

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Технологическое оборудование»

Е. А. Маркова

О. К. Яцкевич

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ**

Пособие

для студентов специальностей

1-36 01 03 «Технологическое оборудование  
машиностроительного производства»,

1-36 01 01 «Технология машиностроения»

Минск  
БНТУ  
2022

УДК 621.9.025 (075.8)

ББК 34.63 (517)

М26

**Р е ц е н з е н т ы:**

Начальник технолого-конструкторского бюро инструмента ТКО  
СИиТО УКГТ МТЗ *А. В. Шахнович*;  
кафедра «Технология металлов», зав. кафедрой, д-р техн. наук,  
профессор *В. М. Капцевич*

**Маркова, Е. А.**

М26 Инструментальные материалы режущих инструментов : пособие для студентов специальностей 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства», 1-36 01 01 «Технология машиностроения» / Е. А. Маркова, О. К. Яцкевич. – Минск : БНТУ, 2022. – 42 с.

ISBN 978-985-583-474-9.

В пособии рассмотрены инструментальные материалы с учетом современных требований к режущим свойствам металлорежущих инструментов, описаны области применения отечественных и зарубежных инструментальных материалов. Пособие предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения указанных специальностей при выполнении курсовых и дипломных проектов.

УДК 621.9.025 (075.8)

ББК 34.63 (517)

ISBN 978-985-583-474-9

© Маркова Е. А., Яцкевич О. К., 2022

© Белорусский национальный  
технический университет, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. УГЛЕРОДИСТЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ.....	6
2. ЛЕГИРОВАННЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ.....	8
3. БЫСТРОРЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ.....	12
3.1. Мало- и безвольфрамовые быстрорежущие стали.....	16
3.2. Порошковые быстрорежущие стали.....	17
3.3. Интерметаллоиды.....	18
3.4. Карбидостали.....	19
4. ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ.....	19
4.1. Вольфрамовые (однокарбидные) твердые сплавы.....	20
4.2. Титановольфрамовые (двухкарбидные) твердые сплавы.....	25
4.3. Титанотанталовольфрамовые (трехкарбидные) твердые сплавы.....	26
5. РЕЖУЩАЯ КЕРАМИКА.....	28
5.1. Оксидная керамика.....	29
5.2. Оксидно-карбидная керамика (керметы).....	29
5.3. Нитридная керамика.....	31
6. СВЕРХТВЕРДЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	32
6.1. Поликристаллы на основе алмаза.....	32
6.2. Поликристаллы на основе нитрида бора.....	33
6.3. Композиционные (двухслойные) поликристаллические сверхтвердые материалы.....	34
6.4. Зарубежные сверхтвердые материалы.....	36
7. АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	39
7.1. Природные абразивные материалы.....	39
7.2. Искусственные абразивные материалы.....	40
Список использованных источников.....	42

## ВВЕДЕНИЕ

Обработка деталей резанием заключается в удалении с заготовки определенного слоя материала, называемого припуском, с целью получения детали заданных формы, размеров и качества поверхности. В обработке металлов резанием основную роль играет режущий инструмент. Эффективность работы режущего инструмента, определяемая его работоспособностью при максимально возможной стойкости, зависит от материала рабочей части. Применение того или иного инструментального материала в конкретных производственных условиях обуславливается служебным назначением режущего инструмента, требуемой эффективностью процесса обработки, необходимым качеством и точностью обрабатываемых поверхностей, материалом и видом заготовок.

Инструментальными являются материалы, основное назначение которых – оснащение рабочей части инструментов. В связи с большим количеством материалов, применяемых для производства заготовок, высокими требованиями к качеству и точности обработки в настоящее время в инструментальном производстве используют большое количество различных инструментальных материалов. В современных производственных условиях интенсивность режимов резания в целом возросла в 20–30 раз. Это связано в основном с исследованиями в области инструментальных материалов и созданием новых высокоэффективных марок. Изготовление металлорежущего инструмента предполагает применение инструментальных материалов, обладающих такими качествами, как:

- твердость, превышающая твердость обрабатываемого материала;
- меньшая хрупкость и большая вязкость;
- износоустойчивость;
- высокая красностойкость;
- достаточная механическая прочность.

Перечисленные свойства обусловлены сложными условиями работы режущих кромок инструментов.

В настоящее время для изготовления металлорежущих инструментов применяют пять групп инструментальных материалов:

1. Стали.
2. Твердые сплавы.
3. Режущая керамика.

4. Синтетические сверхтвердые материалы.

5. Абразивные материалы.

В предложенном пособии подробно рассмотрены перечисленные группы инструментальных материалов, их основные физико-механические свойства, даны характеристики и области их использования.

Пособие предназначено для студентов машиностроительного профиля и может быть полезно для специалистов предприятий, занимающихся проектированием и производством режущих инструментов.

## 1. УГЛЕРОДИСТЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Появились в середине 19 века и более 50 лет были единственным материалом для изготовления режущего инструмента. Марки этих сталей обозначаются буквой «У». Выпускаются углеродистые инструментальные стали двух типов по ГОСТ 1435–74:

1) **качественные:** У7, У8, У10, У11, У12, У13;

2) **высококачественные:** У7А, У8А, У10А, У11А, У12А, У13А.

Химический состав стали:

- углерод (С) – 0,6–1,4 %;
- кремний (Si) – 0,3–0,4 %;
- марганец (Mn) – 0,35–0,4 %;
- сера (S) – 0,02–0,03 %;
- фосфор (P) – около 0,03 %.

**Например:** У7 – углеродистая качественная сталь, содержание углерода – 0,7 %, кремния – 0,35–0,4 %, марганца – 0,35–0,4 %, серы – 0,02–0,03 %, фосфора – около 0,03 %.

Для повышения твердости углеродистые стали подвергают термообработке (закалка при  $t = 750\text{--}820\text{ }^{\circ}\text{C}$ , быстрое охлаждение в воде, отпуск при  $t = 120\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$  – для снятия внутренних напряжений, повышения прочности и вязкости). В результате термообработки сталь приобретает твердость 61–63 HRC<sub>3</sub> и обрабатывает материалы твердостью до 30 HRC<sub>3</sub>. Однако углеродистые стали при термообработке не дают сквозной закалки, и твердость в срединных слоях инструмента понижается до 41 HRC<sub>3</sub>, кроме того, в процессе термообработки они склонны к образованию трещин.

**Недостатки:**

- низкая теплостойкость 200–250 °С;
- хрупкость.

Поэтому из углеродистых сталей изготавливают инструменты малых габаритных размеров для работы с малой скоростью резания, преимущественно для единичного и мелкосерийного производства, а также изготовления слесарного, кузнечного и деревообрабатывающего инструмента, подвергающегося ударам и требующего большой вязкости при повышенной твердости (табл. 1).

Таблица 1

## Назначение углеродистых инструментальных сталей

Марка	Характеристика	Область использования
У7 У7А	Сталь повышенной вязкости	1. Инструменты для обработки дерева (топоры, колуны, стамески, долота, пилы). 2. Зубила, бойки, чертилки. 3. Игольная проволока. 4. Слесарно-монтажные инструменты (молотки, кувалды, отвертки, кусачки, плоскогубцы). 5. Кузнечные штампы, ножницы по металлу и дереву.
У8 У8А У8Г У8ГА		1. Инструменты для обработки дерева (фрезы, зенковки, цековки, топоры, стамески, долота, пилы). 2. Инструменты, работающие в условиях, не вызывающих разогрева режущей кромки, (резцы по меди).
У9 У9А		1. Накатные ролики, плиты и стержни для форм литья под давлением оловянно-свинцовых сплавов. 2. Слесарно-монтажный инструмент (обжимки для заклепок, керны, отвертки, плоскогубцы, кусачки). 3. Мелкие детали для часов.
У10 У10А У11 У11А	Стали высокой твердости	1. Игольная проволока. 2. Инструменты для обработки дерева (пилы ручные поперечные и столярные, сверла, зубила). 3. Штампы холодной штамповки небольших размеров и без резких переходов по сечению – вытяжные, высадочные, обрезные, вырубные. 4. Калибры простой формы и пониженных классов точности. 5. Накатные ролики, напильники, шаберы. 6. Мелкие детали для часов. 7. Режущий мелкогабаритный инструмент (сверла, метчики, плашки, развертки, пилы по металлу, ножовочные полотна, зубила для нанесения насечек напильников).
У12 У12А		1. Режущий мелкогабаритный инструмент (сверла, метчики, плашки, развертки, накатные ролики, фрезы – червячные с затупленным зубом, ножи к сборным фрезам, зенкеры, долбяки, гребенки, протяжки). 2. Напильники, шаберы. 3. Штампы холодной штамповки небольших размеров и без резких переходов по сечению – вытяжные, высадочные, обрезные, вырубные. 4. Бритвенные лезвия, острые хирургические инструменты. 5. Гравировальный инструмент.
У13 У13А		1. Напильники, шаберы, зубила, резцы по меди. 2. Бритвенные ножи и лезвия, хирургические инструменты.

## 2. ЛЕГИРОВАННЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Появились в конце 19 века. Марки и химический состав определяются ГОСТ 5950–73. От углеродистых сталей отличаются повышенным содержанием кремния и марганца, а также одного или нескольких легирующих элементов (табл. 2).

Таблица 2

Химический состав сталей

Марка стали	Содержание легирующих элементов (остальное железо), %								
	C (углерод)	Mn (марганец)	Si (кремний)	S (сера)	P (фосфор)	Cr (хром)	W (вольфрам)	V (ванадий)	Mo (молибден)
9ХС	0,9	0,45	1,4	0,02	0,03	1,1	–	–	–
ХВГ	1,0	0,9	0,25	0,03	0,03	1,1	1,4	–	–
ХВ5	1,0	0,3	0,3	0,03	0,03	0,55	5,0	0,25	–
Х12	1,0	0,3	0,2	0,02	0,03	12,0	–	–	–
Х12М	1,0	0,3	0,2	0,02	0,03	11,7	0,2	0,5	0,5
Х6ВФ	1,0	0,3	0,2	0,02	0,03	6,0	0,6	0,2	–

Для обозначения легирующих элементов в марках сталей приняты следующие обозначения:

У – углерод;

Г – марганец (увеличивает упругие свойства сталей);

С – кремний (увеличивает твердость и жидкотекучесть стали);

Cr – сера (вредная примесь, исключает возможностьковки и проката стали (красноломкость), но улучшает ее обрабатываемость);

P – фосфор (придает стали хрупкость и твердость, увеличивает жидко-текучесть);

Cr – хром (увеличивает твердость, прочность, коррозионную стойкость материала, понижает пластичность);

W – вольфрам (повышает твердость и теплостойкость материала);

V – ванадий (повышает твердость и прочность материала, способствует образованию мелкозернистой структуры);

Mo – молибден (повышает упругость, прочность, теплостойкость, коррозионную стойкость материала).

Легированные инструментальные стали подразделяются на:

1) низколегированные – ХВ4, В2Ф, 13Х, 9ХФ, 11ХФ – применяются для изготовления плашек, метчиков, зубил, шаберов и др.;

2) высоколегированные – 9ХС, ХВГ, ХВСГ – применяются для изготовления разверток и сверл малых диаметров, фасонных резцов, концевых фрез, протяжек, метчиков и др.

Эти стали обладают более высокими технологическими свойствами – лучшей закаливаемостью и прокаливаемостью, меньшей склонностью к короблению. После термической обработки твердость легированных сталей составляет 62–65 HRC<sub>3</sub>, теплостойкость – 350–400 °С, что практически равно теплостойкости углеродистой стали. Допустимая скорость резания составляет – 15–25 м/мин.

Из группы легированных инструментальных сталей особо необходимо выделить сталь ХВГ, которая имеет весьма малую склонность к короблению при термообработке и используется для изготовления длинномерных режущих инструментов (протяжки, гаечные метчики), работающих с малыми скоростями резания, а также корпусов и державок сборных инструментов.

По своему назначению легированные инструментальные стали подразделяются на две группы:

- 1) сталь для режущего и измерительного инструмента;
- 2) сталь для штампового инструмента.

Практическое применение легированных инструментальных сталей в металлообработке ограничено низкой теплостойкостью (табл. 3, 4).

Таблица 3

Сталь для режущего и измерительного инструмента

Марка	Характеристика	Область использования
13Х	Стали небольшой прокаливаемости	Бритвенные ножи и лезвия, острые хирургические инструменты, гравировальный инструмент
В2Ф		Ножовочные полотна и пилы по металлу
9Х1	Стали повышенной прокаливаемости	Валики холодной прокатки, пробойники, холодновысадочные матрицы и пуансоны, деревообрабатывающие инструменты
12Х1		Измерительные инструменты (плитки, калибры, шаблоны)

Марка	Характеристика	Область использования
<b>9XC</b>	Стали повышенной прокаливаемости	Инструменты для обработки дерева; клейма; сверла, метчики, плашки, развертки, гребенки, фрезы
<b>XBG</b>		Измерительные и режущие инструменты, для которых недопустимо повышенное коробление при закалке: резьбовые калибры, протяжки, длинные метчики и развертки, плашки и др. Ножи для бумажной промышленности. Корпуса и державки для сборных инструментов
9XBG		Резьбовые калибры. Лекала сложной формы. Сложные точные штампы (для холодных работ), которые при закалке не должны подвергаться короблению и значительным объемным изменениям
XBCGF <b>XBCG</b>		Слесарный инструмент. Развертки, плашки. Инструменты для обработки дерева. Ножи для бумажной промышленности
9X5BF 8X6HFT		Инструменты для обработки дерева. Бритвы, то есть тонколезвийный инструмент

*Примечание:* полужирным начертанием выделены наиболее используемые материалы для изготовления режущих инструментов.

Таблица 4

### Сталь для штампового инструмента

Марка	Характеристика	Область использования
<b>X6BF</b>	Для деформирования в холодном состоянии	Резьбонакатные инструменты, матрицы, пуансоны, зубонакатные инструменты и др. Ручные ножовочные полотна. Деревообрабатывающие фрезы
X12 X12BMФ		Матрицы и пуансоны штампов с высокой устойчивостью против истирания, не подвергающиеся сильным толчкам и ударам. Гибочные штампы. Волочильные доски. Глазки для калибрования пруткового материала под накатку резьбы и др.
X12Ф1		То же, что и для X12, но иногда требуется более высокая вязкость. Профилировочные ролики сложной формы. Секции кузовных штампов сложной формы. Сложные дыропрошивные матрицы; матрицы и пуансоны вырубных и просечных штампов

Марка	Характеристика	Область использования
6Х6В3МФС	Для деформирования в холодном состоянии	Резьбонакатные ролики, зубо- и шлиценакатники, обрезающие матрицы, пуансоны и другие инструменты для холодного деформирования металлов повышенной твердости. Ножи трубоабразивных машин и гильотинных ножниц для резки высокопрочной стали с сплавов; ножи для рубки древесины
4ХС	Для ударных инструментов	Штампы горячей вытяжки, зубила, ножницы по горячей и холодной резке металлов
6ХС		Рубильные ножи, пневматические зубила и штампы небольших размеров для холодной штамповки
5ХВ2СФ 6ХВ2С		Резьбонакатные плашки, пуансоны, обжимные матрицы при холодной деформации, ножи при холодной резке металла и др.

*Примечание:* полужирным начертанием выделены наиболее используемые материалы для изготовления режущих инструментов.

### 3. БЫСТРОРЕЖУЩИЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Появились в начале 20 века. Быстрорежущие стали от углеродистых и легированных инструментальных сталей отличаются высоким содержанием легирующих элементов: вольфрама; хрома; молибдена; ванадия; кобальта; азота.

К – кобальт – увеличивает ударную вязкость, жаростойкость.

А – азот – повышает режущие свойства инструмента на 20–30 % и твердость на 1–2 единицы HRC<sub>3</sub>.

Современные быстрорежущие стали можно разделить на две группы:

1) стали нормальной теплостойкости (их твердость составляет 63–65 HRC<sub>3</sub>, теплостойкость – 615–620 °С);

2) стали повышенной и высокой теплостойкости (повышение содержания углерода увеличивает вторичную твердость до 67–67,5 HRC<sub>3</sub>, теплостойкость – до 630–635 °С при сохранении прочности и вязкости, улучшает износостойкость за счет увеличения количества карбидов, увеличивает стойкость инструментов на 50–75 %).

Стали первой группы используются для изготовления режущих инструментов для обработки деталей из конструкционных сталей, чугунов, цветных металлов и пластмасс (табл. 5).

Таблица 5

Назначение быстрорежущей стали нормальной теплостойкости

Марка стали по ГОСТ	Аналог по ISO 4957	Область применения
P18 W 17,0–18,5 %	HS18-0-1	Все виды режущего инструмента при обработке углеродистых и легированных конструкционных сталей
P12 W 12,0–13,0 %		Все виды режущего инструмента для обработки конструкционных сталей взамен марки P18
P9 W 8,5–10,0 %		Чистовые и получистовые режущие инструменты простой формы, не требующие большого объема шлифования и предназначенные для обработки конструкционных материалов с пределом прочности до 1 ГПа (сверла, изготавливаемые методом пластического деформирования, деревообрабатывающие инструменты)

Марка стали по ГОСТ	Аналог по ISO 4957	Область применения
P6M5 W 5,5–6,5 %	HS6-5-2	То же, что и P18, но предпочтительна для изготовления резьбонарезного инструмента и инструмента, работающего с ударными нагрузками
P6AM5 W 5,5–6,5 %	HS6-5-2	По сравнению с P6M5 имеет повышенную твердость и износостойкость
P6M3 W 5,5–6,5 %		Чистовые и получистовые инструменты небольших размеров: сверла, зенкеры, дисковые фрезы – для обработки конструкционных материалов. Имеет пониженную шлифуемость

Стали второй группы используются для изготовления режущего инструмента для обработки деталей из коррозионностойких и жаропрочных сталей и сплавов в условиях повышенного нагрева лезвия, а также сталей и сплавов повышенной твердости и вязкости (табл. 6).

