилі за рахунок розриву хімічних зв'язків відбувається миттєве виділення величезної енергії. В умовах високих температур (3000–4000) К і тисків (20–30) ГПа за частки мікросекунди з вільного вуглецю ВР, який виділяється при цьому, конденсується високодисперсне вуглецеве середовище. Залежно від умов детонації воно містить (40–60) мас. % ультрадисперсного алмазу. Умови детонаційного синтезу не забезпечують повного перетворення вуглецю ВР в алмазну фазу. Вихід вуглецю становить (4–10) % від маси ВР.

Очищення УДА здійснюється механічним і хімічним способами. Після механічного видалення технологічних домішок алмазодневий порошок з метою виділення алмазної фази піддають термоокисненню речовинами, які містять сірчану і азотну кислоти. Спосіб очищення кислотами при нагріванні є найбільш ефективним, оскільки комплексно впливає на всі домішки: одночасно розчиняються метали й окисляється вуглець не алмазної структури. Алмаз після виділення від кислотних середовищ промивають водою. Промислові продукти очищення – це водна суспензія алмазу (марка УДА-В) і порошок (марка УДА-С), отриманий в суспензії сушінням і дрібнюванням. У ряді випадків для видалення невуглецевих домішок продукт

хімічного очищення піддають глибокому доочищенню з використанням іонообмінних і мембранних технологій (марка УДА-П).

Властивості ультрадисперсних алмазів різних марок подані у табл. 8.1 та 0.2.

Таблиця 8.1 – Властивості алмазних нанопорошків марок УДА-С та УДА-В

Властивість	Значення	Методи вимірювання
Вміст алмазної фази	85–91% маси	Хімічний аналіз
Розмір первинних частинок	4–6 нм	Рентгено-фазовий аналіз
Розмір агрегатів	50–1000 нм	Сканування електронним мікроскопом
Густина	$3 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$	Пікнометрія
Питома поверхня	$300 \pm 60 \text{ м}^2$	Метод БЕТ
Вміст вуглецю	85–91 %	Елементний аналіз
Хімічні домішки	O, N, H	Елементний аналіз

Таблиця 0.2 – Властивості алмазовуглецевого порошку (УДА-Г)

Властивість	Значення	Методи вимірювання
Вміст алмазної фази	40–60 %	Хімічний аналіз
Розмір первинних частинок	5–20 нм	Рентгено-фазовий аналіз
Розмір агрегатів	50–200 нм	Сканування електронним мікроскопом
Питома поверхня	$400 \pm 60 \text{ м}^2/\text{г}$	Метод БЕТ
Вміст вуглецю	87–91 %	Елементний аналіз
Хімічні домішки	O, N, H, Fe	Елементний аналіз

8.1.2. Галузі застосування алмазних нанопорошків (марки УДА, УДА-Г)

Викладений матеріал з ультрадисперсних синтетичних алмазів (алмазні нанопорошки) містить відомості про галузі їхнього застосування, в тому числі й для паст, які застосовуються при поліруванні та нанесенні зносостійких покриттів на лезовий різальний інструмент (табл. 8.3).

1. Полірувальні речовини на основі ультрадисперсних алмазів (УДА).

Призначення

Застосовуються нанорозмірні зерна УДА при операціях суперфінішної обробки відповідальних поверхонь, напівпровідникових матеріалів, дорогоцінних каменів, оптичних поверхонь (приладобудування, радіоелектроніка, оптика, точне машинобудування).

Таблиця 8.3 – Марки і галузі застосування наноалмазних порошоків, які випускає ФНПЦ «Алтай»

Марка продукції	Вигляд	Галузі застосування
1	2	3
УДА-С	Повітряно-сухий порошок сірих, сіро-коричневих кольорів	Полірування, виготовлення керамічних і композиційних матеріалів; використання як адсорбента у медицині
УДА-В	Водна суспензія ультрадисперсних алмазів	Гальванічне виробництво зносостійких хімічних і електрохімічних покриттів; полірування монокристалів, прецизійних виробів з кераміки та металу
УДА-Г	Алмазовуглецевий порошок чорних кольорів	Присадки і мастила
УДА-П	Гідрогель УДА сірого або темно-сірого кольору	Полірування оптики, кераміки, монокристалів
Деста - М	Суспензія алмазографітового порошку в моторному маслі	Автотракторна, автомобільна техніка, річковий і морський флот
Деста - С	Суспензія алмазографітового порошку в індустріальному маслі	Промислове обладнання, верстати, роторні лінії, конвеєри

Переваги:

- поліпшення якості обробки поверхні;
- зниження витрат на обробку;
- рівномірний розподіл енергії навантаження;
- зниження шорсткості для деяких матеріалів до 0,5 нм.

2. Зносостійкі композиційні електрохімічні покриття на основі УДА

Призначення

Підвищення терміну служби тертьових пар деталей і механізмів, ривального, штампового, медичного, слюсарного інструментів, прес-форм; зміцнення і відновлення робочих розмірів.

Переваги:

- можливість використання стандартного електрохімічного обладнання;
- широкий діапазон розмірів і форм виробів, які покривають;
- висока корозійна стійкість;
- висока зносостійкість і мікротвердість;
- рівномірність покриттів на виробах складного профілю;
- мала витрата кластерної фази.

3. Антифрикційні присадки на основі УДА

Призначення

Поліпшення властивостей обкатних, моторних та індустріальних масел. Модифікація процесу тертя, підвищення ресурсу роботи деталей машин і механізмів.

Переваги:

- простота застосування присадок;
- стійкі зв'язки з масляною основою;
- зниження коефіцієнта тертя для контактних пар;
- збільшення терміну служби деталей у 2–3 рази;
- зниження витрат масла до 8 %, палива – до 6 %;
- підвищення плавності ходу, збереження точності обробки верстатів;
- прискорення процесу припрацювання нових двигунів і двигунів після капремонту в 2–3 рази.

Із наукової і практичної сторін викликає інтерес таке питання: «Чи не можна одержувати з агрегатів УДА більші полікристали, щоб використовувати їх для лезових інструментів?». Очевидно, що сьогодні це вже можна зробити. Ми впевнені, що вчені та інженери вже займаються цією проблемою і розробляють технології одержання полікристалів з нанорозмірних синтезованих монокристалів алмазів (УДА) і їхніх агрегатів. Адже технології одержання полікристалів (композитів)

з порошків синтетичних алмазів і кубічного нітриду бору (див. рис. 5.5) вже працюють у промислових умовах і дозволяють створювати інструменти з властивостями (див. табл. 5.3, 5.4), що значно підвищують ефективність механічної обробки матеріалів, у т.ч. і важкооброблюваних (див. табл. 5.1 та 5.9).

8.2. Фулерени і вуглецеві нанотрубки

8.2.1. Структури молекул графіту, алмазу, фулерену і нанотрубки

Нагадаємо, що давньогрецький філософ Демокріт у своїй атомістичній концепції Всесвіту звернув увагу на те, що світ складається з безлічі «цеглинок» – хімічних елементів і їхніх сполук, які різняться між собою особливими властивостями.

Одні елементи, такі як мідь, залізо, срібло, вуглець, людству відомі з доісторичних часів. Другі – відкриті кілька століть тому, а кисень, наприклад, був відкритий лише в XVIII столітті. Треті – були відкриті 100–200 років тому, але набули першорядної важливості лише в наш час. До них належать уран, алюміній, бор, літій, берилій та ін. І зовсім недавно, усього в 1985 році, Роберт Керл, Гарольд Крото і Річард Смоллі відкрили принципово нову вуглецеву сполуку – фулерен, унікальні властивості якого викликали цілий шквал досліджень. У 1996 році першовідкривачам фулеренів присуджена Нобелівська премія.

Основою молекули фулерену є вуглець, який є унікальним хімічним елементом, що відрізняється здатністю з'єднуватися з більшістю елементів і утворювати молекули різноманітних сполук і будов. Зі шкільного курсу хімії відомо, що вуглець має два основних алотропних стани – графіт і алмаз. Отже, тепер, із відкриттям фулерену можна сказати, що вуглець набув ще одного, третього, алотропного стану.

У зв'язку з цим ще раз, більш докладно, розглянемо структуру графіту (рис. 8.1 а) та алмазу (рис. 8.1 б), а також ознайомимося зі структурами молекул фулеренів і нанотрубок.

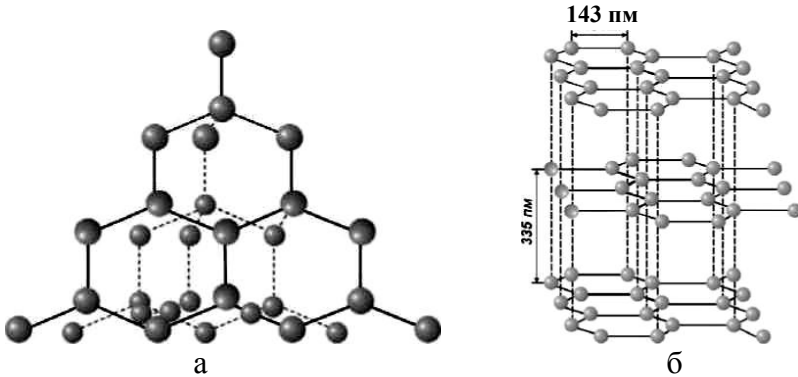


Рисунок 8.1 – Структура молекули алмазу (а) та графіту (б), де 1 пікометр (пм) дорівнює 10^{-12} м, або $0,01 \text{ \AA}$

Графіт має шарувату структуру. Кожен його шар складається з атомів вуглецю, ковалентно зв'язаних один з одним у правильні шестикутники (рис. 8.1 б).

Відомо, що теорія Ван-дер-Ваальса ґрунтується на квантовій механіці: молекули речовини, які втримуються силами міжмолекулярної взаємодії у певному діапазоні лінійного розміру, на малих відстанях відштовхуються, а на великих – притягуються.

Отже, сусідні шари графіту втримуються разом слабкими силами Ван-дер-Ваальса. Тому вони легко ковзають один по одному. Прикладом цього може бути простий олівець – коли ми проводимо графітовим стрижнем на папері, шари поступово "відшаровуються" один від одного, залишаючи на папері слід.

Алмаз має тривимірну тетраедричну структуру (рис. 8.1 а). Кожен атом вуглецю ковалентно пов'язаний із чотирма іншими. Всі атоми у кристалічних ґратках розташовані на однаковій відстані (154 пм) один від одного. Кожний з них пов'язаний з іншими прямим ковалентним зв'язком і утворює у кристалі (яких би розмірів він не був) одну відносно велику макромолекулу (рис. 8.1 а). Завдяки високій енергії ковалентних зв'язків атомів вуглецю С-С алмаз має найвищу міцність і використовується не тільки як дорогоцінний камінь, а і як сировина для виготовлення різальних лезових і абразивних інструментів для обробки різних металів та інших матеріалів.

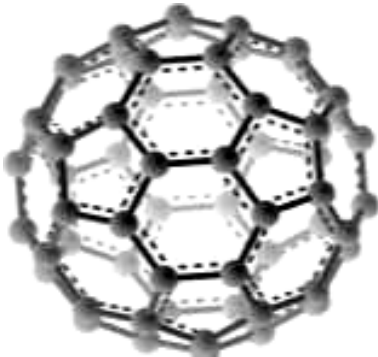


Рисунок 8.2 – Структура молекули фулерену С60

Фулерени отримали свою назву на честь архітектора Бакмінстера Фулера, який створив подібні структури для використання їх в архітектурному будівництві. Тому їх також називають бакиболами. У фулерену каркасна структура, що має сфероподібну форму і дуже нагадує футбольний м'яч, що складається із «латок» 5- та 6-кутньої форми. Якщо уявити, що біля вершин цього багатогранника знаходяться атоми вуглецю, яких у цій структурі 60, то це і є найбільш стабільний фулерен С60 (рис. 8.2). Зовнішній діаметр цього фулерену становить 0,7 нанометра, а внутрішній – 0,5 нм.

У молекулі С60, що є найбільш відомим і симетричним представником сімейства фулеренів, число п'ятикутників і шестикутників дорівнює 20. При цьому кожен п'ятикутник межує тільки із шестикутниками, а кожен шестикутник має три загальні сторони із шестикутниками і три – з п'ятикутниками.

Структура молекули фулерену цікава тим, що всередині такого вуглецевого «м'ячика» утворюється порожнина, у яку завдяки капілярним властивостям можна вводити атоми та молекули інших речовин, що дає, наприклад, можливість їхнього безпечного транспортування.

У результаті дослідження фулеренів були синтезовані й

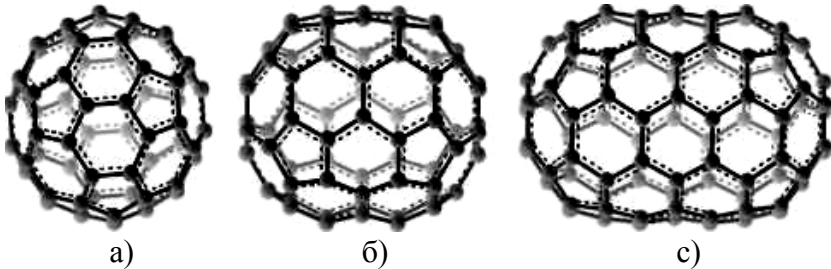


Рисунок 8.3 – Молекули фулеренів :
а) С60; б) С70; в) С90



Рисунок 8.4 – Структура нанотрубки

вивчені вуглецеві каркасні структури молекули різних фулеренів (рис. 8.3), які можуть містити різну кількість атомів вуглецю – від 36 до 540.

Однак різномітність вуглецевих каркасних структур на цьому не закінчується. У 1991 році японський професор Суміо Ідзума виявив довгі вуглецеві циліндри, які одержали назву «нанотрубка».

Нанотрубка – це молекула, що має більше мільйона атомів вуглецю і становить трубку з діаметром близько нанометра і довжиною кілька десятків мікрометрів. У стінках трубки атоми вуглецю розташовані біля вершин правильних шестикутників (рис. 8.4). Що правда, найдовші нанотрубки, які вдалося виготовити в 2005 році, були вже довжиною у кілька сантиметрів.

