



Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана

Учебное пособие

Н.С. Герасимова

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
Калужский филиал

Н.С. Герасимова

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ**

Учебное пособие



УДК 669.01
ББК 30.3
Г37

Рецензент:

директор по эксплуатации и ремонту ОАО «Калужский
турбинный завод» *А.З. Павловский*

Утверждено методической комиссией КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
(протокол № 3 от 06.12.16)

Герасимова Н. С.

Г37 Инструментальные материалы : учебное пособие по курсу «Ма-
териаловедение». — Калуга : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана,
2017. — 60 с.

В учебном пособии рассматриваются основные виды инструменталь-
ных материалов. Описаны режимы их обработки и области применения
инструментальных материалов. Цель учебного пособия — изучение ос-
новных видов инструментальных материалов, режимов их термической
обработки и областей применения.

Пособие предназначено для студентов всех специальностей.

УДК 669.01
ББК 30.3

© Герасимова Н.С., 2017
© Издательство МГТУ
им. Н.Э. Баумана, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Инструментальные стали предназначены для изготовления режущего, измерительного инструмента и штампов холодного и горячего деформирования. В процессе эксплуатации все виды инструмента, особенно металлорежущий и штампы, подвергаются истиранию, испытывают высокие давления, а также повышенные напряжения, чаще всего изгиба или кручения. Для обеспечения износостойкости инструментальным сталям должна быть присуща высокая твердость, а для сохранения формы инструмента, предупреждения его поломок и выкрашивания рабочих кромок — высокая прочность при удовлетворительной вязкости.

История развития обработки металлов показывает, что одним из эффективных путей повышения производительности труда в машиностроении является применение новых инструментальных материалов. Например, применение быстрорежущей стали вместо углеродистой инструментальной позволило увеличить скорость резания **в 2–3 раза**. Это потребовало существенно усовершенствовать конструкцию металлорежущих станков, прежде всего увеличить их быстроходность и мощность. Аналогичное явление наблюдалось также при использовании в качестве инструментального материала твердых сплавов.

При резании контактные площадки инструмента подвергаются интенсивному воздействию высоких силовых нагрузок и температур, величины которых имеют переменный характер, а взаимодействие с обрабатываемым материалом и реагентами из окружающей среды приводит к протеканию интенсивных физико-химических процессов: адгезии, диффузии, окисления, коррозии и др.

С учетом необходимости сопротивления контактных площадок режущего инструмента микро- и макроразрушению в указанных условиях, к свойствам инструментальных материалов предъявляется ряд специальных требований, выполнение которых определяет место их эффективного применения для режущих инструментов.

Инструментальные стали предназначены для изготовления режущего и измерительного инструмента, штампов холодного и горячего деформирования, а также ряда деталей точных механизмов и приборов: пружин, подшипников качения, шестерен и др. Часто из таких сталей изготавливают только рабочую (режущую) часть инструмента, а крепежные части выполняют из конструкционных сталей.

1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ

Технология обработки металлов резанием развивалась скачкообразно. Каждому скачку на более высокий уровень всегда предшествовала разработка новых инструментальных материалов с более высокими физико-механическими свойствами.

Инструмент в процессе эксплуатации находится в сложном состоянии. Он испытывает высокие контактные напряжения, чаще всего изгиба и кручения (до 4000 МПа). Режущая кромка находится в условиях всестороннего неравномерного сжатия. Многие инструменты, особенно многозубые, подвергаются действию ударных нагрузок. При недостаточной прочности инструментального материала это может привести к поломке инструмента или выкрашиванию режущих кромок.

Режущая кромка инструмента испытывает воздействие высоких температур. При резании с режимами, принятыми для быстрорежущей стали, температура в зоне резания достигает 600–650 °С, для твердого сплава — 900–950 °С. Это может привести к существенным изменениям в структуре и свойствах материала.

Свойства, которые инструментальный материал проявляет в инструменте и которые определяют длительность и эффективность его эксплуатации, называются **стойкостными свойствами**. Эти свойства можно определить только в процессе промышленной эксплуатации готовых инструментов, а не инструментального материала. Эти свойства представляют собой комплексную характеристику, которая зависит от нескольких различно действующих факторов:

- ◆ свойства инструментального материала;
- ◆ режимы резания;
- ◆ характеристика процесса резания (точение, сверление и т. д.), изменяющая напряженное состояние инструмента;
- ◆ свойства обрабатываемого материала;
- ◆ другие трудно учитываемые факторы (наладка оборудования, условия изготовления инструмента, культура производства и т. д.).

Стойкостные испытания должны проводиться для большой группы инструментов длительное время, что требует больших затрат. Поэтому большое значение имеет определение свойств непосредственно инструментальных материалов, которые в достаточной степени могут характеризовать стойкостные свойства инструмента. Эти свойства зависят от состава, структуры и обработки материала.

К основным, или эксплуатационным, свойствам инструментального материала относятся: механические, физические, тепловые свойства после окончательной обработки.

Твердость — важнейшее свойство инструментальных материалов. Инструмент недостаточной твердости очень быстро теряет свою форму и размеры. Для нормальной работы твердость инструментального материала должна превышать твердость обрабатываемого материала минимум в 1,5–2 раза.

С повышением твердости:

- 1) повышается износостойкость материала, его предел прочности и текучести;
- 2) повышается чистота поверхности инструмента, которая может быть достигнута при его заточке;
- 3) уменьшается вероятность налипания обрабатываемого материала на поверхности инструмента;
- 4) уменьшается коэффициент трения между обрабатываемыми поверхностями и инструментом, следовательно, снижается сила резания;
- 5) повышается чистота обработанной поверхности.

Однако повышение твердости может привести к повышению стойкости инструмента в одних условиях и к её снижению — в других. Существенное повышение твердости приводит к снижению прочности и ударной вязкости, что приводит к снижению стойкости инструмента при черновой обработке, при действии ударных нагрузок.

Прочность. Высокую прочность, в отличие от твердости, инструментальный материал должен иметь не только в поверхностном слое, но и в более удаленных местах, где возникают наибольшие напряжения. Это наиболее важно для мелких инструментов. По статистическим данным, более 70 % мелких инструментов выходят из строя по причине поломки, а не износа.

Для инструментальных материалов большое значение имеет сочетание прочности и твердости. Прочность характеризует сопротивление хрупкому разрушению и в большинстве случаев не пропорциональна твердости.

При одинаковой твердости 62–65 HRC предел прочности при изгибе может изменяться от 3500–3800 МПа до 1200–1500 МПа. Это связано с различной величиной зерна, состоянием границ зерен, распределением карбидов.

Прочность снижается почти пропорционально росту зерна и увеличению степени карбидной неоднородности. Укрупнение зерна на 1 балл приводит к снижению прочности быстрорежущей стали на 200–300 МПа.