**Основной недостаток** – неравномерность распределения карбидов. Для устранения этого недостатка в настоящее время предложены современные технологические способы получения быстрорежущих сталей.

Таблица 6

## Назначение быстрорежущей стали повышенной теплостойкости

Марка стали по ГОСТ	Аналог по ISO 4957	Область применения
10P6M5		То же, что и P6M5, но имеет больший период стойкости
P12Ф3		Чистовые инструменты для обработки вязких аустенитных сталей и материалов, обладающих абразивными свойствами
P9Ф5		Инструменты простой формы, не требующие больших объемов шлифования (резцы, зенкеры, развертки), для обработки материалов с повышенными абразивными свойствами. Чистовые инструменты для обработки легированных сталей и сплавов
P9К5		Обработка нержавеющей и жаропрочных сталей, а также сталей повышенной прочности. Черновые и получистовые режущие инструменты. Фрезы, долбяки, метчики

Марка стали по ГОСТ	Аналог по ISO 4957	Область применения
P6M5K5	HS6-5-2-5	Черновые и получистовые инструменты для обработки улучшенных легированных (нержавеющих) сталей в условиях повышенного разогрева режущей кромки. Основная быстрорежущая сталь повышенной производительности. Фрезы, долбяки, зенкеры, метчики, плашки, фасонные резцы
P9K5		Обработка нержавеющей и жаропрочных сталей, а также сталей повышенной прочности. Черновые и получистовые режущие инструменты. Фрезы, долбяки, метчики
P9K10		Резцы, червячные фрезы, зенкеры, работающие на повышенных режимах резания углеродистых, легированных конструкционных сталей, различных труднообрабатываемых материалов
P6M5Ф3	HS6-5-3	Чистовые и получистовые инструменты для обработки углеродистых и легированных сталей на повышенных скоростях. Для инструментов с высоконагруженными режущими кромками: фасонные резцы, фрезы, протяжки и т. д.
P9M4K8	HS10-4-3-10	Различные инструменты для обработки труднообрабатываемых сталей и сплавов (высокопрочных, жаропрочных, нержавеющей), а также улучшенных легированных сталей. Применяется, когда использование P6M5K5 недостаточно эффективно
P2AM9K5	HS2-9-1-8	Обладает высокой вязкостью. Используется для обработки улучшенных легированных и коррозионно-стойких, нержавеющей сталей
11P3AM3Ф2		Инструменты простой формы при обработке углеродистых и малолегированных сталей с пределом прочности до 800 МПа

Химический состав быстрорежущих сталей приведен в табл. 7.

Легирующий элемент **ванадий** при отпуске образует карбид ванадия (VC), который по твердости превышает сложный карбид типа  $(Fe,W)mCn$ , являющийся основным в структуре быстрорежущей стали. Следовательно, твердость быстрорежущей стали с ванадием достигает 67–68 HRC<sub>3</sub>, а теплостойкость – 630–635 °С. Наличие в структуре ванадиевых сталей большого количества карбидов высокой твердости обуславливает их высокую износостойкость, недостатком этих сталей является их плохая шлифуемость.

**Кобальт** в составе стали повышает теплопроводность и теплоустойчивость до 640–650 °С и одновременно вторичную твердость до 66–70 HRC<sub>3</sub>. Содержание кобальта не должно превышать 10 %, так как при большом содержании этого элемента увеличивается хрупкость стали.

Таблица 7

Содержание легирующих элементов в быстрорежущих сталях, %

Марка стали	С (углерод)	W (вольфрам)	Cr (хром)	V (ваннадий)	Mo (молибден)	Co (кобальт)
Стали нормальной теплостойкости						
P18	0,7–0,8	17,0–18,5	3,8–4,4	1,0–1,4	до 1,0	–
P12	0,8–0,9	12,0–13,0	3,8–4,4	1,5–1,9	до 1,0	–
P9	0,85–0,95	8,5–10,0	3,8–4,4	2,0–2,6	до 1,0	–
P6M5	0,8–0,9	5,5–6,5	3,8–4,4	1,7–2,1	5,0–5,5	–
P6M3	0,85–0,95	5,5–6,5	3,0–3,5	2,0–2,5	3,0–3,6	–
P8M3	0,8–0,9	7,6–8,4	3,4–4,0	1,6–1,9	3,0–3,5	–
P2M5	0,95–1,05	1,7–2,3	3,8–4,3	0,9–1,3	4,8–5,3	–
11M5Ф	1,0	–	3,8	1,2	5,1	–
Стали повышенной теплостойкости						
10P8M3	0,96–1,05	7,5–8,5	3,3–3,9	1,7–2,1	3,0–3,6	–
10P6M5	1,05	6,0	4,0	2,4	5,0	–
P12Ф3	0,94–1,04	12,0–13,5	3,5–4,0	2,5–3,3	до 1,0	–
P2M3Ф8	0,90–1,05	2,0–2,5	4,0–4,8	7,5–8,5	2,5–3,0	–
P9Ф5	1,4–1,5	9,0–10,5	3,8–4,4	4,3–5,1	до 1,0	–
P18Ф2K5	0,85–0,95	17,0–18,5	3,8–4,4	1,8–2,4	до 1,0	5,0–6,0
P6M5K5	0,8–0,90	6,0–7,0	3,8–4,3	1,7–2,2	4,8–5,8	4,8–5,3
P9K5	0,9–1,0	9,0–10,5	3,8–4,4	2,0–2,6	до 1,0	5,0–6,0
P9K10	0,9–1,0	9,0–10,5	3,8–4,4	2,0–2,6	до 1,0	9,5–10,5
P9M4K8Ф	1,0–1,1	8,5–9,6	3,0–3,6	2,1–2,5	3,8–4,3	7,5–8,5
10P6M5Ф2	1,0	5,75	4,1	2,1	6,0	8,0
P3M3Ф4K5	1,0	3,0	4,0	4,0	3,0	5,0
A11P3M3Ф2	1,02–1,12	2,5–3,3	3,8–4,4	2,2–2,7	2,5–3,0	–
Стали высокой теплостойкости						
B11M7K23	0,1	11	–	0,5	7	23
B14M7K25	0,1	14	–	0,5	7	25
3B20K20X4	0,25	20	4,0	1,0	–	20

Рассмотрим перспективные направления совершенствования быстрорежущих сталей, направленные на устранение основного недостатка – неравномерности распределения карбидов:

- создание мало- и безвольфрамовых быстрорежущих сталей взамен вольфрамсодержащих;
- совершенствование технологических методов получения сталей;
- нанесение на быстрорежущие стали износостойких покрытий.

### 3.1. Мало- и безвольфрамовые быстрорежущие стали

Низколегированные безвольфрамовые быстрорежущие стали марок 11M5Ф и 11M5Ф10С отличаются повышенной твердостью, теплостойкостью, вязкостью и прочностью.

Маловольфрамовые быстрорежущие стали выпускаются следующих марок: P2M5, 11P3AM3Ф2, P3M3Ф4K5, P2M3Ф8.

Эти стали рационально использовать для чистового и получистового точения, фрезерования углеродистых и низколегированных сталей, а сверлить – только на пониженных режимах резания (табл. 8).

Таблица 8

Назначение маловольфрамовых быстрорежущих сталей

Марка стали по ГОСТ	Аналог по ISO 4957	Область применения, свойства
11P3M3Ф2Б		Ножовочные полотна, сверла, фрезы, метчики. Период стойкости $\approx$ P6M5, более высокая износостойкость
11P3AM3Ф2		Инструменты простой формы при обработке углеродистых и низколегированных сталей с пределом прочности до 800 МПа. Ножовочные полотна, пилы, сверла, фрезы, метчики
P2Ф2K8M6 P0Ф2K8M6		Сверла, развертки, метчики (для сталей с $HV \geq 300$ и $\sigma_b = 0,9-1,0$ ГПа). Протяжки, червячные фрезы, все виды резцов
P2AM9K5		Обладает высокой вязкостью. Используется для обработки улучшенных легированных и коррозионно-стойких, нержавеющей сталей

По стойкости перечисленные стали уступают вольфрамо-молибденовым, следовательно, их следует использовать при обработке углеродистых низколегированных сталей на относительно невысоких режимах резания и при обильном охлаждении, то есть когда полное использование режущих свойств стали P6M5 невыгодно по технико-экономическим показателям.

### 3.2. Порошковые быстрорежущие стали

Перспективным для повышения качества быстрорежущих сталей является получение их методом порошковой металлургии.

Выпускаются следующие марки: P12M3Ф2K8-МП (материал порошковый), С12МФ5-МП; С9М4К8-МП; Р6М5К5-МП; Р9М4К8-МП.

Их твердость – 68–70 HRC<sub>3</sub>, теплостойкость – до 700 °С. Эти материалы занимают промежуточное положение между быстрорежущими сталями и твердыми сплавами. Имеют равномерную однородную мелкозернистую структуру, хорошо шлифуются, меньше деформируются при термообработке, отличаются стабильностью эксплуатационных свойств. Период стойкости инструментов из этих сталей в 1,5 раза выше, чем у быстрорежущих сталей, а ударная вязкость выше в 2–6 раз.