До експериментального відкриття нанотрубок ніхто із вчених-теоретиків їх не передбачав. Тож ученим залишається лише вивчати і дивуватися тим властивостям, які мають нанотрубки.

На сьогодні відомо кілька тисяч патентів на застосування фулеренів у різних сферах людської діяльності: від надпровідників до ліків.

Головною особливістю фулеренів є їх підвищена реакційна активність. Вони легко захоплюють атоми інших речовин і утворюють матеріали із принципово новими властивостями. На їхній основі виникла нова стереохімія вуглеців, яка дозволяє цілеспрямовано створювати нові органічні молекули і, отже, речовини із заданими формами і властивостями. Фулерени можуть бути використані як «наноцеглини» для конструювання матеріалів із заданими параметрами, які у недалекому майбутньому зможуть замінити найміцніший і найтвердіший різальний інструмент, що використовується сьогодні в обробних галузях.

Ученими синтезовані наноструктури нового типу, названі «нанобруньками» («NanoBuds»). Це нові вуглецеві нанострукту-

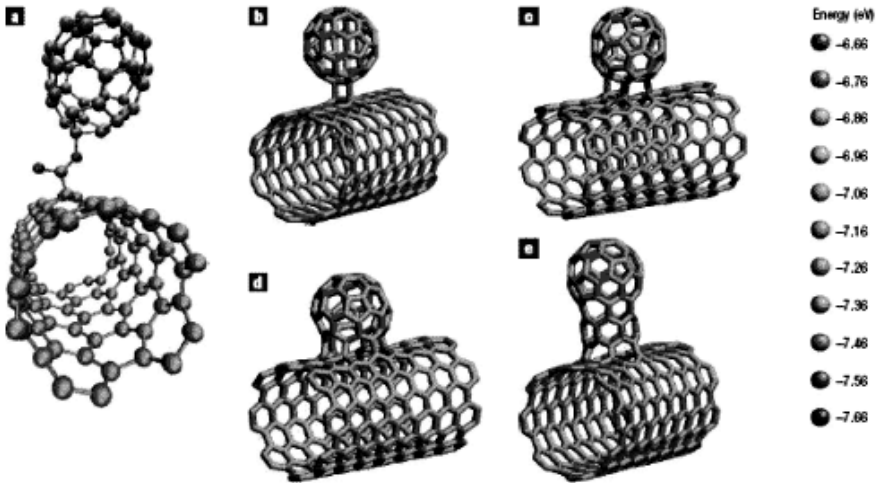


Рисунок 8.5 – Можливі варіанти ковалентних зв'язків між фулеренами і нанотрубками

ри: одностінні нанотрубки з фулеренами, розташованими на нанотрубках подібно брунькам на гілках дерев (рис. 8.5).

Більшість фулеренів – це кластери C₄₂ і C₆₀, хоча були зареєстровані і найменші фулерени C₂₀.

Ключовим фактором для синтезу «нанобруньок» є наявність в атмосфері парів H₂O і CO₂. Оптимізація умов виготовлення дозволила досягти щільності фулеренів на нанотрубках понад 1 фулерен/нм. Фулерени прикріплені до нанотрубок дуже міцно: вони не зміщуються під дією голки з НТМ та електронного пучка просвічувального мікроскопа, не відділяються при нагріванні до 7000 °С і не розчиняються в органічних розчинниках, що свідчить про ковалентну природу їхньої взаємодії з нанотрубками.

Немаловажною є і простота виготовлення «нанобруньок»: кімнатна температура, атмосферний тиск, будь-які підкладки.

Наявність великої кількості сильно скривлених «поверхонь» фулеренів полегшує автоелектронну емісію з «нанобруньок»: гранична напруженість поля становить 0,65 В/мкм, що в 3 рази менша, ніж у «гладких» одностінних нанотрубок, а струм емісії значно більший.

Новий наноматеріал має ряд особливостей, сприятливих для його практичного застосування. Наприклад, фулеренове покриття перешкоджає злипанню нанотрубок у великих масивах, а неоднорідність електронних характеристик уздовж осі нанотрубки можна використовувати в наноелектроніці.

8.2.2. Властивості фулеренів, нанотрубок і ймовірні галузі їхнього застосування

Учених здивували унікальні властивості нанотрубок. Дійсно, у 100 тис. разів тонші людського волосся, вони виявилися

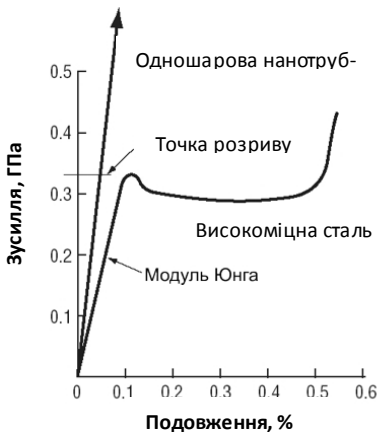


Рисунок 8.6 – Діаграма міцності нанотрубок порівнянно з високоміцною сталлю

надзвичайно міцним матеріалом. Нанотрубки в 50–100 разів міцніші за сталь (рис. 8.6) і мають у шість разів меншу щільність! Модуль Юнга – рівень опору матеріалу деформації – у нанотрубок удвічі вищий, ніж у звичайних вуглецевих волокон. Тобто нанотрубки не тільки міцні, а й гнучкі, і нагадують за своїм поведінням не ламкі соломинки, а тверді гумові трубки. Під дією механічних напружень, які перевищують критичні, нанотрубки поведуться досить екстравагантно: вони не «фвуться», не «ламаються», а просто перебудовуються.

З нанотрубок можна створити надлегкі і надміцні композиційні матеріали, щоб шити з них одяг, який не стискує рухів, для пожежників і космонавтів. Нанокабель від Землі до Місяця з окремої трубки можна було б намотати на котушку розміром з макове зернятко. Невелика нитка діаметром 1 мм, яка складається з нанотрубок, могла б витримати вантажу в 20 т, що у кілька сотень мільярдів разів більше її власної маси!

Є всі підстави вважати, що у недалекому майбутньому вчені навчатися вирощувати нанотрубки довжиною в метри, а то

й сотні метрів. Безумовно, це сильно вплине на майбутні технології: адже невидимий неозброєним поглядом «трос», який у тисячі разів тонший від людського волосся і здатний утримувати вантаж у сотні кілограмів, знайде незліченну кількість застосувань.

Нанотрубки бувають найрізноманітнішої форми: одношарові та багатошарові, прямі та спіральні. Крім того, вони демонструють цілий спектр найнесподіваніших електричних, магнітних, оптичних властивостей.

Наприклад, залежно від конкретної схеми згортання графітової площини, нанотрубки можуть бути як провідниками, так і напівпровідниками електрики. Електронні властивості нанотрубок можна цілеспрямовано змінювати шляхом введення усередину трубок атомів інших речовин.

Порожнечі всередині фулеренів і нанотрубок давно привертали увагу вчених. Експерименти показали, що якщо всередину фулерену впровадити атом якої-небудь речовини (цей процес має назву «інтеркаляція», тобто «упровадження»), тоді це може змінити його електричні властивості, або навіть перетворити ізолятор у надпровідник!

А чи можна у такий самий спосіб змінити властивості нанотрубок? Виявляється, так. Учені змогли помістити всередину нанотрубки цілий ланцюжок з фулеренів із уже впровадженими в них атомами гадолінію. Електричні властивості такої незвичайної структури сильно відрізняється як від властивостей простої, порожньої нанотрубки, так і від властивостей нанотрубки з порожніми фулеренами всередині. Цікаво відзначити, що для таких сполук розроблені спеціальні хімічні позначення. Описана вище структура записується як $Gd@C60@SWNT$, що означає: Gd – усередині; C60 – усередині одношарової нанотрубки (SWNT – Single Wall NanoTube).

Ніякий інший матеріал з таким простим хімічним складом не має тих властивостей, які є у нанотрубок. Спектр їхнього можливого застосування дуже широкий. З нанотрубок можна робити, наприклад, унікальний дріг для мікроприладів. Унікаль-

ність його полягає в тому, що струм проходить по ньому практично без виділення тепла і досягає величезного значення – 10^7 А/см². Класичний провідник за таких значень миттєво б випарувався.

Розроблено також кілька застосувань нанотрубок у комп'ютерній індустрії. Вже в 2006 році з'явилися емісійні монітори із плоским екраном, які потрапляють на матриці з нанотрубок. Під дією напруги, яку прикладають до одного з кінців нанотрубки, інший кінець починає випускати електрони, які потрапляють на фосфоресцювальний екран і викликають світіння пікселя. Зерно зображення, яке виходить при цьому, є фантастично малим: порядку одного мікрметра!

Інший приклад: використання нанотрубок як голок скануючого мікроскопа, – як такі звичайно використовують гостро заточені вольфрамові або алмазні голки, вістря яких за атомними мірками є досить «грубими». Нанотрубка ж є ідеальною голкою діаметром порядку декількох атомів. Прикладаючи певну напругу, можна підхоплювати цілі молекули та атоми, які знаходяться на підкладці безпосередньо під голкою, і переносити їх з місця на місце.

Незвичайні електричні властивості нанотрубок у недалекому майбутньому зроблять їх одним із основних матеріалів наоелектроніки. На їхній основі вже виготовляють нові елементи для комп'ютерів. Ці елементи забезпечують зменшення пристроїв порівняно з кремнієвими на кілька порядків. Зараз активно обговорюється питання про те, яким чином розвиватиметься електроніка після того, як можливості подальшої мініатюризації електронних схем на основі традиційних напівпровідників будуть повністю вичерпані, що може відбутися у найближчі 5–6 років. Нанотрубкам приділяється у цьому питанні безперечно лідируюче положення серед перспективних претендентів на місце кремнію.

Ще одне застосування нанотрубок у наоелектроніці – створення напівпровідникових гетероструктур, тобто структур типу «метал-напівпровідник» або поєднання двох різних напівпровідників – нанотранзистори. Тепер для виготовлення такої

структури не потрібно буде вирощувати окремо два матеріали і потім «зварювати» їх один з одним. Усе, що потрібно – це в процесі росту нанотрубки створити в ній структурний дефект, наприклад, шляхом заміни одного з вуглецевих шестикутників п'ятикутником і просто по-особливому надломивши його посередині. Тоді одна частина нанотрубки матиме металеві властивості, а інша – властивості напівпровідників.

Нанотрубки – ідеальний матеріал для безпечного зберігання газів у їхніх внутрішніх порожнинах. У першу чергу це стосується до водню H_2 , який давно почали б використовувати як паливо для автомобілів, якби громіздкі, товстостінні, важкі і небезпечні балони для зберігання водню не позбавляли водень його головної переваги – великої кількості енергії, що виділяється на одиницю маси: на 500 км пробігу автомобіля потрібно всього близько 3 кг водню.

У зв'язку з тим, що запаси нафти на нашій планеті не нескінченні, то автомобіль на водневому паливі був би ефективним рішенням багатьох екологічних проблем. Тому, можливо, незабаром замість традиційного бензину нові водневі «бензобаки» з нанотрубками будуть заповнювати водневим паливом стаціонарно під тиском, а виймати – невеликим підігріванням такого «воднебака». Щоб перевершити звичайні газові балони за густиною запасеної енергії, потрібні нанотрубки з порожнинами відносно великого діаметра – більше 2–3 нм.

У нанотрубки можна не тільки «заганяти» атоми й молекули поодиноці, а й буквально «вливати» речовину. Як показали експерименти, відкрита нанотрубка має капілярні властивості, тобто вона ніби втягує в себе речовину. Таким чином, нанотрубки можна використовувати як мікроскопічні контейнери для перевезення і зберігання хімічно або біологічно активних речовин: білків, отрутих газів, компонентів палива і навіть розплавлених металів.

Потрапивши всередину нанотрубки, атоми або молекули вже не можуть вийти назовні: кінці нанотрубок надійно «запаяні», а вуглецеве кільце занадто вузьке для більшості атомів, щоб

«пролізти» через нього. У такому вигляді активні атоми або молекули можна безпечно транспортувати.

Ознайомившись із вищевикладеним матеріалом про фулени, у читача може виникнути запитання: «Яке відношення до інструментальних матеріалів мають фулени?». Дійсно, у даний момент вчені-інструментальники ще не провели таких досліджень. Але, на наш погляд, цей матеріал буде корисним для студентів з погляду загальної ерудиції та ознайомлення з новими досягненнями науки і техніки, зокрема у виробництві надтвердих і надміцних матеріалів, синтезованих з унікального хімічного елемента – вуглецю (С).

Питання для самоперевірки

1. Які алотропічні стани вуглецю Вам відомі?
2. Дайте визначення структурам графіту і алмазу.
3. Що таке ультрадисперсні (нанометричні) матеріали типу УДА.
4. Охарактеризуйте процеси синтезу та очищення УДА?
5. Охарактеризуйте властивості ультрадисперсних алмазів марок УДА-С, УДА-В та УДА-Г.
6. Призначення й переваги полірувальних речовин на основі УДА.
7. Призначення й переваги зносостійких композиційних електрхімічних покриттів на основі УДА.
8. Призначення й переваги антифрикційних присадок на основі УДА.
9. Що таке фулерен? Яка його структура?
10. Що таке інтеркаляція?
11. Що таке вуглецева нанотрубка, її структура?
12. Які властивості мають фулени і нанотрубки?
13. Що таке кластери фулеренів та як розшифрувати C₂₀, C₄₂, C₆₀, C₇₀, C₉₀?
14. Охарактеризуйте структуру молекули фулерену C₆₀.
15. Наведіть і охарактеризуйте діаграми міцності нанотрубок у порівнянні з високоміцною сталлю?
16. Які можливості в практичному застосуванні мають порожнини усередині фулеренових молекул і нанотрубок?