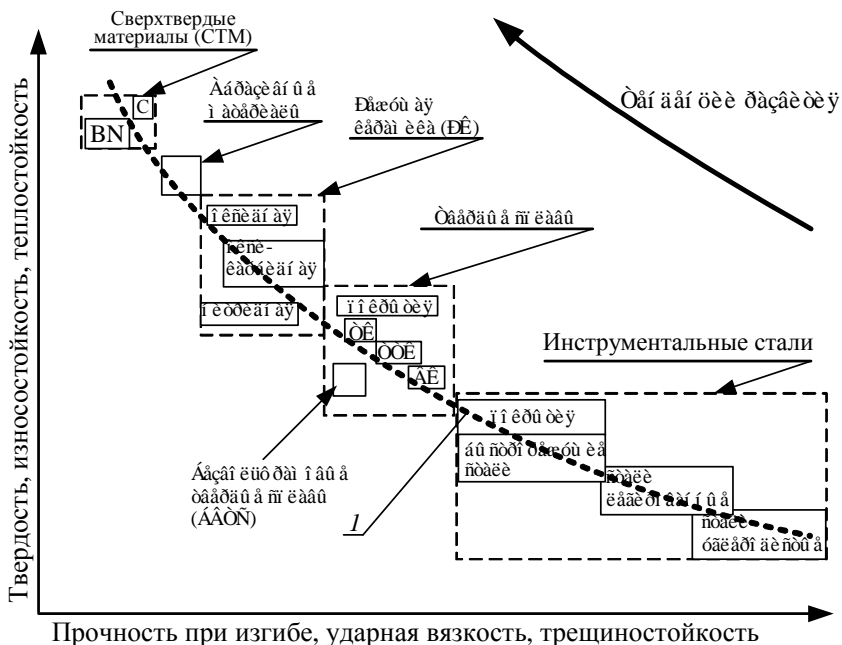


Рис. 1. Классификация инструментальных материалов по свойствам:

I — принципиальная зависимость основных свойств инструментальных материалов (твердость–прочность)

Чем выше твердость материала, тем ниже его прочность (рис. 1). Поэтому набор основных свойств и определяет область и условия рационального использования инструментального материала в режущем инструменте.

Например, инструмент из сверхтвердых инструментальных материалов на основе алмаза и кубического нитрида бора или из режущей керамики (РК) используют исключительно для суперчистой обработки изделий на высоких и сверхвысоких скоростях резания, но при весьма ограниченных сечениях среза.

При обработке конструкционных сталей на малых и средних скоростях резания в сочетании со средними и большими сечениями среза большие преимущества получают инструменты из быстрорежущей стали.

Вязкость характеризует сопротивление материала образованию трещин и разрушению под действием ударных нагрузок. При разрушении материала работа затрачивается в основном на зарождение трещины, работа распространения трещины очень мала. Поэтому при недостаточной вязкости происходит выкрашивание режущей кромки и поломка инструмента при врезании.

Для инструментальных сталей не наблюдается строгой зависимости между твердостью и вязкостью. При неизменной твердости можно добиться повышения вязкости за счет измельчения зерна или уменьшения балла карбидной неоднородности.

Теплостойкость (красностойкость) характеризует способность инструментального материала сохранять структуру и свойства при нагреве. Это свойство очень важно как при изготовлении инструмента (заточка), так и при эксплуатации.

Для быстрорежущей стали теплостойкость еще называют **красностойкостью** (т. е. сохранение твердости при нагреве до температур начала свечения стали).

В области температур ниже 550–600 °С для быстрорежущей стали разупрочнение при нагреве является обратимым и незначительным.

При нагреве до более высоких температур «горячая» твердость резко снижается и после охлаждения не восстанавливается. При снижении «горячей» твердости ниже 60 HRC резко падает износостойкость и происходит почти полная потеря режущей способно-

сти инструмента («тепловая посадка инструмента»). Это явление связано со структурными превращениями в металле: распад мартенсита и коагуляция фаз-упрочнителей (рис. 2).

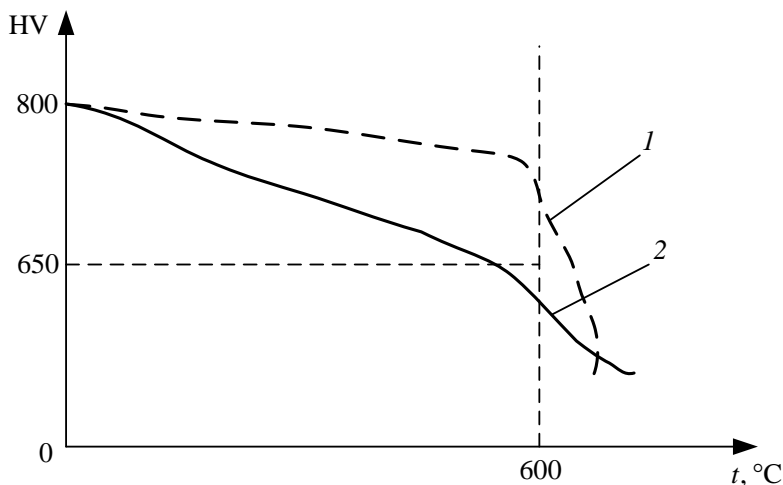


Рис. 2. Зависимость твердости инструментального материала от температуры:

1 — твердость после охлаждения от соответствующей температуры;
2 — «горячая» твердость

Повысить теплостойкость можно за счет легирования, получения большего количества фаз-упрочнителей, повышения температуры закалки, за счет повышения степени легированности твердого раствора. Все это приводит к понижению прочности и вязкости металла.

Значения температур красностойкости и максимальной скорости резания для различных инструментальных материалов приведены в табл. 1.

Износостойкость — способность материала сопротивляться изнашиванию. Она зависит не только от структуры и свойств инструментального материала, но и от свойств обрабатываемого материала, коэффициента трения, внешних условий (температура, механические воздействия, наличие смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ)).

Таблица 1

**Теплостойкость и допустимая скорость резания
инструментальных материалов**

Материал	Тепло-стойкость, К	Скорость резания при обра-ботке стали 45 м/мин
Углеродистая сталь	200–250	10–15
Легированная сталь	200–260	15–30
Быстрорежущая сталь	600–670	40–60
Твердые сплавы	900–1100	150–250
Безвольфрамовые тв. сплавы	1073–1100	100–300
Твердые сплавы с покрытием	1273–1373	200–300
Керамика	1200–1500	400–600

При уменьшении коэффициента трения возрастает стойкость инструмента за счет уменьшения тепловыделения и снижения адгезии и налипания. При повышении твердости инструментального материала при постоянной твердости обрабатываемого материала коэффициент трения снижается.