Порошковые быстрорежущие стали рекомендуют для изготовления инструмента, обрабатывающего титановые сплавы, высоколегированные стали и другие труднообрабатываемые материалы в тяжелых условиях резания – прерывистая обработка, ударные нагрузки, повышенные скорости резания (табл. 9).

Таблица 9

Назначение порошковых быстрорежущих сталей

Марка стали	Коэффициент возрастания стойкости по сравнению со сталью		Примечание
Р6М5Ф3-МП	1,3–1,8	Р6М5Ф3	Фасонные резцы, сверла, зенкеры, развертки, метчики, протяжки, фрезы, долбяки, шеверы для обработки низко- и среднелегированных сталей
	2,0–5,0	X12МФ	Инструменты для холодного и полугорячего выдавливания легированных сталей и сплавов
Р7М2Ф6-МП	1,3–3,0	P18	Протяжки, метчики, концевые фрезы, развертки, фасонные резцы для чистовой обработки среднелегированных конструкционных, коррозионностойких и жаропрочных сталей и сплавов
	3,0–5,0	X12МФ	Инструменты для холодного деформирования (вырубка, высадка, выдавливание) углеродистых и легированных сталей

Марка стали	Коэффициент возрастания стойкости по сравнению со сталью		Примечание
P12MФ5-МП	1,5–2,0	P6MФ5	Фасонные резцы для обработки среднелегированных сталей. Протяжки, метчики, фрезы для чистовой обработки среднелегированных, легированных, коррозионностойких и высокопрочных сталей
P6M5K5-МП	1,5–2,0	P6M5K5	Фасонные резцы, сверла, зенкеры, развертки, фрезы, долбяки, шеверы для обработки среднелегированных, легированных, коррозионностойких сталей, жаропрочных сталей и сплавов
P9M4K8-МП	1,5–2,0	P9M4K8	Фасонные резцы, сверла, зенкеры, развертки, фрезы (червячные, концевые, дисковые, специальные), долбяки, шеверы для обработки высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов
P12M3K5Ф2-МП	1,5–2,0	P12M3K5Ф2	Фасонные резцы, сверла, зенкеры, развертки, протяжки, метчики, фрезы (червячные, концевые, дисковые, специальные), долбяки, шеверы для обработки высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов

### 3.3. Интерметаллоиды

Это высоколегированные безуглеродистые дисперсионно-твердеющие сплавы высокой теплостойкости (700–725 °С).

**Марки:** P18M3K25; P18M7K25; P10M5K25; 3B20K20X4; B16M4K16X4H2; B11M7K23; B14M7K25 и т. д.

Эти стали имеют повышенное содержание углерода (0,1–0,3 %), повышенную твердость после отпуска – до 70 HRC<sub>3</sub>, износостойкость, теплопроводность и сравнительно высокую прочность ( $\delta_B = 1500–3700$  МПа). Иногда их называют твердыми сплавами.

Основными легирующими элементами являются: кобальт (16–25 %), вольфрам (11–20 %), молибден (4–7 %). Упрочняющей фазой в этих сталях являются  $Co_7W_6$  или  $(FeW)_7Co_6$ .

Из них изготавливают инструменты, которыми обрабатывают специальные жаро- и коррозионностойкие стали, титановые сплавы. Стойкость инструментов в 10–30 раз выше, чем у P18.

### 3.4. Карбидостали

Применяются для изготовления режущих инструментов, представляют собой сплавы порошка карбида титана (TiC) и компонентов стальной связки на основе:

- быстрорежущей стали P6M5, P6M5K5;
- коррозионностойкой хромистой стали;
- нержавеющей стали X18H9, X12M;
- различных сплавов железа, легированных хромом, молибденом, медью, никелем, кобальтом.

Карбидостали получают по технологии порошковой металлургии, как обычные твердые сплавы. По свойствам карбидостали занимают промежуточное положение между быстрорежущими сталями и однокарбидными твердыми сплавами, соединяя в себе высокую твердость и износостойкость твердых сплавов с прочностью и вязкостью легированных сталей.

**Например:** карбидосталь, содержащая 50 % TiC + 50 % стали X4H2M8, имеет 73 HRA и  $\delta_b = 1,1$  ГПа.

## 4. ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ

Появились в конце 20-х годов прошлого века. Их изготавливают методом порошковой металлургии в виде пластин или коронок. Основными компонентами твердых сплавов являются карбиды тугоплавких металлов, мельчайшие частицы которых соединены связкой из сравнительно мягких и менее тугоплавких кобальта или никеля в смеси с молибденом:

- карбид вольфрама (WC);
- карбид титана (TiC);
- карбид тантала (TaC);
- карбид ниобия (NbC).

Порошки смешивают в определенных пропорциях и спекают при температуре 1500–2000 °С, получая твердость HRA 82–92, в дополнительной термообработке не нуждаются. Эти инструментальные

материалы сохраняют свои режущие свойства при температуре в зоне резания до 1000 °С.

Применяемые для обработки резанием твердые сплавы подразделяются на 4 группы:

- 1) вольфрамовые (однокарбидные) твердые сплавы – ВК;
- 2) титановольфрамовые (двухкарбидные) твердые сплавы – ТК;
- 3) титанотанталовольфрамовые (трехкарбидные) твердые сплавы – ТТК;
- 4) безвольфрамовые твердые сплавы.

#### **4.1. Вольфрамовые (однокарбидные) твердые сплавы**

Состоят из зерен карбида вольфрама, сцементированных кобальтом. Марки сплавов обозначаются буквами ВК, после которых цифрами указывается процентное содержание в сплаве кобальта (от 3 до 22 %).

**Например:** ВК – сплав содержит 6 % кобальта, остальное (94 %) – карбид вольфрама (WC).

В зависимости от химического состава и зернистости предел прочности при изгибе  $\delta_{и} = 1176\text{--}2107$  МПа, а твердость по HRA – 82–91.

Сплавы ВК используют для обработки хрупких материалов – чугуна, цветных металлов, стеклопластиков.

**Марки:** ВК3; ВК3-М; ВК-4В; ВК6; ВК6-М; ВК6-ОМ; ВК8; ВК10; ВК11-В; ВК15.

Буквы после марки указывают размер зерен (мкм):

- М – 1,0–1,5 мкм – сплав мелкозернистый;
- ОМ – 0,1–1,0 мкм – сплав особомелкозернистый;
- В – 3–5 мкм – сплав крупнозернистый;
- без букв за маркой зерна размером ~ 2 мкм.

Мелкозернистые сплавы имеют более плотную структуру, более износостойкие, но менее прочные.

Крупнозернистые сплавы более прочные и сопротивляемые ударным нагрузкам, но менее износостойкие.

Некоторые отечественные и все зарубежные производители подразделяют инструмент, в том числе твердосплавный, не по химическому составу, а по назначению для обработки того или иного материала. В соответствии со стандартом ISO 513 твердые сплавы подразделяются на 6 групп резания – **P, M, K, N, S** и **H** (табл. 10).

В свою очередь группы резания в зависимости от условий обработки подразделяют на подгруппы применения, обозначаемые числовым индексом от 01 до 30–50 [4].

Таблица 10

Области применения твердых сплавов по ISO 513

Группа резания (цветовой код)	Подгруппа применения	Основная область использования
Р (синий)	P01...P50	Все виды сталей, кроме сталей аустенитного класса
М (желтый)	M01...M40	Коррозионностойкие стали в состоянии поставки
К (красный)	K01...K40	Чугуны
Н (зеленый)	N01...N30	Алюминиевые и медные сплавы, неметаллические материалы
S (коричневый)	S01...S30	Жаропрочные стали и сплавы, титановые сплавы
Н (серый)	H01...H30	Твердые материалы: закаленные стали и чугуны, в том числе отбеленные

С увеличением индекса подгруппы условия обработки становятся более тяжелыми, начиная от чистового резания и заканчивая черновым с ударами. Чем больше индекс группы применения, тем ниже твердость и износостойкость твердого сплава и допустимая скорость резания, но выше прочность и ударная вязкость, что позволяет им работать в тяжелых условиях, с большими сечениями среза и ударными нагрузками. Малые индексы группы применения предназначены для чистовой высокоскоростной обработки без ударов.

Западные компании предлагают большую номенклатуру твердых сплавов, при этом каждая компания имеет собственную систему обозначения выпускаемых ею марок (табл. 11). В большинстве случаев используемое обозначение не несет информации ни о химическом составе, ни о свойствах этой марки твердого сплава, однако для каждой марки сплава всегда указывается группа резания и подгруппа применения. Подгруппы применения указываются ориентировочно, так как ряд марок твердых сплавов могут хорошо работать в нескольких подгруппах, и даже в разных группах резания.