17. Де можуть знайти застосування фулерени і нанотрубки?
18. Охарактеризуйте процес синтезу і властивості вуглецевих наноструктур нового типу, що мають назву «нанобруньками».
19. Охарактеризуйте основні історичні етапи в розвитку нанотехнологій.

Слова та скорочення в розділі 8

УДА – ультрадисперсні алмази.

ВР – вибухові речовини.

Інтеркаляція – упродовження всередину фулерену атомів якої-небудь речовини.

Нанобрунька («NanoBuds») – одностінна нанотрубка з фулеренами, розташованими на нанотрубках подібно брунькам на гілках дерев.

Нанопорошок – порошки, що мають розміри порядку 5 – 20 нм.

Нанотрубка – це молекула, що має більше мільйона атомів вуглецю і є трубкою з діаметром близько нанометра і довжиною кілька десятків мікрометрів. У стінках трубки атоми вуглецю розташовані біля вершин правильних шестикутників.

Фулерен – назва молекули нової речовини на основі вуглецю – третього алотропного стану вуглецю (С). Перший стан – графіт, другий (алотроїн) стан вуглецю називається алмазом, чистий немолекулярний вуглець – це сажа.

9. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ З ВИВЧЕННЯ ТЕМИ

«ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ»

Однією з найважливіших умов, що забезпечують високу продуктивність процесу різання, є правильний вибір матеріалу різальної частини інструменту.

За своїми фізико-хіміко-механічними властивостями та принципами практичного використання всі інструментальні матеріали діляться на дві групи:

- інструментальні матеріали для лезових інструментів;
- інструментальні матеріали для абразивних інструментів.

Інструментальні матеріали можна класифікувати за схемою, наведеною на рис. 1.

Потрібно звернути увагу на те, що лише надтверді матеріали можуть використовуватися для виготовлення як лезових, так і абразивних інструментів. Інші ж використовуються або тільки для виготовлення лезових (інструментальні сталі, тверді сплави (металокераміка), різальна кераміка (мінералокераміка)) інструментів, або тільки для виготовлення абразивних (абразивні матеріали) інструментів.

Під час вивчення інструментальних матеріалів насамперед необхідно засвоїти, які властивості вони повинні мати, і розібратися в сутності поставлених до них вимог: високі міцність, твердість, теплостійкість і зносостійкість; технологічність (оброблюваність шліфуванням); сприятливі фрикційні (коефіцієнт тертя) та адгезійні (схоплювання) властивості; малі радіуси округлення різальних кромки ρ , що зумовлюють їхню гостроту; високі теплофізичні характеристики (теплопровідність, питома теплоємність); економічність (вартість) та ін. Необхідно звернути дуже серйозну увагу на різальні властивості (твердість, теплостійкість, значення ρ , швидкості різання, які допускаються (при обробці найбільш застосовуваних як конструкційні, так званих «чорних» металів: конструкційних сталей і чавунів) та галузі застосування різних інструментальних матеріалів.

Необхідно звернути серйозну увагу й на те, що працездатність різального інструменту у визначальному ступені залежить від фізико-механічних, теплофізичних і кристало-хімічних властивостей інструментального матеріалу. Оптимальний вибір цих властивостей дозволяє у відомих межах керувати процесами зношування контактних площадок леза, знижувати інтенсивність їхнього зношування, трансформувати один вид зношування в інши.

Відповідно до вимог, що ставлять до інструментального матеріалу, вибір властивостей і конкретної марки матеріалу потрібно робити з урахуванням умов обробки, які визначаються властивостями оброблюваного матеріалу і характером контактної взаємодії інструментального та оброблюваного матеріалів у процесі різання.

За своїми фізико-хіміко-механічними властивостями інструментальні матеріали для лезових інструментів підрозділяються на п'ять основних груп: інструментальні сталі (нелеговані (вуглецеві), леговані й швидкорізальні); металокерамічні тверді сплави (однокарбідні (ВК), двокарбідні (ТК), трикарбідні (ТТК), безвольфрамові тверді сплави (БВТС)); різальна кераміка (оксидна, оксидно-карбідна й оксидно-нітридна, нітридна) та надтверді матеріали (НТМ) на основі синтетичного алмазу (АС) і кубічного нітриду бору (КНБ)).

Потрібно мати на увазі, що під час використання навчальної і довідкової літератури рекомендується перевіряти відповідність інструментальних матеріалів, які наводяться у ній, до діючих стандартів (ДСТУ або ГОСТ): на вуглецеві інструментальні сталі – ДСТУ 3833-98 (ГОСТ 1435 - 99), на леговані інструментальні сталі – ГОСТ 5950-2000, на швидкорізальні сталі – ГОСТ 19265-73, на тверді сплави – ГОСТ 3882-74 та ін.

У якості **інструментальних сталей** для інструментів, що працюють у механізованих процесах використовуються тільки високоякісні сталі зі вмістом вуглецю в межах 0,7–1,3%. Ці сталі у своєму позначенні мають літеру А (У7А, У8А, ..., У12А).

Нелеговані (вуглецеві) інструментальні сталі (твердість НРС 60-62, теплостійкість 200–250°C, $\rho=2\text{--}5\text{мкм}$) використовую-

ються, як правило, для виготовлення інструментів, які застосовуються для ручних робіт (мігчиків, плашок, ножікових полотен, свердел та ін.) з малими швидкостями різання (до 5–10 м/хв).

Вивчаючи *леговані інструментальні сталі* (твердість HRC 62-64, теплостійкість 250-300 °С, $\rho=5-10$ мкм), потрібно з'ясувати, як впливають легуючі елементи (хром, кремній, марганець, вольфрам та ін.) на властивості цих сталей. Леговані інструментальні сталі порівняно з вуглецевими інструментальними мають більш високу прогартовуваність, підвищену в'язкість у загартованому стані, меншу схильність до деформацій і появи тріщин при загартуванні. Застосовуються для виготовлення протязок, свердел, зенкерів, мігчиків, плашок, розгорток та ін., що працюють при швидкостях різання до 15–25 м/хв.

Швидкорізальні інструментальні сталі (твердість HRC 62-65, теплостійкість 600–650 °С, $\rho=20-30$ мкм) за ГОСТ 19265-73 мають 14 різних марок. У наш час багато з них не виробляється або випуск обмежений, зокрема, сталь P18. До практичного застосування рекомендуються наступні стандартні марки швидкорізальних сталей: P6M5 (як, правило, замість сталі P18), P6M5K5, P9M4K8 і деякі інші. Під час вивчення швидкорізальних сталей потрібно засвоїти вплив карбідотвірних елементів (вольфраму, молібдену, ванадію та ін.) на їхні властивості. Зі швидкорізальних сталей виготовляється практично вся номенклатура лезових різальних інструментів (різці, фрези, протязки, свердла, зенкери, мігчики, плашки, розгортки та ін.), які працюють при швидкостях різання до 50–60 м/хв. У наш час усе більше застосування, особливо при обробці важкооброблюваних матеріалів, знаходять швидкорізальні сталі, мікролеговані ніобієм (P6M5Nb), цирконієм (P6M5Zn) та азотом (A10P6M5), які мають підвищену теплостійкість (до 670–700 °С), твердість (HRC 65-67) і зносостійкість. При обробці жароміцних і титанових сплавів застосовують мало- і безвуглецеві швидкорізальні (дисперсійно-твердіючі) сплави B11M7K23, B14M7K25 та ін., які мають підвищену твердість (до HRC 69-70), теплостійкість (до 720 °С) і зносостійкість (стійкість інструментів із цих матеріалів зростає в

30 разів порівняно з P18 і в 10 разів – із BK8). У зв'язку з більшою витратою дефіцитного вольфраму все більше застосування знаходять безвольфрамові швидкорізальні сталі, наприклад, 9Х6МЗФЗАГСТ (ЕК41), які мають досить високі «різальні» властивості: твердість (HRC 63–66), теплостійкість (620 °С) і міцність ($\sigma_T=3200\text{--}3800$ МПа). При виготовленні складнопрофільних інструментів, наприклад, свердел, працездатність яких значною мірою визначається ступенем рівномірності розподілу карбідів по поперечному перерізу, доцільне застосування порошкових швидкорізальних сталей (P6M5 – МП, P6M5K5 – МП та ін.), бал карбідної неоднорідності в яких 1–2, і характеризуються вони підвищеними пластичністю при холодному і гарячому деформуванні, зносостійкістю та міцністю ($\sigma_T=5000\text{--}7000$ МПа), хорошою шліфованістю. Вони дозволяють працювати з більшими подачами й ударними навантаженнями навіть при обробці матеріалів з підвищеною твердістю (HRC 38–42). Перспективними при обробці важкооброблюваних матеріалів є й порошкові карбідосталі (P6M5 – КТ20, P6M5K5 – КТ20 та ін.), у яких рівномірно розподілені зерна тугоплавких карбідів (переважно TiC), що забезпечує істотне поліпшення шліфованості та підвищення зносостійкості інструментів, виготовлених із цих матеріалів. Наприклад, при фрезеруванні жароміцних сталей і сплавів стійкість фрез зростає в 10 і більше разів порівняно зі стійкістю інструментів, виготовлених зі сталі P18.

За ДСТУ 3882-74 **металокерамічні тверді сплави** (твердість HRA 88–92, теплостійкість 800–1100 °С, $\rho=40\text{--}50$ мкм) діляться на 3 підгрупи: однокорбідні (BK), які складаються з кобальту (зв'язка) і карбідів вольфраму (WC + Co); двокорбідні (TK), які складаються з кобальту, карбідів вольфраму та титану (WC + TiC + Co), і трикарбідні (ТТК), що складаються з кобальту і карбідів вольфраму, титана та танталу (WC + TiC + TaC + Co). Наприклад, склад твердого сплаву BK8 – 8% Co і 92% WC; T15K6 – 6% Co, 15% TiC, 79% WC; TT7K12 – 12% Co, 7% – карбідів титану і танталу (приблизно нарівно) і 81% WC. Студентам необхідно вивчити призначення основних марок металокерамічних твердих сплавів, їхній хімічний склад, вплив різних карбідів

на механічні й різальні властивості. Потрібно також з'ясувати роль кобальту, карбідів і зернистості у формуванні властивостей твердих сплавів. Із твердих сплавів виготовляється також практично вся номенклатура лезового різального інструменту, але найчастіше їх застосовують для різальних частин (пластинок) різців, торцевих фрез, кільцевих свердел та ін., які працюють при швидкостях різання до 250–300 м/хв. **Група ВК** має переважне застосування при обробці крихких матеріалів (чавуну), кольорових, неметалевих і важкооброблюваних матеріалів (нержавіючих сталей, жароміцних і титанових сплавів та ін.), **група ТК** – при обробці конструкційних сталей (вуглецевої, легованої і загартованої), **група ТТК** – при обробці важкооброблюваних матеріалів. У наш час все більше уваги приділяється розробленню **безвольфрамових твердих сплавів**, що містять карбіди (TiC) і карбонітриди (TiCN) титане та карбіди (Ti – Nb)C на нікелевій (Ni) і нікель-молібденовій (MoNi) зв'язках. У виробництві використовуються безвольфрамкові тверді сплави ТМ1, КНТ 16, ТН 20, ТНМ І30 та ін., які показують хороші результати при обробці як «чорних» (конструкційних сталей і чавунів), так і кольорових металів (мідь, алюміній та ін.) і сплавів (латунь, бронза та ін.), а також неметалевих матеріалів (дерево, пластмаси, склопластик та ін.). Характерними рисами безвольфрамових твердих сплавів є їх значно менша густина (у середньому 5,8 г/см³) порівняно з вольфрамомісними твердими сплавами (12,5–14,5 г/см³) і підвищена зносостійкість (наприклад, у порівнянні із ТК в 1,2–1,5 раза). Підвищені міцність ($\sigma_T=1500$ МПа) і зносостійкість (в 1,5–3 рази) мають також дрібнозернисті (розміри зерен 0,5–1,5 мкм) і особливодрібнозернисті (не менше 70% зерен мають розміри менше 1,0 мкм) тверді сплави (ВК6-М, ВК3-ОМ та ін.), а також тверді сплави, леговані хромом (ВК6-ХОМ, ВК10-ХОМ та ін.). Ці сплави дозволяють підвищити стійкість інструментів до 3–4 разів.

Під час вивчення **мінералокерамічних інструментальних матеріалів** студенти повинні звернути увагу на те, що вони, маючи відносно хороші різальні властивості (твердість 92–94 HRA, теплостійкість 1100–1200 °С), належать до категорії

найлегших (щільність 3,2–4,1 г/см³) і найдешевших інструментальних матеріалів, тому що їхню основу становить оксид алюмінію Al₂O₃, сировиною для якого є технічний глинозем. Основними недоліками мінералокераміки є її крихкість і відносно невелика межа міцності на вигин ($\sigma_T=300\text{--}700$ МПа). Мінералокерамічні інструментальні матеріали, які одержані методами холодного або гарячого пресування, діляться на три підгрупи: 1) оксидна кераміка ($\geq 99\%$ Al₂O₃) – ЦМ 332 або з добавками MgO ($\leq 1\%$) – ВО-13 (біла) і ВШ-75 (чорно-сіра); 2) змішана (кермети) оксидно-карбідна кераміка (чорна), яка складається з оксидів алюмінію ($\geq 60\%$) і карбідів TiC, WC та ін. (до 40%) або нітриду титану (кортині ОНТ 20) і яка має порівняно зі ЦМ 332 більшу міцність σ_T (в 1,5–2 рази), але трохи меншу твердість (на 1-2 НРА) – В-3, ВОК-60, ВОК-63; 3) безоксидна (на основі нітриду кремнію) – силініт – Р (Si₃N₄+TiN). Мінералокераміка допускає швидкість різання в 1,5–5 разів вищу, ніж тверді сплави, наприклад, Т30К4 або ВК3-М. Особливо ефективна мінералокераміка для інструментів, від яких потрібна висока розмірна стійкість. Кермети можуть застосовуватися при чистовій і напівчистовій швидкісній (до 600–800 м/хв) обробці сталей, у тому числі загартованих, і високоміцних чавунів у переривчастих умовах різання, наприклад, при фрезеруванні.