Физические свойства. Из физических свойств для инструментальных материалов наиболее важными являются коэффициент линейного расширения, коэффициент теплопроводности и коэффициент трения.

Увеличение коэффициента теплопроводности приводит к снижению температуры в зоне резания за счет интенсивного отвода тепла в ниже лежащие слои инструмента.

Уменьшение коэффициента линейного расширения приводит к уменьшению внутренних напряжений при теплосменах. При легировании сталей Cr, W, Mo, Co, Ni уменьшается коэффициент линейного расширения.

Теплопроводность. Важной характеристикой инструментального материала является теплопроводность, под которой понимают скорость распространения теплоты в неравномерно нагретом теле. В процессе работы инструмента в зоне резания температура сильно повышается. Для повышения работоспособности инструмента необходимо, чтобы эта температура отводилась от зоны резания. Перераспределение тепла между стружкой, инструментом и обрабатываемой заготовкой изменяется в зависимости от теплопроводности материала. При обработке инструментом из материала с высокой теплопроводностью улучшаются условия отвода тепла из зоны

резания, что способствует снижению температуры резания и повышению износостойкости инструмента.

При изготовлении режущего инструмента последней операцией является его шлифование. Процесс шлифования сопровождается интенсивным нагревом обрабатываемой поверхности. Повышение теплопроводности инструментального материала в этом случае также оказывает положительное влияние, так как уменьшается опасность возникновения микротрещин и прижогов.

Прокаливаемость определяет распределение твердости по сечению инструмента, а следовательно, его сопротивление высоким давлениям (при получении закаленного слоя достаточной толщины) и динамическим нагрузкам (вязкая сердцевина).

Следует иметь в виду, что повышение одних свойств неизбежно приводит к снижению других. Поэтому невозможно получить в одном материале максимальное сочетание всех свойств. Задача состоит в том, чтобы выбрать оптимальные значения тех свойств, которые наиболее важны в данных условиях эксплуатации, при минимальном снижении других свойств.

Инструментальный материал должен обладать **технологическими свойствами**, обеспечивающими оптимальные условия изготовления из него инструментов. Для инструментальных сталей ими являются хорошая обрабатываемость резанием и давлением; благоприятные особенности термической обработки (малая чувствительность к перегреву и обезуглероживанию, хорошие закаливаемость и прокаливаемость, минимальные деформирование и образование трещин при закалке и т. д.); хорошая шлифуемость после термической обработки.

При обработке конструкционных сталей на малых и средних скоростях резания в сочетании со средними и большими сечениями среза большие преимущества получают инструменты из быстрорежущей стали.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1. Инструментальные стали.

1.1. Углеродистые (преимущественно пониженной прокаливаемости).

1.2. Легированные (повышенной прокаливаемости).

1.3. Быстрорежущие.

1.4. Карбидостали.

2. Твердые сплавы.

2.1. Вольфрамокобальтовые сплавы (ВК).

2.2. Титановольфрамокобальтовые сплавы (ТК).

2.3. Титанотанталовольфрамовокобальтовые (ТТК).

2.4. Безвольфрамовые твердые сплавы (БВТС).

3. Минералокерамика.

4. Абразивные материалы.

5. Алмазы и сверхтвердые материалы.

По твердости инструментальные стали подразделяют на:

♦ **стали высокой твердости (58–65 HRC), но пониженной вязкости:** ($C > 0,7\%$), $KCU = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, стали Ó10, Ð18;

♦ **стали повышенной вязкости, но пониженной твердости:** (40–55 HRC) ($C < 0,7\%$), $KCU = 2 \div 8 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, сталь 5ÕÍ Ì ,
 $\zeta + \hat{A} \rightarrow \tilde{N}_1$.

По предложению Ю.А. Геллера, все инструментальные стали по теплостойкости стали классифицируют на три группы:

1. **Не теплостойкие**, сохраняющие высокую твердость (более 60 HRC) при нагреве не выше 190–225 °С и используемые для резания мягких материалов с небольшой скоростью и для холодного деформирования. Это заэвтектоидные и близкие к эвтектоидному составу стали (углеродистые и легированные, содержащие до 3–4 % легирующих элементов), которые имеют *цементит*, коагулирующий при сравнительно низких температурах.

Закалка на мартенсит + НО ($t < 200 \text{ °С}$) 58–63 HRC:

♦ углеродистые стали $D_{\text{э}0}^{\hat{a}\hat{a}} = 10 \div 15 \text{ м}$ (Ó8, Ó10);

♦ хромистые стали (Õ, 9Õ, 11Õ) $D_{\text{э}0}^{\hat{a}\hat{e}\hat{f}} = 20 \div 25 \text{ м}$;

♦ ХГ, ХГС, ХГВС $D_{\text{э}0}$ — до 90 мм.

2. **Полутеплостойкие**, в основном штамповые, рабочая кромка которых выдерживает нагрев до 400–500 °С. Содержащие более

0,6–0,7 % \tilde{N} и 4–18 % \tilde{N}_{r}). Они имеют легированный **цементит** и **карбид хрома** ($\tilde{I} \text{ } \tilde{a}_{23}\tilde{N}_6$, $\tilde{I} \text{ } \tilde{a}_7\tilde{N}_3$).

Закалка на мартенсит + Отпуск 300–500 °С

3. **Теплостойкие**, сохраняющие твердость и другие свойства при нагреве до температур 550–600 °С и выше.

Высоколегированные стали, содержащие \tilde{N}_{r} , W, V, Mo, \tilde{N}_o , ледебуритного класса, получившие название **быстрорежущие**.

Закалка на мартенсит + Отпуск 570–650 °С → мартенсит отпуска + карбиды

По применению:

- ◆ стали для режущего инструмента;
- ◆ штамповочный пневмоинструмент;
- ◆ стали измерительного инструмента.

Наиболее распространенная из этих групп — быстрорежущая сталь, из которой изготавливается около 60 % инструмента, из твердых сплавов — около 30 %, из остальных групп материалов — только около 10 % лезвийного инструмента.

Анализ основных направлений совершенствования инструментальных материалов (см. рис. 1) позволяет отметить, что они связаны с ростом твердости, теплостойкости, износостойкости при снижении прочностных характеристик, вязкости и трещиностойкости. Эти тенденции не соответствуют идее создания идеального инструментального материала с оптимальным сочетанием свойств по твердости, теплостойкости, ударной вязкости, трещиностойкости, прочности.

Очевидно, что решение этой проблемы должно быть связано с разработкой композиционного инструментального материала, у которого высокие значения **поверхностной** твердости, теплостойкости, физико-химической инертности сочетались бы с достаточными значениями **объемной** прочности при изгибе, ударной вязкости, предела выносливости.