## Назначение однокарбидных твердых сплавов

Марка	Подгруппа применения	Область использования, свойства
<b>ВК3</b>	K01–K05	Чистовое точение с малым сечением среза, окончательное нарезание резьбы, развертывание отверстий и других аналогичных видов обработки серого чугуна, цветных металлов и их сплавов, неметаллических материалов (резины, фибры, пластмассы, стекла, стеклопластиков). Резка листового стекла. Имеет высокую твердость и износостойкость, но чувствителен к ударным и вибрационным нагрузкам при резании. Допускает скорость резания до 200 м/мин
<b>ВК6</b>	K20–K30	Черновое и получистовое точение, предварительное нарезание резьбы токарными резцами, получистовое фрезерование сплошных поверхностей, рассверливание и растачивание отверстий, зенкерование отверстий при обработке серого чугуна, цветных металлов и их сплавов и неметаллических материалов. Износостойкость и допускаемая скорость резания – как у ВК3, эксплуатационная прочность и сопротивляемость ударам – выше, чем у ВК3-М
<b>ВК3-М</b>	K10	Чистовая обработка (точение, растачивание, нарезание резьбы, развертывание) твердых, легированных и отбеленных чугунов, цементированных и закаленных сталей, а также высокоабразивных неметаллических материалов. За счет мелкозернистой структуры имеет высокую износостойкость, достаточно высокую эксплуатационную прочность и сопротивляемость ударам, вибрациям и выкрашиваниям
<b>ВК6М</b>	K10–K20 M10	Получистовая обработка жаропрочных сталей и сплавов, коррозионностойких сталей аустенитного класса, твердых и закаленных чугунов, твердой бронзы, сплавов легких металлов, абразивных неметаллических материалов. Обработка закаленных сталей, а также сырых углеродистых и легированных сталей при тонких сечениях среза на весьма малых скоростях резания. Высокая износостойкость, выше, чем у сплава марки ВК6, при меньшей эксплуатационной прочности

Марка	Подгруппа применения	Область использования, свойства
<b>ВК6-ОМ</b>	K20–K30 M10 S30 H20	Чистовое и получистовое точение, растачивание, развертывание, нарезание резьбы при обработке твердых, легированных и отбеленных чугунов, закаленных сталей и некоторых марок коррозионностойких, высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов, особенно сплавов на основе титана, вольфрама и молибдена. Особомелкозернистая структура способствует более высокой износостойкости, чем у сплава марки ВК6М, при меньшей эксплуатационной прочности. Незначительное добавление карбида титана (2 %) повышает теплостойкость сплава
ВК6-В		Ударно-поворотное бурение шпуров в горных породах с коэффициентом крепости по шкале Протодьяконова $f = 8$ . Зарубка крепких каменных углей с незначительным включением твердых пород
<b>ВК8</b>	K30–K40 S10–S20 N30	Черновое точение при неравномерном сечении среза и прерывистом резании, строгании, черновом фрезеровании, сверлении, черновом рассверливании, черновом зенкерованием серого чугуна, цветных металлов и их сплавов и неметаллических материалов. Обработка нержавеющей, высокопрочных и жаропрочных труднообрабатываемых сталей и сплавов, в том числе сплавов титана. Имеет более высокую эксплуатационную прочность и сопротивляемость ударам, вибрациям и выкрашиваниям, чем ВК6, при меньшей износостойкости и допускаемой скорости резания до 125 м/мин
ВК8-В		Ударно-поворотное, ударно-вращательное и вращательно-ударное бурение шпуров и скважин в крепких горных породах с коэффициентом крепости по шкале Протодьяконова до $f = 14$ . Зарубка крепких каменных углей с включением твердых пород. Обработка гранитов и подобных по крепости горных пород
ВК8-ВК		Шарошечное бурение геологоразведочных, эксплуатационных и взрывных скважин в крепких и очень крепких абразивных горных породах с коэффициентом крепости по шкале Протодьяконова до $f = 18$
ВК10	M30	Волочение и калибровка прутков и труб из стали, цветных металлов и их сплавов при средней степени обжатия, быстроизнашивающихся деталей машин, приборов и измерительного инструмента, работающих при ударных нагрузках средней интенсивности

Марка	Подгруппа применения	Область использования, свойства
<b>БК10-ХОМ</b>	K30–K40 M30 S10–S20	Сверление, зенкерование, развертывание, фрезерование и зубофрезерование стали, чугуна, некоторых труднообрабатываемых материалов и неметаллов цельнотвердосплавным мелкоразмерным инструментом. Содержит карбид хрома. Высокая износостойкость и средняя эксплуатационная прочность
БК4-В		Бурение электро- и пневмосверлами углей, антрацитов, неокварцованных сланцев, калийных и каменных солей; бурение ручными и колонковыми электросверлами горных пород с коэффициентом крепости по шкале Протодяконова до $f = 8$ . Армирование шарошечных долот
БК11-В		Ударно-поворотное, ударно-вращательное, вращательно-ударное бурение шпуров и скважин в очень крепких и абразивных горных породах с коэффициентом крепости по шкале Протодяконова до $f = 18$
БК10-КС		Штамповка, высадка, вытяжка легированных и специальных сталей при ударных нагрузках малой интенсивности
БК20	K40	Штамповка, высадка, обрезка углеродистых и качественных сталей при ударных нагрузках средней и высокой интенсивности
БК11-БК		Шарошечное бурение геологоразведочных, эксплуатационных и взрывных шпуров и скважин в вязких, средней твердости и твердых абразивных горных породах
БК15	K40	Режущие инструменты для обработки дерева. Обработка гранита и других горных пород при работе пневматическими молотками. Бесстружковая обработка металлов, быстроизнашивающихся деталей машин, приборов и приспособлений. Средняя износостойкость, высокая эксплуатационная прочность
БК20-КС		Ударно-поворотное, ударно-вращательное бурение шпуров и скважин в высшей степени крепких горных пород с коэффициентом крепости по шкале Протодяконова до $f = 20$

*Примечание:* жирным шрифтом выделены наиболее используемые материалы для изготовления режущих инструментов.

## 4.2. Титановольфрамовые (двухкарбидные) твердые сплавы

В состав этих твердых сплавов входит кроме карбида вольфрама и кобальта карбид титана маркируется ТК. В маркировке сплавов цифра, стоящая после буквы К, обозначает процентное содержание кобальта, цифра после буквы Т – содержание карбида титана, а остальное – карбид вольфрама.

**Например:** Т15К6 – 6 % Со; 15 % TiC; 79 % WC.

**Марки:** Т30К4; Т60К4; Т15К6; Т14К8; Т5К10; Т5К12 и т. д. обладают большей стойкостью к окислению, твердостью (87–97 HRA) и теплостойкостью, чем сплавы марок ВК, но меньшим коэффициентом теплопроводности и модулем упругости.

Области использования твердых сплавов приведены в табл. 12.

Таблица 12

Назначение двухкарбидных твердых сплавов

Марка	Подгруппа применения	Область использования, свойства
Т30К4	P01	Чистовое и тонкое точение с малым сечением среза (типа алмазной обработки); нарезание резьбы и развертывания отверстий в незакаленных и закаленных углеродистых и легированных сталях, труднообрабатываемых материалах. Имеет небольшую для группы ТК износостойкость и твердость (92 HRA) прочность $\sigma_{и} = 980$ МПа и допускает скорость резания до 500 м/мин
Т15К6	P10	Получистовое точение при непрерывном резании, чистовое точение при прерывистом резании, нарезание резьбы токарными резцами и вращающимися головками, получистовое и чистовое фрезерование сплошных поверхностей, расверливание и растачивание предварительно обработанных отверстий, чистовое зенкерование, развертывание и другие аналогичные виды обработки углеродистых и легированных сталей. Твердость равна 90 HRA, прочность $\sigma_{и} = 1176$ МПа, допускает скорость резания до 400 м/мин

Марка	Подгруппа применения	Область использования, свойства
T14K8	P20	Черновое точение при неравномерном сечении среза и непрерывном резании, получистовое и чистовое точения при прерывистом резании; черновое фрезерование сплошных поверхностей; рассверливание литых и кованных отверстий, черновое зенкерование и другие подобные виды обработки углеродистых и легированных сталей. Твердость равна 89,5 HRA, прочность $\sigma_{и} = 1274$ МПа, допускает скорость резания до 200 м/мин. Имеет большую эксплуатационную прочность и сопротивляемость вибрациям и ударам, чем T15K6
T5K10	P30–P40	Черновое точение при неравномерном сечении среза и прерывистом резании, фасонное точение, отрезка токарными резцами; чистовое строгание; черновое фрезерование прерывистых поверхностей и других видов обработки углеродистых и легированных сталей, преимущественно в виде поковок, штамповок и отливок по корке и окалине. Твердость равна 88,5 HRA, прочность $\sigma_{и} = 1421$ МПа, допускает скорость резания до 150 м/мин

#### 4.3. Титанотанталовольфрамовые (трехкарбидные) твердые сплавы

Содержат карбид титана, карбид тантала, карбид вольфрама, в качестве связки – кобальт, маркируются ТТК. Цифра, стоящая после ТТ, указывает суммарное содержание карбидов титана и тантала, а после буквы К – процентное содержание кобальта.