Під час вивчення **надтвердих інструментальних матеріалів** (НТМ) необхідно звернути увагу на те, що з них виготовляються як інструменти для абразивної обробки (шліфувальні кола, бруски, порошки і пасти), так й інструменти для лезової обробки (різці, фрези, свердла та ін.), які застосовуються в різних технологічних операціях (шліфування, хонінгування, свердління, точіння, фрезерування, вигладжування, правка, доведення та ін.) при обробці різних конструкційних матеріалів (чорних і кольорових металів, важкооброблюваних сталей, твердих сплавів, скла, кераміки, пластмас та ін.). На сьогодні інструментальна промисловість випускає дві групи синтетичних НТМ, які мають малі радіуси округлення різальних кромки ($\rho=1,2\text{--}2,5$ мкм) і

високу теплопровідність (в 2,5–5 разів більше, ніж у твердих сплавах):

1) на основі вуглецю С освоєний випуск заготовок (циліндрів) діаметром більше 8 мм із *полікристалічних алмазів*, які одержані у результаті фазового переходу графіту в алмаз (АСПК (карбонадо), АСБ (балас)) і полікристалів алмазу, які одержані спіканням алмазних зерен (СКМ, карбоніт, СВБН та ін.), що можна використати для виготовлення лезових інструментів. Вони застосовуються, як правило, для чистової обробки кольорових металів і неметалевих матеріалів;

2) на основі кубічного нітриду бору BN (кубоніт, ельбор, борузон), який використовують для виготовлення як абразивних (ЛО, ЛП та ін.), так і лезових інструментів (діаметром і довжиною до 12 мм) – *композити*: композит 01 (ельбор – РМ), композит 02 (Білбор), композит 05, композит 09 (ПТНБ), композит 10 (гексанит – Р), кіборит, амборит, ніборит. НТМ на основі нітриду бору мають твердість на 10–20% меншу, ніж у НТМ на основі алмазу (теплостійкість 700–800 °С; мікротвердість $\approx 10^5$ МПа, що в 3–6 разів більше, ніж у твердих сплавів), але значно більше теплостійкість (до 1300 °С). Композити практично інертні до чорних металів, у той час як алмази проявляють стосовно них значну активність при високих тисках і температурах, що мають місце в зоні різання. Композит 01 застосовується при безударній чистовій обробці загартованих сталей, композит 05 – при напівчистовій і чистовій обробках загартованих сталей і чавунів, композит 10 може застосовуватися при напівчистовій і чистовій обробках переривчастих поверхонь деталей із загартованих сталей та чавунів.

Необхідно звернути увагу на те, що вчені та виробничники ведуть інтенсивний пошук як нових інструментальних матеріалів, які мають підвищені різальні властивості або не утримують у своєму складі гостродефіцитних і дорогих елементів, так і нових шляхів удосконалення вже досить широко застосовуваних у практиці інструментального виробництва матеріалів.

Аналіз основних напрямків *удосконалення інструментальних матеріалів* для лезових інструментів дозволяє відзначи-

ти, що вони пов'язані із зростанням твердості, теплостійкості, зносостійкості, але, як правило, при зниженні міцнісних характеристик, в'язкості й тріщиностійкості. Ці тенденції значною мірою не відповідають ідеї створення інструментального матеріалу з «ідеальними» властивостями, тобто з оптимальним поєднанням властивостей за твердістю, теплостійкістю, ударною в'язкістю, тріщиностійкістю, міцністю та ін. Очевидно, що рішення цієї проблеми повинне бути пов'язане з розробленням якогось композиційного інструментального матеріалу, у якого високі значення поверхневої твердості, теплостійкості, фізико-хімічної інертності до оброблюваного матеріалу поєднувалися б із досить високими значеннями об'ємної міцності при вигині, ударній в'язкості та межі витривалості. У зв'язку із цим у світовій практиці все більшого застосування знаходять різноманітні методи вдосконалення інструментальних матеріалів, особливо під час виробництва змінних багатогранних пластин (ЗБП) для механічного кріплення на різальному інструменті. У наш час уже розроблені особливодрібнозернисті тверді сплави, нові марки надтвердих матеріалів, як правило, полікристалічної будови, кераміки (кермети, силініт та ін.), безвольфрамових твердих сплавів і швидкорізальних сталей, створені методи зміцнювальної обробки пластичним деформуванням, а також хіміко-термічного, магнітно-імпульсного, лазерного зміцнення та ін. Особливе місце займають методи вдосконалення інструментальних матеріалів, спрямовані на зміну їх експлуатаційних (різальних) властивостей шляхом нанесення зносостійких покриттів.

Під час вивчення розділу «**Інструментальні матеріали зі зносостійкими покриттями**» варто звернути увагу на те, що нанесення зносостійких покриттів на інструментальні матеріали дозволяє наблизитися до вирішення завдання створення «ідеального» інструментального матеріалу, що має високу зносостійкість у поєднанні з достатньою міцністю та в'язкістю. Покриття варто розглядати як своєрідне «третє середовище», що, з одного боку, може помітно змінювати поверхневі властивості інструментального матеріалу, з іншого боку – впливати на контактні процеси, деформації, сили і температури різання, спрямованість

теплових потоків, термодинамічний напружений стан різальної частини інструменту та ін. Варто звернути увагу також і на те, що кристалохімічна будова покриття, його фізико-механічні й теплофізичні властивості можуть значно відрізнятись від відповідних властивостей інструментального та оброблюваного матеріалів. Задаючи властивості покриття шляхом варіювання його хімічним складом і будовою, можна змінювати основні характеристики процесу різання і, в кінцевому підсумку, керувати найважливішими вихідними параметрами процесу – зношенням інструменту і якістю поверхневого шару оброблюваних деталей. Крім того, процес нанесення покриття дозволяє спрямовано впливати на поверхневі дефекти інструментального матеріалу, що в поєднанні з можливістю формування стабільних характеристик покриття може сприяти помітному підвищенню надійності інструменту. Потрібно звернути особливу увагу на вибір методу нанесення покриття на робочі поверхні леза інструменту, тому що він є однією з визначальних умов забезпечення високої працездатності інструменту з покриттям. При цьому досить важливим є забезпечення можливості відтворення заданих хімічного складу, властивостей і структури покриття, його товщини і ступеня «утримання» на матриці за обраним методом.

Таким чином, різальний лезовий інструмент із покриттям може задовольняти найвищі вимоги, які ставляться до якості, продуктивності й надійності процесу обробки деталі як з металевих, так і неметалевих матеріалів.

Під час вивчення розділу «**Характеристики і матеріали абразивних інструментів**» необхідно мати на увазі, що абразивне оброблення використовується практично в усіх галузях промисловості для забезпечення високої якості та точності оброблених поверхонь. Розширення у сьогоdnішнього застосування високоміцних, жаростійких, нержавіючих, титанових сталей і сплавів, композиційних конструкційних матеріалів із вимогою одержання високого квалітета, малої шорсткості та взаємозамінності зумовлюють усе більше використання різноманітних абразивних матеріалів. Застосування нових способів виготовлення заготовок (порошкова металургія, виливання під тиском, виливання за виплавлюва-

ними моделями, формоутворення вибухом та ін.) дає змогу наблизити їхні габаритні розміри до розмірів готових деталей і в подальшому використовувати тільки абразивне оброблення, яке практично реалізується як абразивами у зв'язаному вигляді (абразивні інструменти – круги, бруски, сегменти тощо), так і вільним абразивом. При обробленні зв'язаним абразивом абразивні зерна (леза інструменту) за допомогою додаткового матеріалу (зв'язки) достатньо міцно між собою «зв'язані» (закріплені) у єдиному інструменті, який має відповідну форму, розміри та геометрію, тобто абразивні зерна у цьому інструменті не можуть одне відносно одного переміщатися, повертатися тощо. Структура такого абразивного інструменту складається із абразивних зерен, зв'язки з наповнювачем та пор. Потрібно звернути увагу на те, що властивості абразивних інструментів характеризуються *родом (матеріалом) абразивних зерен, зернистістю, видом зв'язки, твердістю, номером структури, типом інструменту, розмірами.*

Усі абразивні матеріали умовно можна розбити на дві великі групи: 1) ***абразивні матеріали природного*** (корунд, наждак, кварц, креміль) та ***штучного*** (різні електрокорунди, карбіди кремнію, карбід бору й ін.) походження; 2) ***надтверді абразивні матеріали природного (алмаз) та штучного (синтетичні надтверді матеріали: а) на основі алмазу, б) на основі кубічного нітриду бору)*** походження. Студентам необхідні добре засвоєні механічні та теплофізичні властивості різних абразивних матеріалів, їх поділ (класифікацію) за зернистістю, що характеризує розміри абразивних зерен, умовні позначення і галузі їх ефективного використання. Потрібно добре розібратися із такими характеристиками абразивних інструментів (зі зв'язаним абразивом), як: *твердість* (сила, з якою абразивне зерно утримується зв'язкою, тобто це умовне позначення здатності зв'язки утримувати зерна в інструменті); *зв'язка* (неорганічна, органічна та металева); *структура* (співвідношення об'ємів зерен, зв'язки та пор). Необхідно мати на увазі що для абразивних інструментів із надтвердих матеріалів використовується така важлива характеристика, як *концентрація*, що характеризує об'ємний вміст у них алмазних або кубонітових (ельборових) зерен, причому

за 100% концентрацію взято вміст 4,4 кар. (0,88 г) в 1 см^3 робочого шару, що становить 25% об'єму робочого шару незалежно від виду зв'язки.

Абразивні інструменти поділяються за формою (шліфувальні круги, головки, сегменти, бруски), типом і розмірами, наприклад, стандартом ГОСТ 2424-75 передбачено випуск 22 форм абразивних шліфувальних кругів (діаметром від 3 до 1060 мм) 14 типів. Абразивні інструменти можуть виготовлятися як цільними, так і збірними. Інструменти з традиційних абразивних матеріалів виготовляються у своїй переважній більшості цільними методами так званої порошкової металургії, тобто пресуванням і відповідним термічним обробленням. Основною конструктивною особливістю абразивних інструментів є наявність корпусу (найчастіше з алюмінієвого сплаву АК6 або Д16, сталі, пластмаси, кераміки, тканини) і робочого шару з НТМ, що може бути суцільним, переривчастим і багатошаровим з різними зернистістю й концентрацією алмазів чи кубаніту (ельбору). Студентам потрібно добре ознайомитися із особливостями виготовлення алмазо- та кубанітоабразивних інструментів.

Останніми роками проводиться робота з **поліпшення якості абразивного інструменту** як за рахунок покращання різальних властивостей традиційних абразивних матеріалів (наприклад, легування електрокорунду шляхом уведення в нього присадок окису титану й хрому, зменшення в абразивних матеріалах шкідливих домішок тощо), так і істотного розширення впровадження процесів абразивного оброблення інструментами з НТМ (синтетичних алмазів та ельбору (кубаніту)). Висока конкурентоспроможність та ефективність абразивних інструментів з НТМ гарантують їх неодмінну реалізацію у високих технологіях для машинобудування. Дуже важливим для використання потенційних можливостей НТМ є вдосконалення геометрії робочого шару й конструкції абразивного інструменту. Наприклад, переривчасті круги застосовуються не лише для усунення ударних навантажень і вібрацій, оскільки забезпечують практично сталу (квазісталу) площу контакту робочої поверхні абразивного інструменту й оброблюваного виробу, а й істотного зниження теплової й динамічної напруженості процесу абразивної

обробки, виключення браку виробів, підвищення продуктивності обробки й зносостійкості оброблюваних виробів. Змінюючи конструктивні елементи інструменту з переривчастою й ексцентрично розташованою робочими поверхнями, можна управляти термічним режимом шліфування, знизити середню контактну температуру в зоні різання. Застосування багатошарових і збірних кругів розширює технологічні можливості інструменту, дозволяє об'єднати процеси попереднього й остаточного шліфування в одну операцію, підвищити продуктивність, досягти зростання зносостійкості абразивних кругів, знизити шорсткість обробленої поверхні.

Останніми роками все частіше під час виготовлення абразивних інструментів використовують суміші порошків різних абразивних матеріалів. Доведено, що наявність додаткового абразивного матеріалу в суміші поліпшує якість обробленої поверхні. Зазвичай у такі суміші додатково вводять абразивний матеріал, зернистість якого менша або дорівнює зернистості основного абразивного порошку. Наприклад, деякі алмазні пасти містять карбід кремнію меншої зернистості, ніж алмаз. В ІНМ НАН України проведені дослідження фізико-механічних характеристик складів паст, які, з метою зниження витрат порошку з НТМ і вартості пасти, містять суміші порошків кубоніту й карбиду бору. При обробці оптичних деталей і багатьох деталей електронної техніки найбільш перспективними виявились абразивні інструменти зі зв'язаними у складі полімерних і металевих зв'язок абразивом та алмазом.

Одним з важливих резервів залежно від характеристики інструменту й умов обробки є забезпечення оптимальної сталості й міцності закріплення зерен НТМ у робочому шарі. У ІНМ НАН України для ефективного виконання цієї умови розроблені технологічні процеси нанесення на порошки НТМ скло- і металопокриттів.

Розділ **«Перспективи створення нових матеріалів на основі вуглецю, зокрема інструментальних»** буде корисним для студентів з погляду їхньої загальної ерудиції та ознайомлення з новими досягненнями науки і техніки, у тому числі й у виробництві надтвердих і надміцних матеріалів, синтезованих з унікального хімічного елемента – вуглецю (C).