В мировой практике указанные методы совершенствования инструментальных материалов находят все большее применение, особенно при производстве сменных многогранных пластин (СМП) для механического крепления на режущем инструменте.

3. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Инструментальными называются стали, применяемые для обработки материалов резанием и давлением, имеющие определенные свойства: твердость, износостойкость, теплостойкость.

3.1. СТАЛИ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Стали для режущего инструмента (*резцы, сверла, фрезы, протяжки, метчики, пилы* и т. д.) должны обладать высокой твердостью режущей кромки — 63–66 HRC; большой прочностью и сопротивлением малой пластической деформации; теплостойкостью (красностойкостью), особенно при высоких скоростях резания и обработке труднообрабатываемых деталей.

Углеродистые и легированные стали при правильном применении могут удовлетворять первым двум требованиям, но не являются теплостойкими (отдельные марки легированных сталей являются полутеплостойкими).

3.1.1. Углеродистые инструментальные стали (стали пониженной прокаливаемости)

Углеродистые инструментальные стали являются наиболее дешевыми; содержат 0,65–1,35 % *углерода*.

Свойства:

- ◆ твердость 61–63 HRC;
- ◆ прочность $\sigma_{\text{н}} = 2200 \div 2800 \text{ Н/мм}^2$;
- ◆ теплостойкость $t = 200 \div 250 \text{ }^\circ\text{C}$;
- ◆ допустимая скорость резания v до 10 м/мин.

Инструментальные углеродистые стали в соответствии с **ГОСТ 1435-90** маркируют буквой «У» и числом, указывающим среднее содержание *углерода* в десятых долях процента.

К группе высококачественных сталей, более чистых по содержанию *серы* и *фосфора*, а также примесей других элементов относятся марки стали с буквой «А».

«Г» обозначает повышенное содержание *марганца* (Mn).

Из-за низкой прокаливаемости (10–12 мм) углеродистые стали пригодны для мелкого инструмента сечением до 25 мм с незакаленной сердцевиной, в которой режущая часть приходится на поверхностный слой. В сечениях более 25 мм закаленный слой получается тонким и прокаливается во время работы. Поэтому они не получили широкого распространения. Их применяют только для изготовления ручных, слесарных инструментов: зубила, ножовочные полотна, отвертки, керны, пилы, накатные ролики.

Углеродистые стали имеют очень высокую *критическую скорость заковки* — порядка 200–300 °C/с. Поэтому недопустимо даже малейшее замедление охлаждения при **закалке**, так как это может привести к частичному распаду *аустенита* при температурах *перлитного интервала* и, как следствие, к появлению мягких пятен. Особенно быстро протекает распад *аустенита* в углеродистых сталях при температурах, близких к 500–550 °C, где он начинается почти мгновенно, протекает чрезвычайно интенсивно и в течение нескольких секунд полностью заканчивается.

Закалка требует охлаждения в воде или соляной ванне. Резкое охлаждение приводит к возникновению больших внутренних напряжений, возможно коробление, появление трещин.

Достоинствами углеродистых сталей являются:

- ◆ *высокая твердость на поверхности;*
- ◆ *сохранение вязкой сердцевины при закалке, способность воспринимать повышенные динамические нагрузки;*
- ◆ *содержание небольшого количества (5–8 %) остаточного аустенита, обеспечивающего высокое сопротивление пластической деформации в рабочих кромках;*
- ◆ *низкая твердость в отожженном состоянии (150–170 Í Å), позволяющая изготовить инструмент пластической деформацией и обуславливающая хорошую обрабатываемость резанием;*
- ◆ *сохранение чистой поверхности (нет окисления и обезуглероживания) вследствие низкой температуры.*

Основными недостатками углеродистых инструментальных сталей являются их невысокая прокаливаемость (5–10 мм), низкая теплостойкость (до 200 °C), т. е. инструменты могут работать только при невысоких скоростях резания.

1. Низкая и неоднородная твердость (60 HRC) в тонких сечениях (пилы). За время переноса из закалочной печи в охлаждающую среду инструмент неравномерно остывает. Часто наблюдаются «мягкие пятна».

2. Узкий интервал закалочных температур, большая чувствительность к перегреву, что служит причиной повышения хрупкости и выкрашивания режущих кромок из-за роста зерна. Повышение температуры закалки на 10–15 °С резко снижает прочность и вязкость.

3. При малых сечениях инструмент прокаливается насквозь, что снижает его прочность. При $\varnothing > 30 \text{ мм}$ инструмент имеет недостаточный закаленный слой. Не рекомендуется использовать для инструментов $\varnothing < 1 \text{ мм}$ и $\varnothing > 30 \text{ мм}$. Свойства этих сталей зависят от содержания углерода. С увеличением его содержания увеличивается износостойкость, твердость практически не меняется. Максимальной прочностью обладает сталь Ó11À, при дальнейшем увеличении содержания углерода прочность немного снижается из-за увеличивающейся карбидной неоднородности и роста зерна.

Интенсивность влияния углерода зависит от сечения инструмента. При $\varnothing = 1 \div 5 \text{ мм}$ высокая твердость после закалки достигается уже при содержании 0,6–0,7 % С. При больших сечениях такая же твердость достигается при содержании 0,8–0,9 % С.

Инструменты из этих сталей не подвергают шлифованию, так как при нагреве во время шлифования возможна потеря режущих свойств.

Сейчас используют стали марок: Ó7, Ó7À (63–65 HRC после закалки от 800 °С в воде, масле); Ó8, Ó8À, Ó9 (63–65 HRC после закалки при 780–800 °С на воздухе, в масле); Ó10, Ó12, Ó12À (64–66 HRC после закалки при 760–780 °С на воздухе или в масле).

Закалку для доэвтектоидных сталей проводят полную, а для заэвтектоидных — неполную.

После **закалки** в структуре сталей должен быть **мартенсит** или \dot{I} (мартенсит) + $\dot{A}_{\text{гнб}}$ + \dot{E} (карбиды). **Отпуск** сталей проводят в зависимости от необходимых (требуемых) свойств — *низкий, средний*.

При *низком отпуске* (200–300 °С) происходит снятие внутренних напряжений и образуется структура $\dot{I}_{\dot{\sigma}\dot{\sigma}} + \dot{A}_{\dot{\sigma}\dot{\sigma}}$. Для снижения твердости и создания благоприятной структуры, *все инструментальные стали до изготовления инструмента подвергают отжигу*.

Для заэвтектоидных сталей проводят *сфероидизирующий отжиг*, в результате которого *цементит вторичный* приобретает зернистую форму. Регулируя скорость охлаждения, можно получить любой размер зерен.

Для *напильников, метчиков, плашек* отпуск проводят при температуре 150–200 °С, при этом обеспечивается получение максимальной твердости — 62–64 HRC.