**Например:** ТТ7К12 – содержит 7 % (TiC + TaC), 12 % Co, 81 % (WC).

**Марки:** ТТ7К12; ТТ8К6; ТТ10К8Б; ТТ20К9 и др.

В сплавах группы ТТК карбид тантала повышает предел усталости при циклическом нагружении, термостойкость и твердость при температуре в зоне резания 600–800 °С. В зависимости от марки твердость колеблется в пределах 87–91 HRA, а предел прочности при изгибе  $\delta_{и} = 1323$ –1666 МПа.

Области использования твердых сплавов данной группы приведены в табл. 13.

## Назначение трехкарбидных твердых сплавов

Марка	Подгруппа применения	Область использования
ТТ7К12	P40–P50 M40	Тяжелое черновое точение стальных поковок, штамповок и отливок по корке при наличии песка, шлака и различных неметаллических включений, при неравномерном сечении среза и наличии ударов. Всех видов строгания углеродистых и легированных сталей. Сверление отверстий в стали
ТТ8К6	H01 M10 S10	Чистовое и получистовое точение, растачивание, фрезерование и сверление серого, ковкого и отбеленного чугуна. Непрерывное точение с небольшими сечениями среза стального литья, высокопрочных, нержавеющей сталей. Обработка сплавов цветных металлов и некоторых марок титановых сплавов при резании с малыми и средними сечениями среза. По стойкости при обработке серого и ковкого чугуна в два раза превосходит сплав ВК6М
ТТ10К8Б	P20 M20 S10–20	Черновая и получистовая обработка некоторых марок труднообрабатываемых материалов, нержавеющей сталей аустенитного класса, маломагнитных сталей и жаропрочных сталей и сплавов, в том числе титановых
ТТ20К9	P25–P30	Фрезерование стали, особенно глубоких пазов и другие виды обработки с повышенными требованиями к сопротивлению сплава тепловым и механическим циклическим нагрузкам
Т8К7*	K10	Фрезерование труднообрабатываемых чугунов

\* Этот сплав является трехкарбидным, однако из-за малого содержания карбидов тантала (около 0,5 %) его принято обозначать аналогично двухкарбидным твердым сплавам.

С целью экономии дефицитного вольфрама и кобальта выпускают безвольфрамовые твердые сплавы (керметы) на основе карбидов и карбонитридов титана с никельмолибденовой связкой. Наиболее распространенные отечественные марки приведены в табл. 14.

## Назначение безвольфрамовых твердых сплавов

Марка	Подгруппа применения	Область использования
ТН20	P01–P10	Чистовое и получистовое точение при непрерывном резании углеродистых низколегированных конструкционных сталей, сплавов на основе меди, низколегированных сплавов никеля, серых чугунов и полиэтилена. Чистовое и получистовое торцовое фрезерование деталей из чугуна
КНТ16	P10–P20	Чистовое и получистовое точение при непрерывном резании углеродистых низколегированных конструкционных сталей, медных цветных металлов, низколегированных сплавов никеля, в том числе при неравномерном сечении среза. Чистовое и получистовое фрезерование деталей из серого и ковкого чугуна, углеродистых и легированных сталей

## 5. РЕЖУЩАЯ КЕРАМИКА

Появилась в начале 50-х годов прошлого века. Исходный материал – тонкоизмельченный (размер зерна 1–2 мкм) порошок корунда – искусственный оксид алюминия  $Al_2O_3$ , полученный прокаливанием технического глинозема при температуре 1500–1700 °С.

Режущая керамика имеет:

- твердость до 95 HRA;
- теплостойкость до 1400 °С;
- высокую износостойкость;
- малое сходство с металлами;
- пониженную склонность к схватыванию с обрабатываемым материалом;
- большую экономичность благодаря дешевизне исходного материала;
- низкое содержание карбидов тугоплавких материалов (титана, молибдена и т. д.).

**Недостатки:** низкая ударная вязкость (0,5–1,2 Н·м/см<sup>2</sup>); низкая пластичность, плохая сопротивляемость циклическим изменениям силовой и тепловой нагрузки.

**Основное назначение:** тонкое, чистовое и получистовое точение; растачивание и торцовое фрезерование на оборудовании, имеющем высокую жесткость; скорость резания 100–700 м/мин; подача – 0,04–0,6 мм/об; глубина резания – 0,3–2,5 мм.

Режущая керамика подразделяется на три базовые группы, отличающиеся составом, технологией изготовления и физико-механическими свойствами.

### 5.1. Оксидная керамика

Состоит из оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) и небольшого количества оксидов других материалов. Имеет белый цвет.

Мелкозернистая структура (0,5 мкм) обеспечивает высокую твердость, износостойкость, низкий предел прочности на изгиб, вязкость и теплопроводность.

Из приведенных в табл. 15 марок наибольшее распространение имеют марки ВО-13, ВШ-75 ( $\sigma_{и} = 400\text{--}550$  МПа, твердость – 91–93 HRC<sub>3</sub>, теплостойкость – 1200 °С).

Таблица 15

Назначение оксидной керамики

Марка	Характеристика	Область использования
ЦМ-332, ВО-13, ВО-130, ВО-100, ВО-18, ВО-180, ВШ-75	Оксидная (СА)	Высокоскоростное точение нетермообработанных сталей (качественных конструкционных, улучшенных, конструкционных легированных) с твердостью 160–380 НВ, а также серых чугунов твердостью 143–289 НВ без применения СОЖ

### 5.2. Оксидно-карбидная керамика (керметы)

По своему составу является промежуточной композицией между оксидной керамикой и твердым сплавом. В качестве карбидной составляющей применяют смесь карбидов вольфрама и молибдена или карбидов молибдена и титана. Количество карбидов меняется от 20 до 40 % по массе.

Обладает:

- твердостью 93–95 HRC<sub>3</sub>;
- теплостойкостью 1250–1400 °С;
- $\delta_{и} = 650\text{--}860$  МПа.

По своему составу является промежуточной композицией между оксидной керамикой и твердым сплавом.

Основные марки и области использования оксидно-карбидной керамики приведены в табл. 16.

Таблица 16

### Назначение оксидно-карбидной керамики

Марка	Характеристика	Область использования
ВОК-200, В3, ВОК-60, ВОК-63, ВОК-71	Смешанная с TiC (СМ)	Чистовая и получистовая обработка резанием углеродистых и легированных сталей, цементуемых и закаленных с твердостью 30–50 HRC <sub>3</sub> , а также ковких, высокопрочных, отбеленных чугунов
ОНТ-20 (кортинит)	Смешанная с TiN (СМ)	Обработка закаленных сталей, отбеленных чугунов, медных и никелевых сплавов
ТВИН-400	На основе Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , армированная нитевидными кристаллами SiC (CR)	Обработка никелевых сплавов, закаленных высоколегированных и быстрорежущих сталей, чугунов с твердостью более 250 НВ, с высокими скоростями и большими подачами при черновом, получистовом и чистовом точении и фрезеровании

Смешанная керамика (обозначение СМ) помимо Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> имеет добавки TiC, TiN, TiCN, ZrO<sub>2</sub> и др. По сравнению с оксидной керамикой имеет большую прочность, и область ее рационального применения расширяется на точение термоулучшенных сталей, коррозионностойких сталей, специальных легированных чугунов.

Армированная (вискоризованная) керамика (обозначается CR) кроме Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> имеет в качестве армирующего компонента нитевидные высокопрочные кристаллы SiC (30–40 %). В результате вязкость, прочность и стойкость к термоудару существенно повышаются. Использование армированной керамики ориентировано в первую очередь на фрезерную обработку, а также для резания труднообрабатываемых материалов, в том числе закаленной стали и чугунов, жаропрочных сплавов.

### 5.3. Нитридная керамика

К этой группе относится силинит-Р – материал на основе нитрида кремния, композиция: 36,6 %  $\text{Si}_3\text{N}_4$  + 15,4 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 41,8 %  $\text{TiN}$ . Получают методом горячего прессования. Отличительные особенности:

- стабильность физических свойств и кристаллической структуры при высоких температурах;
- невысокая стоимость и доступность исходного продукта;
- отсутствие в составе вольфрама и его соединений;
- отсутствие адгезии по отношению к черным и цветным металлам.

Обладает:

- твердостью 94–96 HRC<sub>3</sub>;
- теплостойкостью 1200 °С;
- $\delta_{\text{н}} = 500\text{--}700$  МПа.

Назначение нитридной керамики приведено в табл. 17.

Таблица 17

Назначение нитридной керамики

Марка	Характеристика	Область использования
ТВИН-200 Силинит-Р	Нитридная (CN)	Обработка всех видов чугунов с большими подачами и скоростями при черновом, получистовом и чистовом точении, фрезеровании, для обработки сплавов на основе никеля и кобальта. Возможно применение СОЖ
ВОКС-300, ВОК-95С, ВОК-95М, Сиалоны	Слоистый керамический материал на твердосплавной подложке (CN)	Чистовая и получистовая обработка резанием углеродистых, легированных, закаленных сталей, различных чугунов, в том числе прерывистого точения. Нарезание резьбы и канавок в деталях из закаленной стали

Нитридная керамика (обозначение CN), более термостойка, имеет более высокую стойкость к термоударам, прочность и вязкость. Она рекомендуется для точения и фрезерования серого чугуна на высоких скоростях резания, в том числе с СОЖ. Однако она не обладает достаточной химической инертностью, как керамика на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$

и при обработке углеродистых сталей имеет низкую стойкость. Поэтому без покрытий не рекомендуется для их обработки.