ТИПОВІ ТЕСТИ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ І МОДУЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ЗНАТЬ

- 1 Основні хімічні складові сталі У7А:
 - 1) 0,7 % вуглецю, 1% азоту, решта – залізо;
 - 2) 0,7 % вуглецю, решта – залізо;
 - 3) 7% вуглецю, решта – залізо;
 - 4) 7% вуглецю, 1% азоту, решта – залізо;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 2 Основні хімічні складові сталі У10А:
 - 1) 1,0 % вуглецю, 1% азоту, решта – залізо;
 - 2) 1,0 % вуглецю, решта – залізо;
 - 3) 10% вуглецю, решта – залізо;
 - 4) 10% вуглецю, 1% азоту, решта – залізо;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 3 Основні хімічні складові сталі 9ХС:
 - 1) 1,0 % вуглецю, 9% хрому, 1% кремнію, решта – залізо;
 - 2) 0,9 % вуглецю, 1% хрому, 1% кремнію, решта – залізо;
 - 3) 9,0 % вуглецю, 1% хрому, 1% кремнію, решта – залізо;
 - 4) 9,0 % вуглецю, 1% хрому, 1% кремнію, решта – залізо;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 4 Основні хімічні складові сталі Х6ВФ:
 - 1) 1,0 % вуглецю, 6% хрому, 1% вольфраму, 1% ванадію, решта – залізо;
 - 2) 1,0 % вуглецю, 6% хрому, 1% вольфраму, 1% ванадію, решта – залізо;
 - 3) 1,0 % вуглецю, 1% хрому, 6% вольфраму, 1% ванадію, решта – залізо;
 - 4) 1% хрому, 6% вольфраму, 1% ванадію, решта – залізо;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 5 Основні хімічні складові сталі 11ХФ:
 - 1) 1,0 % вуглецю, 11% хрому, 1% ванадію, решта – залізо;
 - 2) 11 % вуглецю, 1% хрому, 1% ванадію, решта – залізо;
 - 3) 1,1 % вуглецю, 1% хрому, 1% ванадію, решта – залізо;
 - 4) 11% хрому, 1% ванадію, решта – залізо;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 6 Основні хімічні складові сталі 9Х5ВФ:
 - 1) 0,9 % вуглецю, 1% хрому, 5% вольфраму, 1% ванадію, решта – залізо;
 - 2) 1,0 % вуглецю, 9% хрому, 5% вольфраму, 1% ванадію, решта – залізо;
 - 3) 1,0 % вуглецю, 9% хрому, 5% вольфраму, 1% ванадію, решта – залізо;
 - 4) 9% хрому, 5% вольфраму, 1% ванадію, решта – залізо;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 7 Основні хімічні складові сталі 10Р6М5:
 - 1) 10% вуглецю, 6% вольфраму, 5% молібдену, решта – залізо;
 - 2) 1,0% вуглецю, 6% вольфраму, 5% молібдену, решта – залізо;
 - 3) 1,0% вуглецю, 6% титану, 5% молібдену, решта – залізо;
 - 4) 10% вуглецю, 6% вольфраму, 5% магнію, решта – залізо;
 - 5) правильної відповіді немає.

- 8 Основні хімічні складові сталі Р6М3:
- 1) 1,0% вуглецю, 6% ванадію, 3% молібдену, решта – залізо;
 - 2) 1,0% вуглецю, 6% вольфраму, 3% магнію, решта – залізо;
 - 3) 1,0% вуглецю, 6% титану, 3% молібдену, решта – залізо;
 - 4) 1,0% вуглецю, 6% вольфраму, 3% марганцю, решта – залізо;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 9 Основні хімічні складові сталі Р14Ф4:
- 1) 10% вуглецю, 14% вольфраму, 4% молібдену, решта – залізо;
 - 2) 1,0% вуглецю, 14% вольфраму, 4% магнію, решта – залізо;
 - 3) 1,0% вуглецю, 14% титану, 4% молібдену, решта – залізо;
 - 4) 1,0% вуглецю, 14% вольфраму, 4% ванадію, решта – залізо;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 10 Основні хімічні складові сталі Р9Ф5:
- 1) 10% вуглецю, 9% вольфраму, 5% молібдену, решта – залізо;
 - 2) 1,0% вуглецю, 9% вольфраму, 5% ванадію, решта – залізо;
 - 3) 1,0% вуглецю, 9% титану, 5% молібдену, решта – залізо;
 - 4) 1,0% вуглецю, 9% вольфраму, 5% магнію, решта – залізо;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 11 Основні хімічні складові сталі Р6М5К5:
- 1) 10% вуглецю, 6% вольфраму, 5% молібдену, 5% кобальту, решта – залізо;
 - 2) 1,0% вуглецю, 6% вольфраму, 5% магнію, 5% кобальту, решта – залізо;
 - 3) 1,0% вуглецю, 6% титану, 5% молібдену, 5% кобальту, решта – залізо;
 - 4) 1,0% вуглецю, 6% вольфраму, 5% молібдену, 5% кобальту, решта – залізо;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 12 Основні хімічні складові сталі Р10К5Ф5:
- 1) 10% вуглецю, 10% вольфраму, 5% ванадію, 5% кобальту, решта – залізо;
 - 2) 1,0% вуглецю, 10% вольфраму, 5% ванадію, 5% кобальту, решта – залізо;
 - 3) 1,0% вуглецю, 10% титану, 5% молібдену, 5% кобальту, решта – залізо;
 - 4) 1,0% вуглецю, 10% вольфраму, 5% молібдену, 5% кобальту, решта – залізо;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 13 Основні хімічні складові сталі Р9М4К8:
- 1) 10% вуглецю, 9% вольфраму, 4% молібдену, 8% кобальту, решта – залізо;
 - 2) 1,0% вуглецю, 9% вольфраму, 4% магнію, 8% кобальту, решта – залізо;
 - 3) 1,0% вуглецю, 9% титану, 4% молібдену, 8% кобальту, решта – залізо;
 - 4) 1,0% вуглецю, 9% вольфраму, 4% марганцю, 8% кобальту, решта – залізо;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 14 Основні хімічні складові сплаву Т5К12:
- 1) 1% вуглецю, 5% титана, 12% карбід ванадію, решта – карбід вольфраму;
 - 2) 5% титана, 12% карбід ванадію, решта – карбід вольфраму;
 - 3) 5% карбід титану, 12% кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 4) 1% вуглецю, 5% карбід титану, 12% кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 15 Основні хімічні складові сплаву Т14К8:
- 1) 1% вуглецю, 14% титана, 8% карбід кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 2) 14% карбід титану, 8% кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 3) 14% титану, 8% карбід кобальту, решта – карбід вольфраму;

- 4) правильної відповіді немає.
- 5) 1% вуглецю, 14% карбиду титану, 8% кобальту, решта – карбід вольфраму
- 16 Основні хімічні складові сплаву КНТ-16:
 - 1) 74% титана, 16% - кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 2) 79% карбиду титану, 16% нікелю, решта – молібден;
 - 3) 74% карбонітрида титану, 19,5% – нікель, решта – молібден;
 - 4) 74% карбонітрида титану, 16% – нікель, решта – молібден;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 17 Основні хімічні складові сплаву Т30К4:
 - 1) 1% вуглецю, 30% титану, 4% карбиду ванадію, решта – карбід вольфраму;
 - 2) 30% титана, 4% карбід ванадію, решта – карбід вольфраму;
 - 3) 30% карбиду титану, 4% кобальту, решта – залізо;
 - 4) 1% вуглецю, 30% карбиду титана, 4% кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 18 Основні хімічні складові сплаву ТТ20К9:
 - 1) 1% титана, 19% танталу, 9% карбиду кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 2) 1% вуглецю, 20% карбиду титану, 9% кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 3) 20% карбідів титану і танталу, 9% кобальту, решта – карбід вольфраму
 - 4) 20% титану і танталу, 9% карбиду кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 19 Основні хімічні складові сплаву ТТ7К12:
 - 1) 1% титану, 7% танталу, 12% карбиду ванадію, решта – карбід вольфраму;
 - 2) 7% титану і танталу, 12% карбиду ванадію, решта – карбід вольфраму;
 - 3) 1% вуглецю, 7% карбиду титану, 12% кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 4) 7% карбідів титану і танталу, 12% кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 20 Основні хімічні складові сплаву ВК8В:
 - 1) 1% вуглецю, 8% вольфраму, 8% карбиду кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 2) 8% кобальту, 1% вольфраму, решта – карбід титана;
 - 3) 8% кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 4) 8% карбиду титану, 8% кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 21 Основні хімічні складові сплаву ВК3М:
 - 1) 1% вуглецю, 3% вольфраму, 3% карбиду кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 2) 3% кобальту, 1% вольфраму, решта – карбід ванадію;
 - 3) 3% кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 4) 3% карбиду титану, 1% молібдену, решта – карбід вольфраму;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 22 Основні хімічні складові сплаву ВК4-0М:
 - 1) 1% вуглецю, 4% вольфраму, решта – карбід титану;
 - 2) 4% кобальту, 1% вольфраму, решта – карбід ванадію;
 - 3) 4% кобальту, решта – карбід вольфраму;
 - 4) 1% вольфраму, 4% кобальту, решта – карбід молібдену;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 23 Основні хімічні складові електрокорунду білого:
 - 1) SiO_2 ;
 - 2) Al_2O_3 ;
 - 3) B_4C ;

- 4) SiC;
5) правильної відповіді немає.
- 24 Основні хімічні складові електрокорунду нормального:
1) SiO₂;
2) B₄C;
3) Al₂O₃;
4) SiC;
5) правильної відповіді немає.
- 25 Основні хімічні складові корунду:
1) SiO₂;
2) B₄C;
3) SiC;
4) Al₂O₃;
5) правильної відповіді немає.
- 26 Основні хімічні складові наждаку:
1) Al₂O₃;
2) B₄C;
3) SiO₂;
4) SiC;
5) правильної відповіді немає.
- 27 Основні хімічні складові кварцу:
1) Al₂O₃;
2) B₄C;
3) SiO₂;
4) SiC;
5) правильної відповіді немає.
- 28 Основні хімічні складові кремнію:
1) Al₂O₃;
2) B₄C;
3) SiO₂;
4) SiC;
5) правильної відповіді немає.
- 29 Основні хімічні складові карбіду кремнію (зеленого):
1) Al₂O₃;
2) B₄C;
3) SiO₂;
4) SiC;
5) правильної відповіді немає.
- 30 Основні хімічні складові карбіду кремнію (чорного):
1) SiO₂;
2) B₄C;
3) SiC;
4) Al₂O₃;
5) правильної відповіді немає.
- 31 Основні хімічні складові алмазу:
1) SiO₂;
2) B₄C;
3) SiC;

- 4) Al_2O_3 ;
5) правильної відповіді немає.
- 32 Основні хімічні складові ельбору:
1) SiO_2 ;
2) B_4C ;
3) SiC ;
4) Al_2O_3 ;
5) правильної відповіді немає.
- 33 Основні хімічні складові кубоніту:
1) SiO_2 ;
2) B_4C ;
3) SiC ;
4) Al_2O_3 ;
5) правильної відповіді немає.
- 34 Який з перелічених матеріалів має найбільшу твердість?
1. SiO_2 ;
2. B_4C ;
3. SiC ;
4. Al_2O_3 ;
5. правильної відповіді немає.
- 35 Який з перелічених матеріалів має найменшу твердість?
1) SiO_2 ;
2) B_4C ;
3) SiC ;
4) Al_2O_3 ;
5) правильної відповіді немає.
- 36 Який з перелічених матеріалів має найбільшу твердість?
1) електрокорунд нормальний;
2) електрокорунд білий;
3) карбід кремнію (чорний);
4) карбід кремнію (зелений);
5) правильної відповіді немає.
- 37 Який з перелічених матеріалів має найменшу твердість?
1) електрокорунд нормальний;
2) електрокорунд білий;
3) карбід кремнію (чорний);
4) карбід кремнію (зелений);
5) правильної відповіді немає.
- 38 Який з перелічених сплавів має найбільшу міцність?
1) ВК2;
2) ВК4;
3) ВК6;
4) ВК8;
5) ВК10.
- 39 Який з перелічених сплавів має найбільшу твердість?
1) ВК2;
2) ВК4;
3) ВК6;

- 4) ВК8;
 - 5) ВК10.
- 40 Який з перелічених сплавів має найменшу міцність?
- 1) ВК2;
 - 2) ВК4;
 - 3) ВК6;
 - 4) ВК8;
 - 5) ВК10.
- 41 Який з перелічених сплавів має найменшу твердість?
- 1) ВК2;
 - 2) ВК4;
 - 3) ВК6;
 - 4) ВК8;
 - 5) ВК10.
- 42 Який з перелічених матеріалів має найбільшу міцність?
- 1) Т15К6;
 - 2) Т5К10;
 - 3) Т30К4;
 - 4) ТТ7К12;
 - 5) Р6М5.
- 43 Який з перелічених матеріалів має найбільшу твердість?
- 1) Т15К6;
 - 2) Т5К10;
 - 3) Т30К4;
 - 4) ТТ7К12;
 - 5) Р6М5.
- 44 Який з перелічених матеріалів має найменшу міцність?
- 1) Т15К6;
 - 2) Т5К10;
 - 3) Т30К4;
 - 4) ТТ7К12;
 - 5) Р6М5.
- 45 Який з перелічених матеріалів має найменшу твердість?
- 1) Т15К6;
 - 2) Т5К10;
 - 3) Т30К4;
 - 4) ТТ7К12;
 - 5) Р6М5.
- 46 Якщо у твердому сплаві збільшити вміст кобальту, то його міцність:
- 1) збільшиться;
 - 2) зменшиться;
 - 3) не зміниться.
- 47 Якщо у твердому сплаві збільшити вміст кобальту, то його твердість:
- 1) збільшиться;
 - 2) зменшиться;
 - 3) не зміниться;

- 48 Якщо у твердому сплаві зменшити вміст кобальту, то його міцність:
- 1) збільшиться;
 - 2) зменшиться;
 - 3) не зміниться;
- 49 Якщо у твердому сплаві зменшити вміст кобальту, то його твердість:
- 1) збільшиться;
 - 2) зменшиться;
 - 3) не зміниться;
- 50 Швидкість різання 50–60 м/хв при обробці конструкційних сталей є граничною для інструментів з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 51 Швидкість різання 15–20 м/хв при обробці конструкційних сталей є граничною для інструментів з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 52 Швидкість різання 250–300 м/хв при обробці конструкційних сталей є граничною для інструментів з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 53 Швидкість різання 1000 м/хв при обробці конструкційних сталей є граничною для інструментів з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 54 Швидкість різання 5–10 м/хв при обробці конструкційних сталей є граничною для інструментів з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.