Для инструментов небольших размеров: не обладающие теплостойкостью (Ó8, Ó10, Ó11, Ó12, Ó13) вследствие малой устойчивости переохлажденного аустенита.

Для режущего инструмента (*фрезы, зенкеры, сверла, спиральные пилы, ножовки, напильники, острый хирургический инструмент*) обычно применяют **заэвтектоидные стали** (У10, У11, У12, У13), у которых после термообработки структура — *мартенсит и карбиды*.

Деревообрабатывающий инструмент (*стамески, кернеры, отвертки, топоры*) изготавливают из сталей Ó7, Ó8, которые после термообработки имеют *трооститную* структуру. Температура закалики Ó8 ÷ Ó12 должна быть 760–810 °С, в результате получаем *мартенситную* структуру и сохраняется мелкозернистая структура и частицы вторичного цемента. **Отпуск** проводят при 150–170 °С для сохранения высокой твердости (HRC 62–63). Сталь Ó7 закалывают с нагревом выше точки $\dot{A}_{\dot{N}_3}$ на 30–50 °С и подвергают **отпуску** при 275–325 °С.

Из сталей марок Ó7, Ó8А изготавливают инструмент для работы по дереву и инструмент ударного действия, когда требуется повышенная вязкость — *пуансоны, долота, штампы, молотки*.

Стали марок Ó9 ÷ Ó12 обладают более высокой твердостью и износостойкостью — используются для изготовления *сверл, метчиков, фрез*.

Сталь Ó13 обладает максимальной твердостью, используется для изготовления *напильников, граверного инструмента*.

3.1.2. Инструментальные легированные стали (стали повышенной прокаливаемости)

Содержат 0,9–1,4 % углерода. В качестве легирующих элементов содержат *хром, вольфрам, ванадий, марганец, кремний* и др. Общее содержание легирующих элементов — до 5 %.

Они подразделяются на:

- ◆ **низколегированные** (90Ô, ÔÂÃ, 11ÔÔ);
- ◆ **стали повышенной прокаливаемости** (9ÔÑ, ÔÂÑÃ, Ô6ÂÔ).

Низколегированные стали отличаются от углеродистых содержанием легирующих элементов, суммарное количество которых не превышает 1–1,5 %.

Свойства:

- ◆ твердость 62–64 HRC;
- ◆ прочность $\sigma_u = 2500 \div 2800$ Ì Ì à;
- ◆ теплостойкость $t = 250 \div 280$ °Ñ;
- ◆ допустимая скорость резания v до 15 м/мин.

Преимущества:

- 1) лучшая прокаливаемость и закаливаемость при охлаждении в масле;
- 2) малая склонность к короблению и деформации при закалке. Поэтому рекомендуется для сложных инструментов, не подвергающихся шлифованию (резьбонарезной инструмент);
- 3) меньший балл карбидной неоднородности из-за более низкого содержания углерода. В прокате до Ø 60 мм балл карбидной неоднородности не превышает 1–2;
- 4) легирование кремнием снижает чувствительность к перегреву, способствует сохранению мелкого зерна.

Недостатки: при содержании Si > 0,8 ÷ 1 % резко ухудшаются технологические свойства, твердость в отожженном состоянии повышается до 210–240 НВ, повышается склонность к обезуглероживанию поверхности, плохая обрабатываемость резанием и деформированием из-за упрочнения *феррита кремнием*.

Термическая обработка включает **закалку** и **отпуск**.

Проводят **закалку** с температуры 800–850 °С в *масло* или **ступенчатую закалку**. Малая скорость охлаждения при закалке умень-

шает опасность образования трещин, деформации и коробления, к которому склонны углеродистые инструментальные стали.

Отпуск проводят низкотемпературный, при температуре 150–200 °С, что обеспечивает твердость HRC 61–66. Иногда, для увеличения вязкости, температуру **отпуска** увеличивают до 300 °С, но при этом наблюдается снижение твердости HRC 55–60.

Легированные инструментальные стали, подобно углеродистым, не обладают теплостойкостью, пригодны для резания только мягких материалов с небольшой скоростью. Тут структура устойчивого переохлажденного *аустенита*, большая прокаливаемость. Подвергают сталь ступенчатой закалке в *масле* и горячих средах.

Химический состав инструментальных легированных сталей выбирается таким образом, чтобы, сохранив преимущества углеродистых сталей, уменьшить их недостатки. В закаленном состоянии стали имеют более высокую и равномерную твердость.

Для режущих инструментов используются низколегированные стали марок 900, 0A4, 1100, 90N, 0A4N, 130, A20, 0A4 и др. Эти стали обладают более высокими технологическими свойствами — лучшей закаливаемостью и прокаливаемостью, меньшей склонности к короблению, но теплостойкость их равна 350–400 °С, поэтому они используются для изготовления ручных инструментов (*разверток*) или инструментов, предназначенных для обработки на станках с низкими скоростями резания (*мелкие сверла, метчики*).

Для деревообрабатывающего инструмента из сталей 60N и 900 рекомендуется **изотермическая закалка**, значительно улучшающая вязкость.

Повышенное содержание *кремния* (сталь 90N) способствует *увеличению прокаливаемости* до 40 мм и повышению устойчивости *мартенсита* при отпуске.

Эти стали имеют большую теплостойкость, хорошие режущие свойства и сравнительно мало деформируются при **закалке**.

Вольфрамовые стали A20 и 0A4 после **закалки** в водных растворах имеют очень высокую твердость и применяются для пил.

«Алмазная» сталь 0A5 содержит 5 % W. Благодаря присутствию W, в термически обработанном состоянии имеет избыточную мелкодисперсную карбидную фазу. Твердость составляет HRC 65–67. Сталь используется для изготовления инструмента, сохраняющего

длительное время острую режущую кромку и высокую размерную точность (*развертки, фасонные резцы, граверный инструмент*).

Сталь $\text{O}\check{\text{A}}\check{\text{N}}\check{\text{A}}$ в наибольшей степени удовлетворяет условиям рационального легирования. После закалки в горячем масле (150–180 °С) обеспечивается твердость 60–62 HRC в инструментах сечением до 100 мм. Пониженное содержание W и Mo понижает чувствительность к перегреву. Используется для изготовления *плашек, протяжек*.

Сталь $\text{O}\check{\text{A}}\check{\text{A}}$ имеет большой балл карбидной неоднородности и более склонна к образованию карбидной сетки. Это увеличивает опасность выкрашивания режущих кромок. Поэтому инструменты из этой стали не рекомендуется использовать в тяжелых условиях. Повышенное содержание Mn улучшает прокаливаемость и уменьшает коробление в процессе закалки. Поэтому широко используется для изготовления тонких длинных инструментов (*ножовочные полотна, протяжки*).