Группа нитридной керамики SiAlON (сиалоны) представляют собой твердые растворы переменного состава, образующиеся на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при замещении атомов Si на Al, N и O, для которых характерна высокая химическая инертность и низкий коэффициент термического расширения. В первую очередь сиалоны предназначены для обработки жаропрочных сплавов.

## **6. СВЕРХТВЕРДЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Развитие техники и технологии высоких давлений и температур обусловило создание широкой гаммы различных синтетических сверхтвердых материалов на основе алмаза и кубического нитрида бора, отличающихся по способу получения, структуре и физико-механическим свойствам. Синтетические алмазы и кубический нитрид бора делятся на два класса:

- 1) порошковые материалы, применяемые для изготовления абразивного инструмента;
- 2) поликристаллические материалы, изготавливаемые в виде цилиндрических вставок и пластинок для оснащения режущего инструмента.

Поликристаллические материалы в свою очередь подразделяются на три группы:

- поликристаллы на основе алмаза;
- поликристаллы на основе нитрида бора;
- композиционные (двухслойные) поликристаллы.

### **6.1. Поликристаллы на основе алмаза**

Делятся на две группы:

- 1) поликристаллы алмаза, полученные в результате фазового перехода графита в алмаз в присутствии катализаторов при давлении  $10^5$  МПа и  $t = 2000$  °С;
- 2) поликристаллы алмаза, полученные спеканием алмазных зерен, – имеется три разновидности:

– полученные спеканием мелкого алмазного порошка в чистом виде или после специальной предварительной обработки для активизации процесса спекания, представляют собой однофазный продукт;

– представляют собой гетерогенный композит, состоящий из частиц алмаза, скрепленных связкой, которая располагается в виде тонких прослоек между кристаллами алмаза, и обладающих высокой прочностью и твердостью;

– полученные пропиткой алмазного порошка металлическим связующим при высоких давлениях и температурах. В качестве связки используют никель, кобальт, железо, хром.

Режущие инструменты обладают:

– высокой износостойкостью;

– хорошей теплостойкостью;

– малым коэффициентом линейного и объемного расширения;

– небольшим коэффициентом трения;

– малой адгезионной способностью к металлам за исключением железа и его сплавов с углеродом;

– высокой производительностью на высоких скоростях резания и стойкостью при обработке цветных металлов и их сплавов, титана и его сплавов, пластмасс.

**Недостаток:** интенсивное растворение в железе и его сплавах с углеродом при температуре 700–800 °С.

**Физико-механические свойства:**

– микротвердость – 70–100 ГПа;

–  $\delta_{и} = 500\text{--}2000$  МПа;

– теплостойкость – 700–800 °С;

– предел прочности на сжатие – от 200 до 400 МПа (баллас), от 4400 до 5000 МПа (карбонит).

## 6.2. Поликристаллы на основе нитрида бора

Инструменты данной группы широко применяются для обработки закаленных сталей и чугунов. Незначительно уступая алмазу по твердости, они отличаются высокой теплостойкостью, стойкостью к циклическому воздействию высоких температур и химической инертностью к железу.

Выпускаемые промышленностью марки поликристаллических сверхтвердых материалов указаны в табл. 18, а области их использования – в табл. 19.

## Марки поликристаллических сверхтвердых материалов

Марка	Твердость, HV, ГПа	Теплостойкость, °С
Композит 01	60–80	1100–1300
Композит 02	60–90	900–1000
Композит 03	60	1000
Композит 05	70	1000
Композит 09	60–90	1500
Композит 10	50–90	750–850

**Физико-механические свойства:**

- микротвердость – 20–40 ГПа;
- $\delta_{и}$  = 250–1200 МПа;
- теплостойкость – 800–1500 °С;
- предел прочности на сжатие – от 2000 до 4000 МПа (карбонит).

**6.3. Композиционные (двухслойные) поликристаллические сверхтвердые материалы**

Принципиальной особенностью этих материалов является то, что спекание порошков сверхтвердых материалов производится при высоких температурах и давлениях на твердосплавной подложке, в результате чего образуется слой поликристаллического сверхтвердого материала толщиной 0,5–2 мм, прочно связанный с материалом подложки.

Двухслойные композиционные материалы имеют ряд преимуществ по сравнению с однослойными:

- упрощается технология крепления режущего инструмента в корпусе державки путем припайки к твердосплавной подложке;
- наличие подложки придает этим материалам повышенную ударную вязкость.

**Марки:**

- на основе кубического нитрида бора: 05Д–2С, 10Д, БПК;
- на основе алмаза: ДАП, ДИАМЕТ, АМК–25, АМК–27, АТП.

Таблица 19

## Отечественные сверхтвердые материалы

Марка	Характеристика	Область использования
Композит 01 (Эльбор Р) Композит 02 (Бельбор)	$t = 1100-1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 60–80 НВ	Тонкое и чистовое точение без ударов, фрезерование закаленных сталей и чугунов любой твердости, твердых сплавов с содержанием связки более 15 %
Композит 03 (Исмит)	$t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 60 НВ	Чистовая и получистовая обработка закаленных сталей и чугунов любой твердости
Композит 05 Композит 05ИТ Композит КПЗ	$t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 70 НВ	Предварительное и окончательное точение без ударов закаленных сталей твердостью до 55 HRC и серого чугуна твердостью 160–600 НВ; глубина резания – 0,2–2 мм, торцовое фрезерование чугуна
Композит 06		Чистовое точение закаленных сталей твердостью до 63HRC
Композит 10 (Гексанит Р)		Предварительное и окончательное точение без ударов и с ударами, торцовое фрезерование сталей и чугунов любой твердости, твердых сплавов с содержанием связки более 15 %, прерывистое точение. Глубина резания 0,05–0,7 мм
Композит 10Д Томал 10		Черновое, получистовое и чистовое точение и фрезерование чугунов любой твердости, точение и растачивание сталей и сплавов на основе меди, резание по литейной корке
Композит 11 (Киборит)		Предварительное и окончательное точение без ударов и с ударами, закаленных сталей и чугунов любой твердости, износостойких плазменных наплавов, торцовое фрезерование закаленных сталей и чугунов

*Примечание:* некоторые из вышеуказанных марок отечественных ПКНБ можно приобрести только из старых запасов, так как их изготовление прекратилось.

## 6.4. Зарубежные сверхтвердые материалы

**PKD (поликристаллический алмаз).** В 1995 году в компании GeneralElectric в США появились первые синтетические алмазы, шведский концерн ASEA почти параллельно разработал аналогичный метод. С помощью этих специальных методов при температуре от 1500 до 1800 °С и давлении от 53 000 до 100 000 бар могут быть изготовлены синтетические алмазы диаметром 1 мм из графита. Ежегодное производство PKD сегодня составляет почти 20 тонн, которые могут быть использованы, прежде всего, для металлообрабатывающего инструмента в качестве шлифовального порошка и для изготовления отрезных шлифовальных кругов. Преимуществом PKD является постоянно высокое, всегда стабильное качество – необходимое условие для последующего изготовления инструмента с одинаковыми свойствами. Характеристики PKD приведены в табл. 20.

**CBN (кубический нитрид бора).** CBN является высокопроизводительным режущим материалом из поликристаллической массы, которая изготавливается, как и PKD, по методу высокой температуры и высокого давления. CBN, уступающий по своей твердости только алмазу, предназначен для резания материалов, которые не могут быть обработаны с PKD или чистым алмазом. Основными сферами применения являются железо с твердостью 45 единиц по Бринеллю, а также чугун, легированный хромом, и сплавы на основе кобальта, никеля, железа. В отличие от поликристаллического и чистого алмазов, кубический нитрид бора не вступает в реакцию с содержащимися в вышеуказанных материалах элементами, образующими карбид. CBN вступает в реакцию с кислородом только начиная с температуры 1200 °С, поэтому обладает недостижимой тепловой стойкостью. Инструмент из CBN достигает пределов своих возможностей только при обработке «суперсплавов» в самолетостроении и производстве реакторов, имеющих четко выраженную аустенитную фазу и одновременно высокую вязкость. Типичными представителями «суперсплавов» являются инконель 718 и нимоник – материалы, высоколегированные никелем. Для этих материалов требуется проведение испытаний для выяснения возможностей обработки. Основные области применения различных видов CBN приведены в табл. 21.