- 55 Швидкість різання 500–600 м/хв при обробці конструкційних сталей є граничною для інструментів з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 56 Теплостійкість до 200 °С мають інструменти з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 57 Теплостійкість до 250–300°С мають інструменти з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 58 Теплостійкість до 600–650°С мають інструменти з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 59 Теплостійкість до 800–1100°С мають інструменти з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 60 Теплостійкість до 1200°С мають інструменти з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 61 Теплостійкість до 1300°С мають інструменти з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 62 Теплостійкість до 700–800°С мають інструменти з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;

- 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 63 Радіус округлення різальної кромки $\rho=3-5$ мкм мають інструменти з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 64 Радіус округлення різальної кромки $\rho=5-15$ мкм мають лезові інструменти з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 65 Радіус округлення різальної кромки $\rho=20-30$ мкм мають лезові інструменти з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 66 Радіус округлення різальної кромки $\rho=40-50$ мкм мають лезові інструменти з:
- 1) твердого сплаву;
 - 2) швидкорізальної сталі;
 - 3) мінералокераміки;
 - 4) кубічного нітриду бору;
 - 5) правильної відповіді немає.
- 67 Сутність методу СВ-синтезу:
- 1) мимовільне екзотермічне горіння конденсованих систем;
 - 2) сплавка тугоплавких сполук у печах;
 - 3) механічне з'єднання тугоплавких матеріалів;
 - 4) правильної відповіді немає.
- 68 Перевага СВ-синтезу:
- 1) легкість вибору складу шихти;
 - 2) відсутність оснащення;
 - 3) відсутність витрат на електроенергію;
 - 4) правильної відповіді немає.
- 69 Від яких параметрів залежить об'ємне знеміцнення алмазу в умовах СВС-процесу :
- 1) від абсолютного значення температури;
 - 2) від часу перебування у високотемпературній зоні;
 - 3) не залежить від параметрів;
 - 4) від тиску у високотемпературній зоні;
 - 5) від складу шихти.
- 70 Тривалість процесу одержання легованого сплаву заліза за допомогою СВС-синтезу:
- 1) 18–20 годин;
 - 2) 60–120 хвилин;

- 3) 20–120 секунд;
4) 5–8 діб;
5) правильної відповіді немає.
- 71 Як змінюється твердість сплаву, отриманого СВ-синтезом, при загартуванні?
1) багаторазово збільшується;
2) не змінюється;
3) зменшується;
4) незначно збільшується;
5) правильної відповіді немає.
- 72 Твердість сталей, отриманих СВС- методом без термообробки:
1) 50–64 HRC;
2) 700–750 HB;
3) 65–70 HRC;
4) 40–45 HRC;
5) правильної відповіді немає.
- 73 Які з перелічених матеріалів використовуються для шліфування твердих сплавів?
1) SiO_2 ;
2) V_4C ;
3) SiC ;
4) Al_2O_3 ;
5) правильної відповіді немає.
- 74 Які з перелічених матеріалів використовуються для шліфування твердих сплавів?
1) електрокорунд нормальний;
2) електрокорунд білий;
3) карбід кремнію (чорний);
4) карбід кремнію (зелений);
5) алмаз.
- 75 Які з перелічених матеріалів використовуються для шліфування твердих сплавів?
1) електрокорунд нормальний;
2) електрокорунд білий;
3) карбід кремнію (чорний);
4) карбід кремнію (зелений);
5) кубічний нітрид бору.
- 76 Які з перелічених матеріалів використовуються для шліфування конструкційної сталі?
1) електрокорунд нормальний;
2) електрокорунд білий;
3) карбід кремнію (чорний);
4) карбід кремнію (зелений);
5) кубічний нітрид бору.
- 77 Які з перелічених матеріалів використовуються для шліфування конструкційної сталі?
1) електрокорунд нормальний;
2) електрокорунд білий;

- 3) карбід кремнію (чорний);
 - 4) карбід кремнію (зелений);
 - 5) алмаз.
- 78 Які з перелічених матеріалів використовуються для шліфування конструкційної сталі?
- 1) SiO_2 ;
 - 2) B_4C ;
 - 3) SiC ;
 - 4) Al_2O_3 ;
 - 5) правильної відповіді немає.

Додаток А
(обв'язковий)

Співвідношення між числами твердості, вимірюваними різними способами

Віккерс HV	Роквелл		Бринелль НВ
	HRB	HRC	
1	2	3	4
80	–	–	76
90	48,0	–	85,5
100	56,2	–	95
110	62,3	–	105
120	66,7	–	114
130	71,2	–	124
140	75,0	–	133
150	78,7	–	143
160	81,7	–	152
170	85	–	162
180	87,1	–	171
190	89,5	–	181
200	91,5	–	190
210	93,5	–	199
220	95,0	–	209
230	96,7	–	219
240	98,1	20,3	228
250	99,5	22,2	238
260	–	24	247
270	–	25,6	257
280	–	27,1	266
290	–	28,5	276
300	–	29,8	285
310	–	31,9	295
320	–	32,2	304
330	–	33,3	314
340	–	34,4	323
350	–	35,5	333
360	–	36,6	342
370	–	37,7	352
380	–	38,8	361
390	–	39,8	371

Продовження додатка А

1	2	3	4
400	–	40,8	380
410	–	41,8	390
420	–	42,7	399
430	–	43,6	409
440	–	44,5	418
450	–	45,3	428
460	–	46,1	437
470	–	46,9	447
480	–	47,7	456
490	–	48,4	466
500	–	49,1	475
510	–	49,8	485
520	–	50,5	494
530	–	51,1	504
540	–	51,7	513
550	–	52,3	523
560	–	53,0	532
570	–	53,6	542
580	–	54,1	551
590	–	54,7	561
600	–	55,2	470
610	–	55,7	580
620	–	56,3	589
630	–	56,8	599
640	–	57,3	608
650	–	57,8	618
660	–	58,3	–
670	–	58,8	–
680	–	59,2	–
690	–	59,7	–
700	–	60,1	–
720	–	61,0	–
740	–	61,8	–
760	–	62,5	–
780	–	63,3	–
800	–	64,0	–
820	–	64,7	–
840	–	65,3	–
860	–	65,9	–
880	–	66,4	–

Продовження додатка А

1	2	3	4
900	–	67,0	–
920	–	67,5	–
940	–	68,0	–

Додаток Б

Відповідність позначень попереднього ДСТУ 4130-2002 новому ДСТУ EN 10002-5:2006

Стара назва	Старе значення	Нова назва	Нове значення
ДСТУ 4130-2002		ДСТУ EN 10002-5:2006	
Межа міцності на стиск	$\sigma_{ст}$	Границя міцності під час стиску	R_{cm}
Межа міцності на згин	$\sigma_{зг}$	Границя міцності під час згинання	R_{bm}
Межа міцності на розтяг	$\sigma_{в}$	Границя міцності під час розтягування	R_m
Межа (границя) текучості	$\sigma_{т}$	(Верхня) Границя плинності	R_{eH}
Умовна межа (границя) текучості	$\sigma_{0,2}$	Границя плинності під час непропорційного видовження	$R_{p0,2}$
Відносне видовження	δ	Відносне видовження під час розірвання	A
Відносне звуження	ψ	Відносне звуження під час розірвання	Z
Істинний опір розриву (руйнуванню)	$(S_{в}) S_{к}$	Істинний опір розриву (руйнуванню)	$(S_{в}) S_{к}$

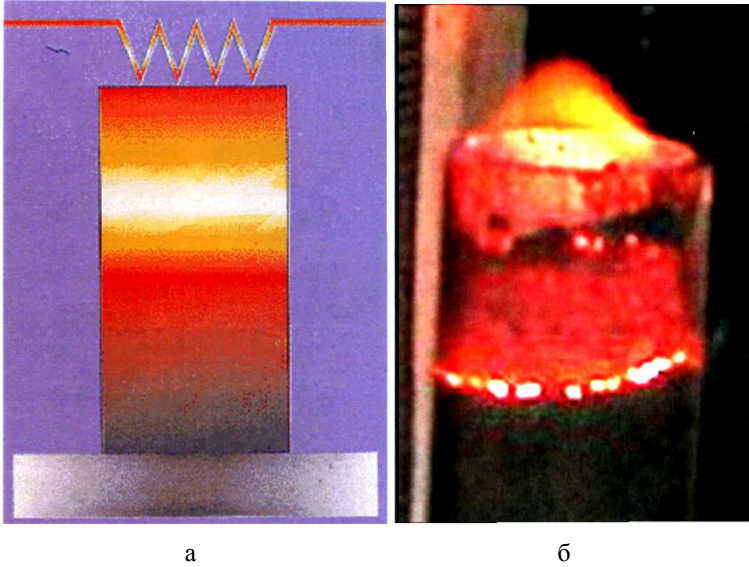
Додаток В

Фізико-механічні властивості елементів

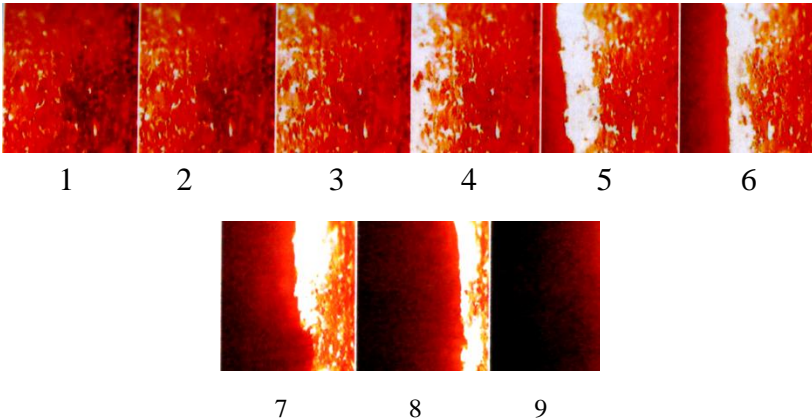
Метал (елемент)	Густина ρ , г/см ³	Температура плавлення, °С	$\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	..., Вт/(м· К)	C_p , Дж/(кг· К)	НВ	σ_B , МПа	σ_T , МПа	E, МПа
Алюміній	2,6–2,75	600	23,7	202–290	879,2	20–25	80–110	30–70	72000
Ванадій	5,96	1710	–	–	–	–	–	–	–
Вольфрам	19,1–19,3	3410	4,4	163	134	350	1000–1200	750	40000
Залізо	7,87	1539	12,15	87	439,6	50	250–330	125	210000
Кадмій	8,54–8,64	321	30,4	93,4	–	20	64	10	530000
Кальцій	1,54	851	–	–	–	20–30	60	38	26000
Кобальт	8,9	1495	12,5	70	448	125	240	–	207500
Магній	1,74	651	26,0	172	1000,6	25	170–220	20–60	43600
Марганець	7,2–7,6	1250	22,2	157	473	210	Хрупкий	–	201600
Мідь	8,9–9,0	1084,2	17,06	393	376,8	35	220	60–80	132000
Молибден	10,3	2622	5,19	140	247	125	7000	–	330000
Нікель	8,6–8,9	1453	13,6	93	439,6	120	3000	200	105000
Ніобій	8,6	2415	7,2	–	–	120	300	200	105000
Олово	7,2–7,5	231,9	26,2	66,3	222	5	20-40	–	55000
Платина	21,45	1769	9,1	69,8	1342,7	25	150	–	170000
Свинець	11,34	327,4	29,2	35,1	127,3	4-6	10	5-10	17000
Тантал	16,6	3000	–	–	–	70	350–450	–	190000
Титан	4,54	1668	8,1	–	531,7	130–150	400–450	300–400	105000
Хром	7,14	1800	6,61	–	427	70–100	250–300	200	252000
Цинк	7–7,2	419,4	32	112,8	381	30–42	100–150	90–100	94000
Цирконій	6,53	1830	–	–	–	120	300–500	200–300	75000

Примітка. Значення питомої вагової теплоємності C_p наведені при 0°С

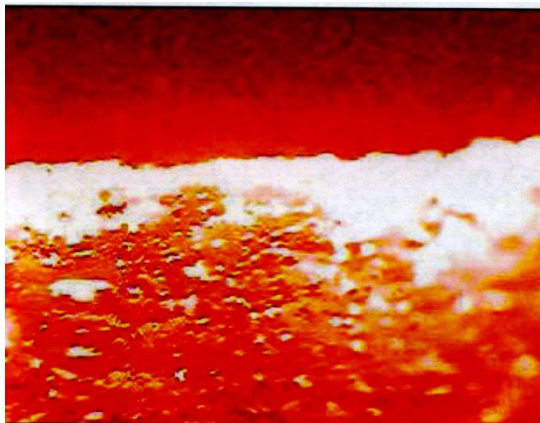
Додаток Г



Слайд 1 – Схема ініціювання СВ – синтезу розпеченою вольфрамовою спіраллю (а) та фотографія СВ – синтезу в стовпчику ущільненої шихти з металевих порошків (б)



Слайд 2 – Покадрова фотографія поширення хвилі горіння – первые 6 кадров (відлік згори 1, 2, 3, 4, 5, 6); 7, 8 і 9 кадри остивання нового продукту СВ-синтезу (а).



Слайд 3 – Фотографія четвертого кадру з великим збільшенням, де чітко видна зона (білого кольору) хвилі горіння, тобто. максимальна температура синтезу для конкретного складу відповідної марки порошоків вихідної шихти.