Сталь 9OÑ — самая распространенная марка легированной инструментальной стали.

3.1.3. Влияние легирующих элементов на свойства инструментальных сталей

Высокая твердость и износостойкость в основном определяются высоким содержанием *углерода*. Легирование используется для повышения закаливаемости и прокаливаемости, сохранения мелкого зерна, повышения прочности и вязкости.

Основным легирующим элементом является **хром** (Ñr), который понижает критическую скорость закалки, но увеличивает количество *остаточного аустенита*. Хром увеличивает прокаливаемость и твердость после закалки. Стали с *хромом* и *кремнием* хорошо прокаливаются и мало деформируются, но наименьшую деформацию имеют *хромомарганцевые стали*. Присутствие *карбидов хрома* сообщает нужную твердость, *никеля* (Ni) — вязкость, что является хорошим сочетанием для ударного инструмента.

Ванадий (V) способствует снижению чувствительности стали к перегреву, повышает износостойкость инструмента, но ухудшает шлифуемость.

Молибден (Mo) повышает режущие свойства инструмента и сохраняет их до температур порядка 600 °С, т. е. придает стали красностойкость и износостойкость. *Существенным недостатком* введения Mo является то, что он выгорает.

Титан (Ti) измельчает структуру, так как образует труднорастворимые в *аустените карбиды*, уменьшает чувствительность к перегреву и повышает устойчивость против отпуска, что позволяет легировать им и быстрорежущие стали.

Кобальт (Co) несколько упрочняет *феррит*, который сохраняет свои свойства и при повышенных температурах, но использовать его экономически невыгодно, хотя в быстрорежущих сталях его применение оправдано. Кобальт растворяется в твердом растворе *аустенита* и входит в состав сложных *интерметаллидов типа* $(Co, Fe)_7$, $(W, Mo)_6$, что способствует увеличению теплоустойкости до 650 °С и твердости до 67–70 HRC, повышает красностойкость. У сталей, содержащих Co, снижаются вязкость, прочность, идет их обезуглероживание. Co повышает содержание *остаточного аустенита* до 40 %.

Вольфрам (W) придает стали способность хорошо работать на истирание при высоких давлениях, повышает износостойкость, снижает чувствительность к перегреву.

Марганец (Mn) способствует укрупнению зерна, что снижает механические свойства, увеличивает количество *остаточного аустенита* и усиливает опасность получения трещин. Mn вводят в сталь 0,9–1,2 %, увеличение его содержания усиливает рост зерна.

Наиболее хорошие результаты получаются при комплексном легировании двумя-тремя элементами.

Кремний (Si) (1–1,5 %) вводят для повышения сопротивления отпуску и образования легко отделяющейся окалины.

Никель (Ni) (до 1,5 %) добавляют в штамповые стали для увеличения вязкости.

W, Mo, V, являясь тугоплавкими и образуя нерастворимые в *аустените* карбиды MeC и Me_2C , повышают износостойкость

и красностойкость, затрудняют рост зерна при нагреве стали и уменьшают распад *мартенсита* при *отпуске*, т. е. увеличивают устойчивость стали против отпуска. Это также увеличивает срок службы стали.

Однако W снижает теплопроводность стали, что осложняет нагрев под закалку (нагрев стали под закалку требует 1-2 подогрева во избежание трещин). Часть W может быть заменена Mo в отношении $Mo/W = 1/1,5$, но Mo можно вводить до 5 %, так как он выгорает при высокотемпературном нагреве, поэтому наиболее применяемая в настоящее время сталь $\hat{D}b\hat{I} 5$. *Недостатком вольфрам*овых сталей является сильная карбидная неоднородность. В *вольфрамомолибденовых* сталях этот недостаток менее заметен.

Таким образом, большое содержание W, Co, Mo повышает температуру мартенситного превращения, увеличивает дисперсность, поэтому в таких сталях выше твердость и теплостойкость. Например, сталь $\hat{A}11\hat{I} 7\hat{E}23$ имеет в 30–40 раз стойкость больше, чем сталь P6M5.

Для обеспечения высокой износостойкости используют легированные стали со значительным количеством избыточных карбидов — *заэвтектоидные* и *ледебуритные*. Благодаря избыточным карбидам эти стали сохраняют мелкое зерно и, как следствие, повышенную прочность и вязкость в широком интервале закалочных температур (до 1000–1300 °C). Вместе с этим большое количество избыточных карбидов ухудшает обрабатываемость давлением и резанием, создает карбидную неоднородность. Скопления карбидов, карбидная сетка и полосчатость усиливают хрупкость, вызывают преждевременное выкрашивание рабочих кромок. Для равномерного распределения карбидов такие стали требуют всесторонней и тщательнойковки заготовок.

Стали, содержащие 0,9–1,2 % C, предназначены для изготовления основного **режущего инструмента**, 0,45–0,7 % C — для **ударного инструмента**, так как они имеют значительно меньшую твердость, хрупкость и более высокую пластичность.

3.2. БЫСТРОРЕЖУЩИЕ СТАЛИ

Быстрорежущие стали — легированные стали, предназначенные главным образом для изготовления металлорежущего инстру-

мента. По сравнению с углеродистыми инструментальными сталями обладают повышенной твердостью, износостойкостью, прочностью и красностойкостью, что обусловлено наличием в их составе карбида вольфрама. Название «быстрорежущие» связано с тем, что режимы работы инструмента из этих сталей предусматривают повышенные скорости обработки материала, по сравнению с инструментом из углеродистых сталей, из-за высокой теплостойкости (550–650 °С).

Быстрорежущие стали относятся к **ледебуритному (карбидному) классу**. Эти стали, как правило, содержат 0,7–1,5 % С, до 18 % основного легирующего элемента — W, до 5 % Cr и Mo, до 10 % Co.

В обозначении быстрорежущей стали буква «Р» означает, что **сталь быстрорежущая**, а следующая за буквой цифра — содержание средней массовой доли W в %. Следующие буквы обозначают: «М» — Mo, «Ф» — V, «К» — Ni, «А» — N. Цифры, следующие за буквами, означают их среднюю массовую долю в %. Содержание массовой доли азота составляет 0,05–0,1 %.

В марках быстрорежущих сталей не указывают *углерод* и *хром* (их массовая доля $\approx 1\%$ и $\approx 4\%$ соответственно). Cr хорошо растворяется в *аустените* и *повышает прокаливаемость*, а также способствует упрочнению при отпуске.

Быстрорежущие стали склонны к росту зерна. Для получения оптимальных свойств инструментов из быстрорежущей стали необходимо устранить структурную неоднородность стали — *карбидную ликвацию*. Для этого слитки из быстрорежущей стали подвергаются интенсивной пластической деформации (ковке). При этом происходит дробление карбидов эвтектики и достигается более однородное распределение карбидов по сечению заготовки.