Таблица 20

## Характеристика РКД

Обозначение	Классификация	Область применения, свойства	Средний размер зерна	Содержание алмаза
РКД	Мелкое зерно	Алюминий и алюминиевые сплавы системы AISi с содержанием Si < 10 %, магниевые сплавы, латунь, медь, бронза, композиционные материалы на древесной основе. Превосходное качество режущих кромок, высокая износостойкость, высокое качество обработанной поверхности	2–4 мкм	~ 90 %
	Среднее зерно	Универсальные марки (общее применение для чистовой обработки). Алюминиевые сплавы системы AISi с содержанием Si < 14 %, медные сплавы, графит и композиционные материалы на основе графита или древесной основе, неспекаемая керамика и твердые сплавы (содержание связующего металла < 15 %). Высокая износостойкость и качество обработанной поверхности	5–10 мкм	~ 92 %
	Крупное зерно	Черновая и чистовая обработки. Алюминиевые сплавы системы AISi с содержанием Si > 14 %, абразивные материалы, MMC, неспекаемая керамика и твердые сплавы (содержание связующего металла < 15 %). Предельная износостойкость, высокая ударная прочность, высокая стойкость с обеспечением шероховатости обработанной поверхности от приемлемой до высококачественной	25 мкм	~ 94 %
	Смешанное зерно	Абразивные материалы (например, алюминиевые сплавы системы AISi с содержанием Si > 14 %, MMC, композитные материалы). Высокая износостойкость, высокая ударная прочность, инструмент сверхустойчив к разрушению при хорошей защитной фаске на режущей кромке, высокая стойкость при высоком качестве обработанной поверхности	2–4 мкм + 25 мкм	~ 95 %

## Характеристика CBN

Обозначение	Классификация	Область применения, свойства	Средний размер зерна	Содержание алмаза
CBN 10...	Низкое содержание CBN	Режущая кромка из CBN на твердосплавной подложке для чистой обработки, в том числе закаленных сталей и серого чугуна. Предназначен (особенно при точении) для съема стабильного, непрерывного припуска с глубиной резания < 0,5 мм. Высокая прочность на сжатие, низкая теплопроводность, высокая стойкость к абразивному износу, химическая стабильность, высокая ударная вязкость, хорошая чистота обработанной поверхности и высокая стойкость инструмента	2 мкм	
CBN 20...	Высокое содержание CBN с твердосплавной подложкой	Режущая кромка из CBN на твердосплавной подложке для обработки прежде всего серого чугуна (> 45 HRC), закаленной стали, инструментальной и штампованной стали, порошковых материалов на основе Fe-Si, сплавов на основе Ni-Cr (никелевый сплав – «Superalloys»), с упрочненной поверхностью или твердыми покрытиями на основе Co, Ni и Fe. Применяется для съема стабильного, непрерывного припуска с глубиной резания от 0,5 до 1,5 мм. Высокая теплопроводность, высокая прочность на разрыв, высокое качество обработанной поверхности	2 мкм	
CBN30...	Высокое содержание CBN без твердосплавной подложки	Режущая кромка из цельного CBN без твердосплавной подложки для черновой обработки серого и отбеленного чугуна (> 45 HRC), закаленной стали. Высокая прочность на разрыв, высокая износостойкость, очень высокая химическая стабильность, специфическая интенсивность износа Используется в державках, сверлильном и расточном инструменте, резцах, а также торцовых фрезах с прихватами и отрицательной геометрией переднего угла	15 мкм	

## 7. АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К абразивным материалам относятся такие естественные и искусственные материалы, основными составляющими которых являются минералы высокой твердости. Они подразделяются на природные (естественные) и искусственные.

### 7.1. Природные абразивные материалы

**Алмаз (А)** – минерал, состоящий из кристаллического углерода с кубической решеткой. Он обладает наибольшей твердостью из всех известных материалов (микротвердость – 86–100 ГПа), анизотропен (твердость в различных направлениях различна), обладает наибольшим модулем упругости и минимальным коэффициентом линейного расширения.

При нагреве до высокой температуры алмаз превращается в графит и аморфный углерод. В окислительной среде такое превращение начинается при 600 °С, в защищенной (водородной) – при 1200 °С; при нагреве в контакте с железом при 800 °С наблюдается адгезия. Алмаз обладает высокой тепло- и температуропроводимостью, большим сопротивлением сжатию, но хрупок из-за небольшого сопротивления изгибу и вибрационным нагрузкам. Из всех добываемых алмазов около 80 % используется для технических нужд и около 20 % – в ювелирной промышленности.

Физико-механические свойства:

- твердость (по Моосу) – 10;
- $\delta_{и} = 300$  МПа;
- $\delta_{сж} = 2000$  МПа;
- температура плавления – 4000 °С;
- коэффициент линейного теплового расширения –  $(0,9–1,45) \cdot 10^{-6}$ ;
- коэффициент трения – 0,08–0,1.

Из технических алмазов изготавливают инструменты для шлифования, доводки, резки различных материалов. Используют:

- при волочении проволоки;
- для бурения горных пород;
- при сверлении твердых сортов стекла;
- карандаши и ролики для правки шлифовальных кругов;

– наконечники в приборах для контроля твердости в измерительных приборах;

– для обработки часовых и приборных камней и т. д.

**Корунд (Е)** – горная порода, состоящая на 80–95 % из кристаллического оксида алюминия  $Al_2O_3$  с примесью кварца и других материалов.

Корунд имеет микротвердость 19–20 ГПа, твердость по Моосу – 9, применяется для изготовления шлифпорошков и микропорошков для шлифования и полирования изделий из металла и стекла.

**Наждак** – горная порода, состоящая из корунда, магнетита, гематита (оксиды железа) и кварца; содержание корунда в наждаке  $\approx 30\%$ . Из наждака изготавливают шлифзерна для шлифования свободным абразивом.

**Гранат** – минерал с кубическим типом решетки, представляет собой соединение алюминия, железа, хрома, кальция, магния и марганца с кремниевой кислотой. Шлифзерна из граната используют для изготовления шлифовальной шкурки, применяемой при обработке дерева, пластмасс, кожи.

**Кремень** – содержит не менее 96 %  $SiO_2$  и не более 1 %  $CaO$ ; твердость по Моосу –  $\sim 7$ ; микротвердость 10–11 ГПа, применяется в виде порошков и зерен для изготовления шлифовальной шкурки, применяемой при обработке эбонита, дерева, кожи.

## 7.2. Искусственные абразивные материалы

**Алмаз синтетический (АС)** – абразивный материал, получаемый синтезом из графита при давлении порядка 1050–1060 МПа и температуре  $\approx 1500$ – $2000$  °С.

**Марки:** АССО, АССР, АСВ, АСК, АСС (эта марка используется для изготовления бурового инструмента, резки корунда и правки абразивных кругов).

Синтетические алмазы широко применяются для изготовления алмазно-абразивного инструмента на различных связках, а порошки из этого материала – для изготовления паст, применяемых на доводочных и притирочных операциях.

**Эльбор** – кубический нитрид бора (КНБ) – получают из гексагонального  $\alpha$ -BN при высоких давлениях и температуре. Эльбор инертен к железу, имеет микротвердость 80–100 ГПа. Применяется

для получения зерен и порошков, идущих на изготовление абразивных инструментов.

**Карбид бора** – состоит из 93 %  $B_4C$  и примесей бора, графита и других элементов. Кристаллический карбид бора имеет твердость по Моосу 9,32; микротвердость – 40–50 ГПа. Применяется в виде порошков и паст для доводки режущего инструмента из твердых сплавов.

**Карбид кремния** – имеет твердость по Моосу 9,1; микротвердость – 33–36 ГПа. Из  $SiC$  получают шлифзерно, шлиф- и микропорошки для изготовления абразивного инструмента на твердой и гибкой основе, а также паст.

**Электрокорунд** – абразивный материал, состоящий из кристаллического  $\alpha-Al_2O_3$ , получаемого в электропечах из чистого глинозема (бокситов) и небольшого количества примесей.

Электрокорунд выпускается следующих видов: нормальный белый, хромистый, титановый, циркониевый, моно- и сферокорунд. Применяется в виде шлифзерен и шлифпорошков, для шлифовальных кругов на различной связке для чистового и точного шлифования твердой стали, для заточки инструментов из инструментальной стали, а также для изготовления шлифовальных шкур.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Справочник инструментальщика / сост.: В. Г. Боровский, С. Н. Григорьев, А. Р. Маслов; под общ. ред. А. Р. Маслова. – 2-е изд., испр. – М. : Машиностроение, 2007. – 464 с.
2. Краткий справочник металлиста / под общ. ред. П. Н. Орлова, Е. А. Скороходова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 960 с.
3. Металлорежущие инструменты : справочник конструктора / Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич. – Мн. : Новое знание, 2009. – 1039 с.
4. Зубков, Н. Н. Инструментальные материалы для изготовления лезвийных инструментов / Н. Н. Зубков // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2013. – № 5. – С. 75–98.

Учебное издание

**МАРКОВА** Елена Александровна  
**ЯЦКЕВИЧ** Ольга Константиновна

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ  
РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ**

Пособие

для студентов специальностей

1-36 01 03 «Технологическое оборудование  
машиностроительного производства»,

1-36 01 01 «Технология машиностроения»

Редактор *Н. А. Костешева*

Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 03.08.2022. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,50. Уч.-изд. л. 1,95. Тираж 150. Заказ 780.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.