Слайд 4 – Спеціальний стенд для відео спостереження процесу СВ – синтезу в масштабі реального часу

Додаток Д Різні види лезових інструментів



Слайд 1 – Токарні різці та пластинки



Слайд 2 –



Слайд 3 – Пластинки багатогранні непереточувані



Слайд 4 – Торцева фреза з напаяними пластинами

Слайд 4 – Зенкери



Слайд 5 – Фрези алмазні



Слайд 6 – Фрези: торцева та кінцеві



Слайд 7 – Свердла різних розмірів



Слайд 8 – Свердла



Слайд 9 – Протяжки



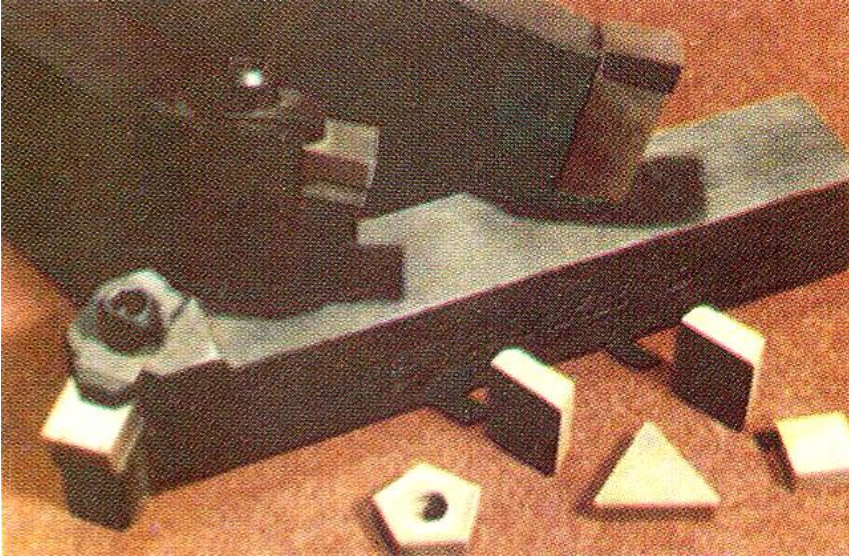
Слайд 10 – Розгортки



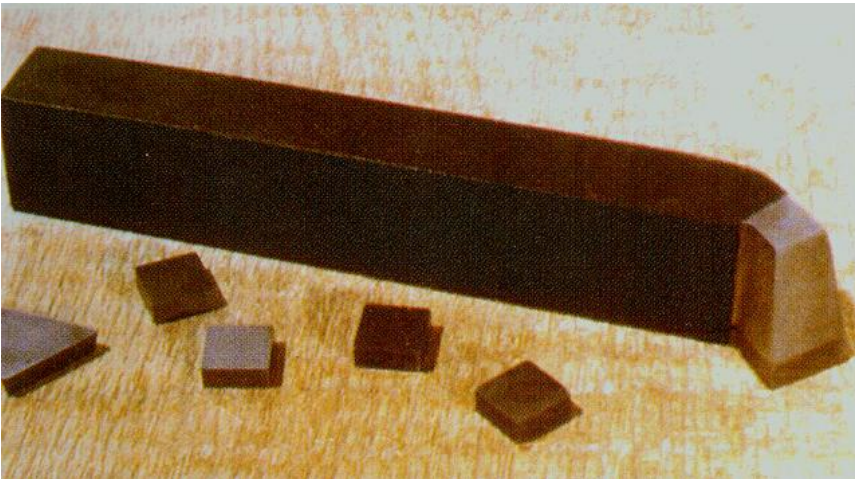
Слайд 11 – Різена різні плашки



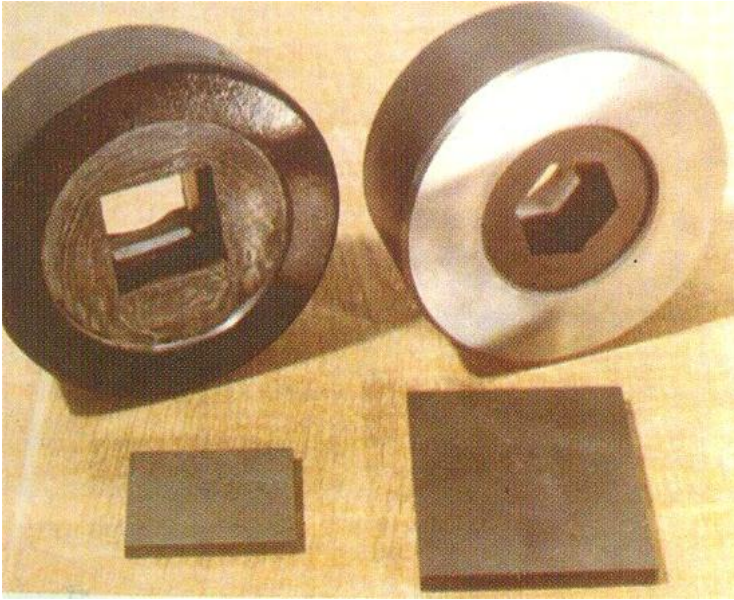
Слайд 12 – Черв'ячні фрези зі швидкорізальної сталі



Слайд 13 –Непереточувані різальні пластини з покриттями, отриманими за технологією газотранспортних СВС-реакції



Слайд 14 – Різці та непереточувані різальні пластини марки СТІМ



Слайд 15 – Прес матриці зі сплаву СТИМ-2А і безпористі пластини з дибориду титану



Слайд 16 – Довгомірні електроди для зварювання, наплавлення і електроіскрового легування, отримані СВС



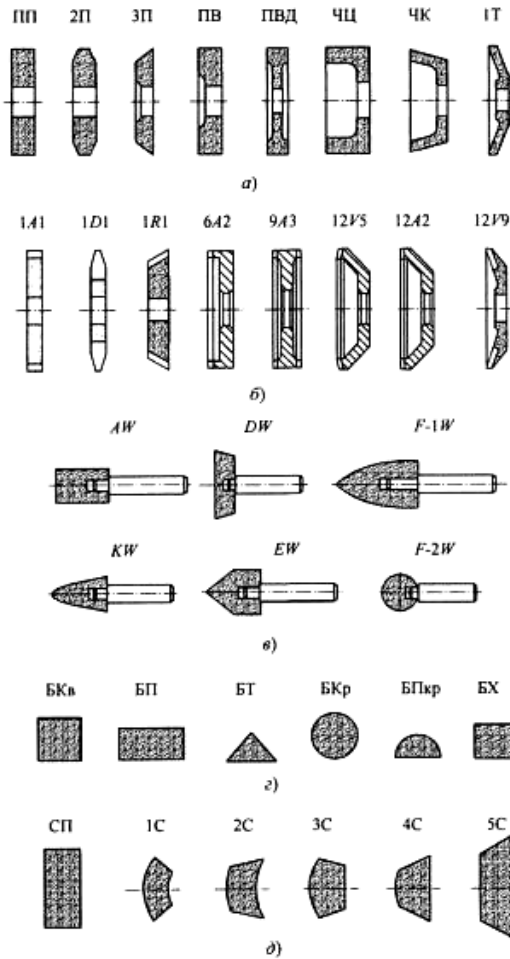
Слайд 17 – Стрижневі та дискові електроди для електроіскрового легування, отримані СВС



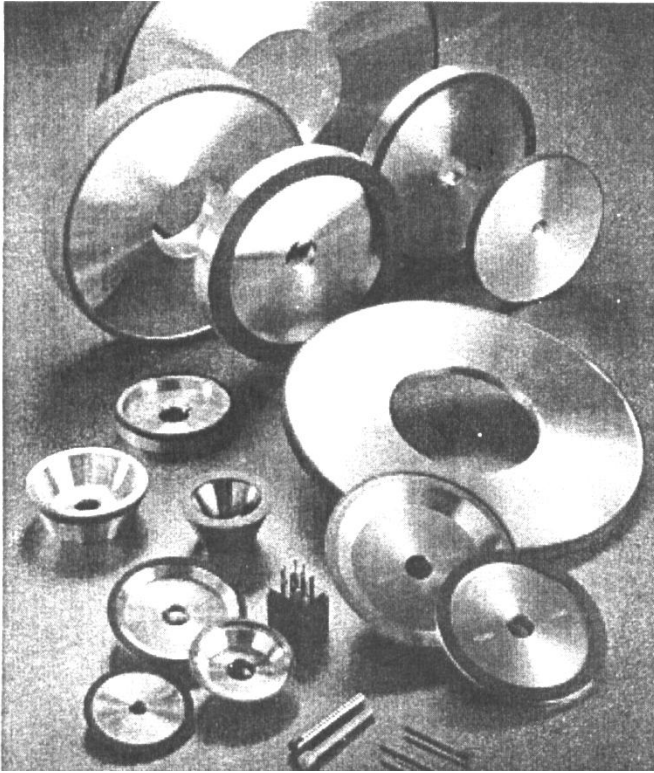
Слайд 18 – Мігчики для нарізання внутрішньої різі

Додаток Е

Різні види абразивних інструментів







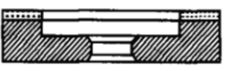



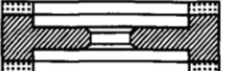




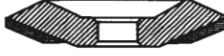
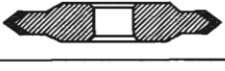

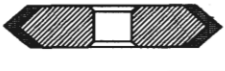
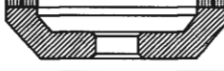

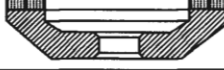

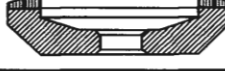
Слайд 1 – Деякі типи абразивних інструментів: а) – абразивні круги; б) – алмазні й ельборові (кубанітові) круги; в) – шліфувальні головки; г) – шліфувальні бруски; д) – шліфувальні сегменти



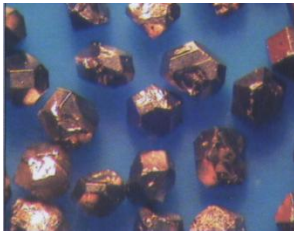
Слайд 2 – Шліфувальні круги із НТМ



Слайд 3 – Конічні круги із НТМ на гальванічній та твердосплавній зв'язках

Форма круга	Форми перетину	Форма круга	Форми перетину
1A1		12A2-45SS/C1	
14U1			
6A2		12V5-45°	
6A2 C		12A2-20°	
9A3		12R4	
12A2-45°		12V5-20°	
11V9-70°		12D9	
14EE1		1A1R	
1EE1		12A2-45°	
1FF1		12A2-20°	
1FF6V		12M2-45°	

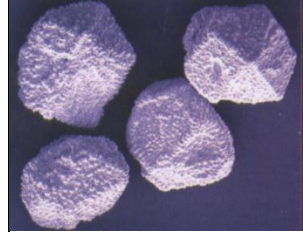
Слайд 4 – Позначення форм і перетинів кругів із НТМ'



а

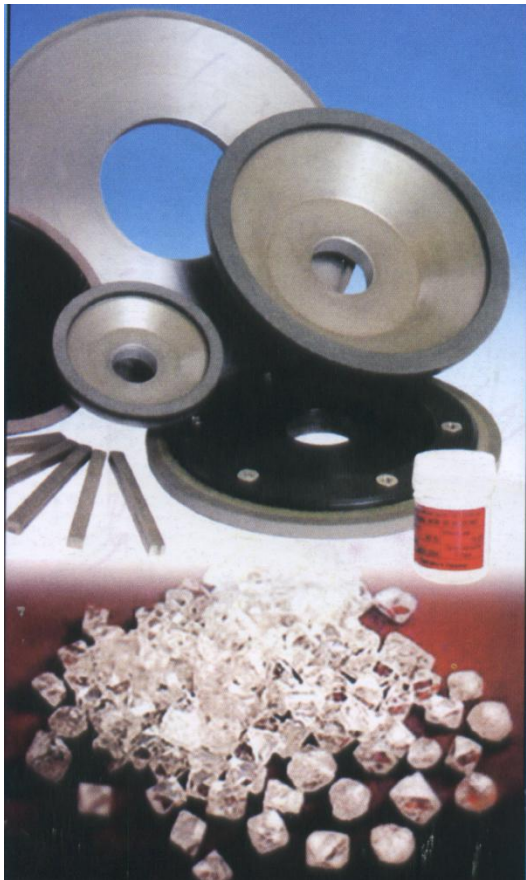


б

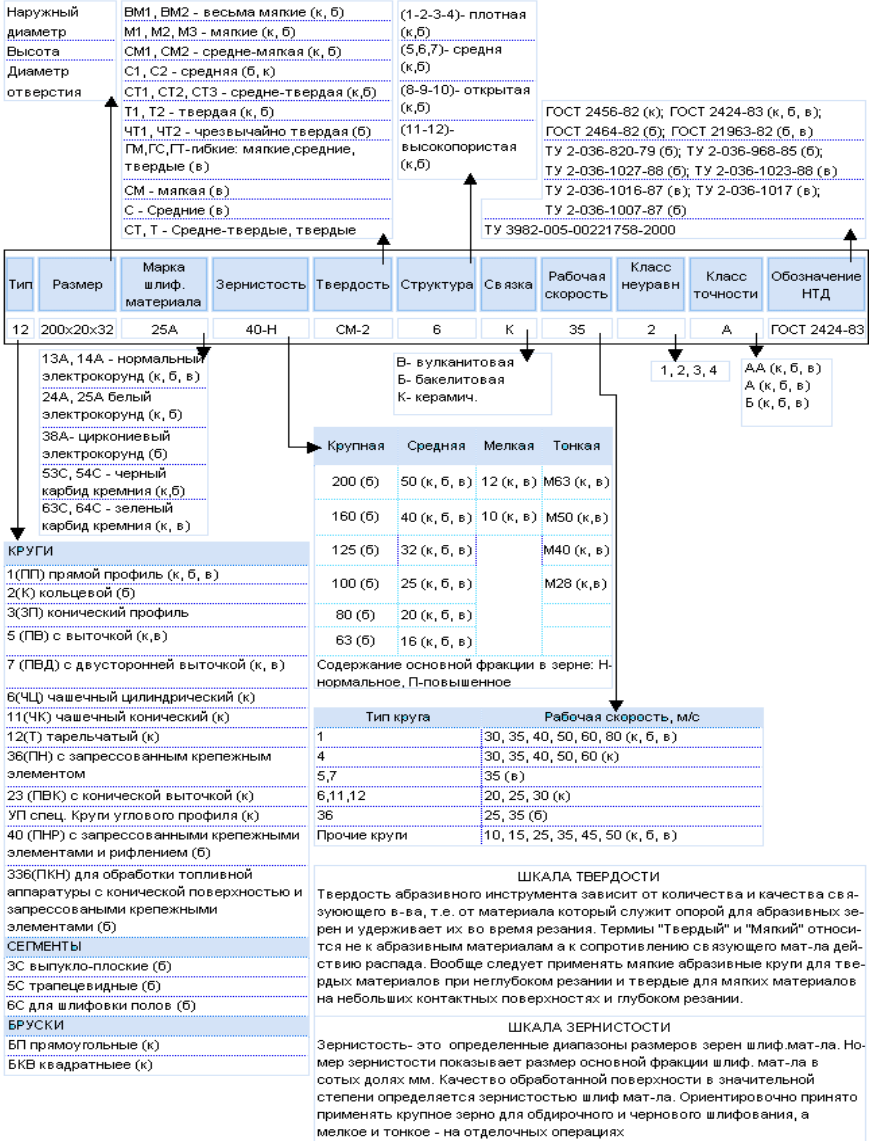


в

Слайд 5 – Алмазні шліфпорошки, металізовані титаном (а), міддю (б) та нікелем (в)