Прочность и стойкость быстрорежущей стали определяются не только химическим составом, но и режимом термической обработки, которая включает отжиг, закалку и отпуск при определенных температурах.

В результате предварительной обработки резанием в заготовке инструмента возникают внутренние напряжения, которые могут способствовать образованию трещин, изменению формы и размеров заготовки после термообработки. Применение отжига устраня-

ет в заготовке внутренние напряжения, обеспечивает получение мелкозернистой и равномерной структуры материала, что повышает качество дальнейшей механической и термической обработки.

Отжиг проводят путем медленного и равномерного нагрева до 800–860 °С с последующей выдержкой для выравнивания температуры по всему поперечному сечению инструмента и затем обеспечивают равномерное охлаждение в печи.

Структура отожженной быстрорежущей стали — *мелкозернистый (сорбитообразный) перлит и карбиды*. Количество карбидов около 25 %. Сталь с такой структурой хорошо обрабатывается резанием. Подавляющее количество легирующих элементов находится в карбидной фазе. Для получения оптимальных свойств стали в готовом инструменте необходимо при термической обработке обеспечить максимальное насыщение *мартенсита* легирующими элементами.

Для предотвращения образования трещин и деформации инструмента из-за низкой теплопроводности сталей нагрев *под закалку* проводят с одним или двумя *подогревами* в расплавленных солях: первый — при 400–500 °С, второй — при 800–850 °С. Окончательный нагрев также проводят в соляной ванне (BaCl_2) с очень малой выдержкой при T_3 : 10–12 с на 1 мм толщины инструмента из сталей типа «Р» и 30–60 с для сталей типа $\hat{A}11\hat{I} 7\hat{E}23$. Это позволяет избежать роста *аустенитного зерна* (не крупнее № 10), окисления и обезуглероживания.

Инструменты простой формы закаливают в *масле*, а сложной — в *растворах солей* (KNO_3) при 250–400 °С.

После закалки структура быстрорежущей стали состоит из *высоколегированного мартенсита*, содержащего 0,3–0,4 % не растворенных при нагреве избыточных *карбидов*, и около 20–30 % остаточного *аустенита*. Последний снижает твердость, режущие свойства инструмента, ухудшает шлифуемость, и его присутствие нежелательно.

После закалки проводят отпуск. При многократном отпуске из *остаточного аустенита* выделяются дисперсные *карбиды*, легированность *аустенита* уменьшается, и он претерпевает *мартенситное превращение*. Обычно применяют *трехкратный отпуск* при 550–570 °С в течение 45–60 мин. Режим термической обработки инструмента из быстрорежущей стали $\hat{D}18$ приведен на рис. 3.

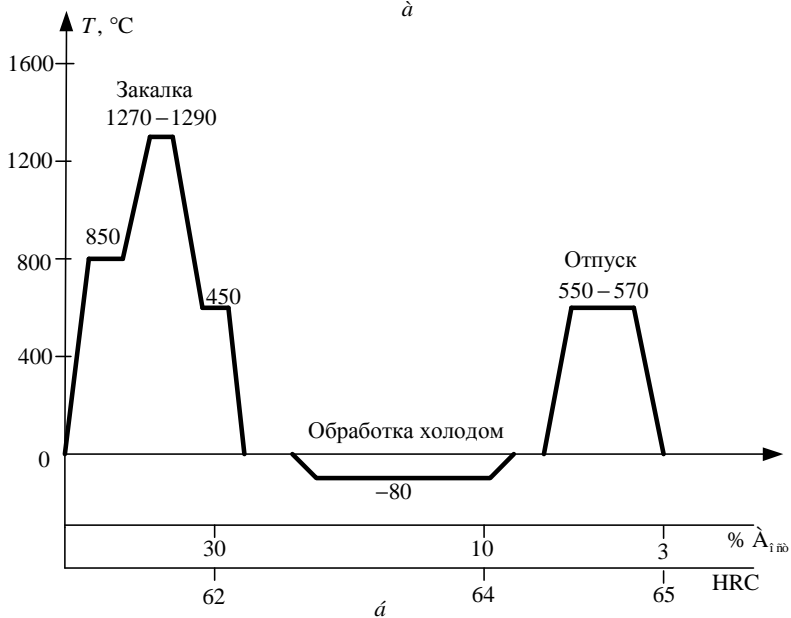
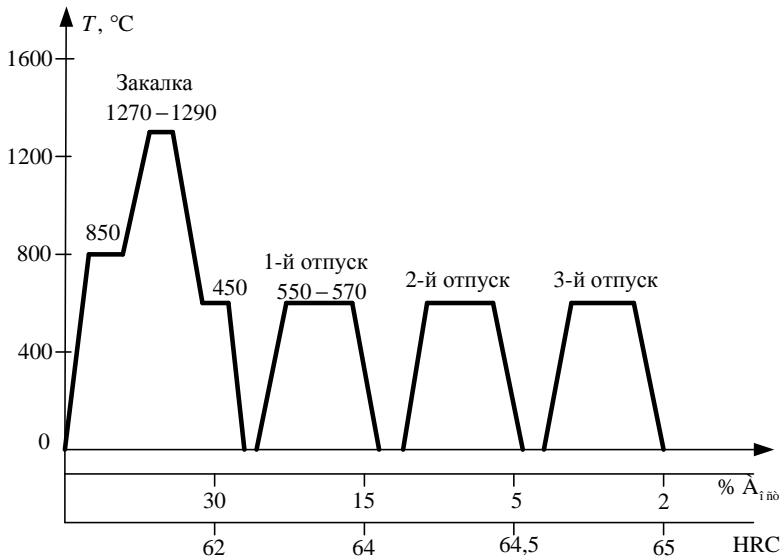


Рис. 3. Режимы термической обработки инструмента из стали P18:
a — закалка и трехкратный отпуск; *б* — закалка, обработка холодом, отпуск

Такой отпуск позволяет снимать остаточные напряжения в *аустените*, не вызывая его распада, и способствует образованию структуры $\dot{I}_{i\ddot{o}} + \hat{E} + \hat{A}_{i\ddot{o}}$.

Число отпусков может быть сокращено при обработке *холодом после закалки*, в результате которой уменьшается содержание *остаточного аустенита*. Обработке холодом подвергают инструменты сравнительно простой формы. Твердость после **закалки** 62–63 HRC, а после **отпуска** она увеличивается до 63–65 HRC.

Для дальнейшего повышения твердости, износостойкости и коррозионной стойкости поверхностного слоя режущих инструментов применяют такие технологические операции, как *цианирование, азотирование, сульфидирование*, обработку паром и другие технологии поверхностного упрочнения. Их выполняют после окончательной термообработки, шлифования и заточки инструментов.