Слайд 6– Абразивні порошки та інструменти із надтвердих матеріалів



СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. **Балацький В. В.** Сучасні інструментальні матеріали для оброблення різанням : підручник для учнів професійно-технічних закладів освіти / В. В. Балацький, А. М. Гуржій, В. П. Головінов, В. П. Щербаков. – Київ : Техніка, 1999. – 118 с.
2. **Васин С. А.** Резание металлов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании : учебн. для техн. вузов / С. А. Васин, А. С. Верещака, В. С. Кушнир. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 448 с.
3. **Верещака А. С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака. – М. : Машиностроение, 1993. – 336 с.
4. **Верещака А. С.** Тенденции совершенствования и методология создания функциональных покрытий для режущего инструмента // Сучасні технології у машинобудуванні : збірник наукових статей / А. С. Верещака, А. А. Верещака / за заг. ред. А. І. Грабченка. – Харків : НТУ „ХПІ“, 2007. – С. 192–235.
5. **Внуков Ю. Н.** Нанесение покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю. Н. Внуков и др. – Киев : Техника, 1992. – 196 с.
6. **Гончаров В. Д.** Методологические основы научных исследований и достижения современной науки: учеб. пособие / В. Д. Гончаров. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2008. – 161 с.
7. **Гончаров В. Д., Тубалов Н. П., Лебедева О. А.** Шихта для получения проницаемого материала. Патент № 2299785 от 27.05.07.
8. **ГОСТ 19265-73.** Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические условия. – М. : Госстандарт СССР. – 29 с.
9. **ГОСТ 21445-84 (СТ СЭВ 4403 – 83).** Материалы и инструменты абразивные. Термины и определения. – М. : Госстандарт СССР, 1984. – 21 с.
10. **ГОСТ 23505-79.** Абразивная обработка. Термины и определения. М. : Госстандарт СССР, 1979. – 12 с.
11. **ГОСТ 25761-83.** Виды обработки резанием. Термины, и определения общих понятий. – М. : Госстандарт СССР, 1983. – 5 с.
12. **ГОСТ 26327-84.** Материалы шлифовальные из карбида кремния. Технические условия. – М. : Госстандарт СССР, 1984. – 10 с.
13. **ГОСТ 28818-90.** Материалы шлифовальные из электрокорунда. Технические условия. – М. : Госстандарт СССР, 1984. – 5 с.

14. **ГОСТ 3647-80.** Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля. – М. : Госстандарт СССР, 1980. – 20 с.
15. **ГОСТ 3882-74.** Сплавы твёрдые спеченные. Марки. – М. : Госстандарт СССР. – 12 с.
16. **ГОСТ Р 52381-2005.** Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава. – М. : Госстандарт России, 2005. – 15 с.
17. **ГОСТ Р 52587-2006.** Инструмент абразивный. Обозначения и методы измерения твердости. – М. : Госстандарт России, 2006. – 12 с.
18. **ГОСТ Р 52781-2007.** Круги шлифовальные и заточные. Технические условия. – М. : Госстандарт России, 2007. – 32 с.
19. **ДСТУ EN 10002-5:2006.** Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Частина 5. Метод випробування за підвищених температур (на заміну ДСТУ 4130-2002). – К. : Держспоживстандарт України, 1993. – 26 с.
20. **ДСТУ 2233-93.** Інструменти різальні. Терміни та визначення. – К. : Держспоживстандарт України, 1993. – 12 с.
21. **ДСТУ 3833-98 (ГОСТ 1435-74).** Прутки, штаби та лотки з інструментальної нелегованої сталі. Загальні технічні умови. – К.: Держспожив стандарт України. – 29 с.
22. **ДСТУ 3953 2000 (ГОСТ 5950-2000).** Прутки, штаби та лотки з інструментальної легованої сталі. Загальні технічні умови. – К.: Держспожив стандарт України. – 56 с.
23. **Евтушенко А. Т.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез инструментальной стали / А. Т. Евтушенко. – Томск : Известия ТПУ № 3. – 2008. – Т. 313. – С. 100–104.
24. **Евтушенко А. Т., Торбунов С. С.** Способ получения легированного сплава из отходов производства. Патент № 2295424 от 20.03.2007.
25. **Жедь В. П.** Режущие инструменты, оснащенные сверхтвёрдыми и керамическими материалами и их применение: справочник / В. П. Жедь, Г. В. Боровский, Я. А. Музыкант, И. М. Ипполитов. – М. : Машиностроение, 1987. – 320 с.
26. **Залогов В. А.** Курс лекций «Инструментальные материалы для лезвийных инструментов». Раздел «Инструментальные материалы» : учеб. пособие / В. А. Залогов. – Суми : Изд-во СумДУ, 2007. – 205 с.

27. **Залого В. А.** Повышение качества рабочих поверхностей лезвий режущих инструментов из быстрорежущей стали применением комбинированной поверхностной обработки их лезвий / В. А. Залого, И. В. Бубнов // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2006. – № 1 (3). – С. 23–27.
28. **Залого В. А.** Материалы для металлорежущих лезвийных инструментов : учеб. пособие / В. А. Залого, В. Д. Гончаров. – Барнаул : Изд-во АлГТУ им. Ползунова, 2009. – 299 с.
29. **Инструменты** из сверхтвёрдых материалов / под ред. Н. В. Новикова. – М. : Машиностроение, 2005. – 555 с. (Б-ка инструментальщика).
30. **Инструменты** из сверхтвёрдых материалов / под ред. Н. В. Новикова. – Киев : ИСМ НАНУ, 2001. – 528 с.
31. **Интегрированные** генеративные технологии: учеб. пособие для студ. выс. учеб. заведений, кот. обуч. по специальности «Технология машиностроения» / А. И. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок [и др.]; под ред. А. И. Грабченко. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 396 с.
32. **Климов В. И.** Материалы режущих инструментов: научно-популярная библиотека рабочего / В. И. Климов. – Москва-Свердловск : Машгиз, 1962. – 48 с.
33. **Коломиец В. В.** Новые инструментальные материалы и области их применения : учеб. пособие / В. В. Коломиец. – К. : УМК ВО, 1990. – 64 с.
34. **Лурье Г. Б.** Новые инструментальные материалы и конструкции резов : учеб. пособие для проф.-техн. учебных заведений / Г. Б. Лурье. – М. : Высшая школа, 1977. – 55 с.
35. **Левашов Е. А.** Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Е. А. Левашов, А. С. Рогачев, В. И. Юхвид, И. П. Боровинская. – М. : ЗАО Изд-во Бином, 1999. – 176 с.
36. **Ляпунов А. И.** Использование порошковых быстрорежущих сталей в инструментальном производстве : Обзор / А. И. Ляпунов. – М. : НИИМаш, 1983. – 39 с.
37. **Маргулес А. У.** Резание металлов керметами / А. У. Маргулес. – М. : Машиностроение, 1980. – 160 с.

38. **Мазур И. П.** Металлы и сплавы зарубежных стран и их аналоги отечественных стандартов : справочник / И. П. Мазур, Б. С. Волинский. – Хмельницкий : ТУП, 2001. – 43 с.
39. **Мержанов А. Г.** СВС – технологии XXI века / А. Г. Мержанов. – Черноголовка, ИСМАН, 2005. – 200 с. : 44 ил.
40. **Меркулов В. Н.** Новые инструменты для обработки труднообрабатываемых материалов / В. Н. Меркулов. – К., 1986. – 52 с. (Обзор, информ. / УкрНИИНТИ. Сер. 10. Технология и оборудование по обработке металлов). – К., 1986. – 52 с.
41. **Мацевитый В. М.** Покрытия для режущих инструментов / В. М. Мацевитый. – Харьков : Выща шк., Изд-во при Харьк. ун-те, 1987. – 128 с.
42. **Новиков Н. В.** Инструментальное производство в Украине : доклад на XVII Международном научно-техническом семинаре «Высокие технологии: тенденции развития» / Н. В. Новиков. – Харьков-НТУ ХПИ Алушта, сентябрь 2008 г.
43. **Палей М. М.** Технология шлифования и заточки режущего инструмента / М. М. Палей, Л. Г. Дибнер, М. Д. Флид. – М. : Машиностроение, 1988. – 288 с. : ил. – (Б-ка инструментальщика).
44. **Попов С. А.** Заточка и доводка режущего инструмента : учебник для техн. училищ / С. А. Попов. – М. : Высш. школа, 1981. 200 с. : ил. – (Профтехобразование. Инструментальная промышленность).
45. **Рекламный** буклет фирмы SANDVIK Coramant. Ceramic cutting tool materials. HV-1340:004. – ENG, 1995 г.
46. **Самойлов В. С.** Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент : справочник / В. С. Самойлов, Э. Ф. Эйхманс, В. А. Фальковский и др. – М. : Машиностроение, 1988. – 368 с.
47. **Сверхтвёрдые** материалы. Получение и применение : монография : в 6 т. / под общ. ред. Н. В. Новикова. Т. 5 : Обработка материалов лезвийным инструментом / под ред. С. А. Клименко. – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «Алкон» НАНУ, 2006. – 316 с.
48. **Сменные** пластины и инструмент САНДВИК-МКТС, технические материалы. – М., 2000. – 169 с.
49. **Современные** тенденции совершенствования и рационального применения твердых сплавов для режущих инструментов / А. С. Ве-

- рещака, Г. В. Болотников (Обзор, информ.). Сер. ХМ-9 «Технология химического и нефтяного машиностроения и материалы». – М. : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1991. – 51 с.
50. **Справочник** инструментальщика / И. А. Ординарцев, Г. В. Филиппов, А. Н. Шевченко и др.; под общ. ред. И. А. Ординарцева. – М. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. – 846 с.
51. **Самораспространяющийся** высокотемпературный синтез : Материалы и технологии. – Новосибирск : Наука, 2001. – 284 с.
52. **Текст** лекций для самостоятельной работы по курсу "Теория резания". Тема 2 «Инструментальные материалы» для студентов специальностей 7.090202 "Технология машиностроения", 7.090203 "Металлорежущие станки и системы" / сост. Ю. Н. Внуков, Б. Н. Левченко. – Запорожье : ЗНТУ, 2004. – 31 с.
53. **Ящерицын П. И.** Основы резания материалов и режущий инструмент / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Н. И. Жигалко. – Минск : «Высшейш. школа», 1975. – 528 с.

Навчальне видання

**Залога Вільям Олександрович,
Гончаров Володимир Дмитрович,
Залога Ольга Олександрівна**

**СУЧАСНІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ
У МАШИНОБУДУВАННІ**

Навчальний посібник

За загальною редакцією доктора технічних наук
В. О. Залози

Художнє оформлення обкладинки В. О. Залози
Редактор Н. В. Лисогуб
Комп'ютерне верстання О. О. Залози

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 21,62. Обл.-вид. арк. 19,61. Тираж 300 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.



Залога Вільям Олександрович, доктор технічних наук, професор. Академік Академії наук вищої освіти України, Відмінник освіти України, заслужений професор СумДУ. Працює завідувачем кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету. Науково-педагогічний стаж 43 роки. Колом наукових інтересів є теорія різання, моделювання робочих процесів високих технологій. Є автором понад 450 наукових публікацій, у тому числі: одного підручника, чотирьох монографій, семи навчальних посібників, у т. ч. 4 із грифом МОН України та один, виданий у Росії, 45 – навчально-методичного характеру, 18 авторських свідоцтв і патентів на винаходи.



Гончаров Володимир Дмитрович, кандидат технічних наук, професор. Працює на кафедрі «Загальна технологія машинобудування» АлтДТУ ім. І. І. Ползунова (м. Барнаул). Член-кореспондент Сибірського відділення Академії наук вищої школи, академік Міжнародної академії інформатизації. Почесний працівник вищої професійної освіти Російської Федерації, лауреат премії Алтайського краю в галузі науки й техніки. Науково-педагогічний стаж 47 років. Автор більше 150 наукових і навчально-методичних публікацій (у тому числі 15 французькою мовою) і 4 патентів на винаходи.



Залога Ольга Олександрівна, аспірантка кафедри технології машинобудування, верстатів та інструментів Сумського державного університету. У 2010 році закінчила з відзнакою магістратуру Сумського державного університету за спеціальністю «Інструментальне виробництво». Має більше 10 відзнак та грамот за виконання студентських наукових робіт. Проходила стажування в компанії Delcam у Великобританії та в Інституті верстатів університету Штутгарта в Німеччині. Автор більше ніж 25 наукових публікацій, у т. ч. 1 методичних вказівок.