Цианирование осуществляют при 550–570 °С в течение 5–30 мин в жидких средах и 1,5–3,0 ч в газовой атмосфере. Для жидкостного цианирования используют ванны с расплавами NaCN (90 % или 50 %), Na₂CO₃, NaOH (KOH). Газовое цианирование выполняют в смеси *аммиака* и науглероживающего газа.

Азотирование инструментов проводится при 550–600 °С продолжительностью 10–40 мин в атмосфере *аммиака*. Проводят также газовое азотирование в смеси 20 % *аммиака* и 80 % *азота*; последнее предпочтительней, так как в этом случае обеспечивается меньшая хрупкость слоя.

Сульфидирование проводят при 450–560 °С, продолжительностью от 45 мин до 3,0 ч в жидких расплавах, например 17 % NaCl, 25 % BaCl₂, 38 % CaCl₂, 3–4 % K₄Fe(CN)₆, в которые добавляют серосодержащие соединения FeS, Na₂SO₄, KCNS.

При обработке паром инструменты помещают в герметичную печь и выдерживают при 300–350 °С под давлением 1–3 МПа в течение 20–30 мин для удаления воздуха. Затем температура повышается до 550–570 °С, проводится выдержка 30–60 мин, охлаждение в атмосфере пара до 300–350 °С, после чего подача пара прекращается. Заканчивается охлаждение в печи или на воздухе, затем

инструмент немедленно подвергают промывке в горячем веретенном масле.

Высокие твердость (68–70 HRC) и теплостойкость (720 °С) обеспечиваются:

- а) более высокими температурами (900–950 °С) начала фазовых превращений, что на 100 °С выше, чем у стали с карбидным упрочнением;
- б) большими количествами упрочняющих фаз, отличающихся высокой дисперсностью (до 2–3 мкм) и равномерностью распределения в основной матрице.

Иногда для повышения износостойкости быстрорежущих сталей применяют *низкотемпературное цианирование*.

3.2.1. Классификация быстрорежущих сталей по теплоемкости

Современные быстрорежущие стали можно разделить на **три группы**:

- 1) нормальной теплостойкости;
- 2) повышенной теплостойкости;
- 3) высокой теплостойкости.

К **сталям нормальной теплостойкости** относятся **вольфрамовые** Д18, Д12, Д9, Д9^О5 и **вольфрамомолибденовые** ДБ1 5, ДБ1 3 стали. Эти стали имеют твердость в закаленном состоянии 63–64 HRC до 620 °С, предел прочности при изгибе 2900–3400 МПа, ударную вязкость 2,7–4,8 Дж/м² и теплостойкость 600–620 °С. При одинаковой теплостойкости эти стали отличаются главным образом механическими и технологическими свойствами. Лучшей обрабатываемостью давлением и шлифуемостью, а также прочностью и вязкостью обладают стали ДБ1 3 и ДБ1 5. Указанные марки стали получили наиболее широкое распространение при изготовлении режущих инструментов. Объем производства стали ДБ1 5 достигает 80 % от всего объема выпуска быстрорежущей стали. Она используется при обработке *конструкционных сталей, чугунов, цветных металлов, пластмасс*.

Стали Д9, Д9^О5 плохо шлифуются из-за присутствия твердых карбидов *ванадия*.

Сталь P18 обладает наилучшими режущими свойствами. Это обусловлено следующими причинами:

- ◆ максимальная износостойкость, благодаря высокому содержанию W;
- ◆ наибольший интервал закалочных температур, малая склонность к перегреву;
- ◆ хорошая шлифуемость.

Недостатки:

- ◆ высокий балл карбидной неоднородности, для его уменьшения необходима многократнаяковка;
- ◆ плохая обрабатываемость в горячем состоянии;
- ◆ высокая стоимость.

Рекомендуется использовать для инструментов сложного профиля, работающих при невысоких скоростях и требующих высокой износостойкости, например *шевер*.

Сталь P12 по режущей способности не уступает стали P18, имеет практически такую же шлифуемость, но меньший балл карбидной неоднородности, меньшую стоимость. В инструментах с тонкими режущими кромками имеет более высокие режущие свойства. Поэтому рекомендуется вместо стали P18 для изготовления *протяжек, разверток, долбяков*.

Сталь P9 применяется для инструментов простой конфигурации (*ножи, пластинки*) из-за плохой шлифуемости. Преимущество этой стали — более низкий балл карбидной неоднородности, чем для сталей, содержащих большее количество W. Эта сталь хорошо поддается пластической деформации. По температуре теплостойкости не уступает сталям, содержащим большее количество W.

Легирование Mo повышает прочность, пластичность стали и снижает балл карбидной неоднородности (на 1–2 единицы), повышается ударная вязкость.

По сравнению с вольфрамовыми сталями более склонны к росту зерна, обезуглероживанию поверхностного слоя, образованию закалочных трещин. Закалку производят в соляных ваннах.

Сталь P6M5 по прочности на 10–12 %, а по ударной вязкости на 50–60 % превосходит вольфрамовые стали. По остальным свой-

ствам практически не уступает им. Поэтому её рекомендуют использовать вместо вольфрамовых сталей.

К **сталям повышенной теплостойкости** относятся стали, содержащие Ni и повышенное количество V ($\text{ДБ1 5}\hat{\text{E}}5$, $\text{Д9}\hat{\text{I}} 4\hat{\text{E}}8$, $\text{Д9}\hat{\text{E}}5$, $\text{Д9}\hat{\text{E}}10$, $\text{Д10}\hat{\text{E}}5\hat{\text{O}}5$, $\text{Д18}\hat{\text{E}}5\hat{\text{O}}2$). Они превосходят стали первой группы по теплостойкости (630–640 °С), твердости (> 64 HRC) и износостойкости, но уступают им по прочности и пластичности.

Среди *ванадиевых сталей* наибольшее применение получила марка $\text{ДБ1 5}\hat{\text{O}}3$.

Наряду с высокой износостойкостью *ванадиевые стали* обладают плохой шлифуемостью из-за присутствия **карбидов ванадия** (VC), так как твердость последних не уступает твердости зерен электрокорундового шлифовального круга (Al_2O_3). Обрабатываемость при шлифовании («шлифуемость») — это важнейшее технологическое свойство, которое определяет не только особенности при изготовлении инструментов, но и при его эксплуатации (переточках).

Среди **кобальтовых сталей** наибольшее применение нашли марки $\text{ДБ1 5}\hat{\text{E}}5$, $\text{Д9}\hat{\text{I}} 4\hat{\text{E}}8$, $\text{Д18}\hat{\text{E}}5\hat{\text{O}}2$, $\text{Д9}\hat{\text{E}}5$, $\text{Д2}\hat{\text{I}} 9\hat{\text{E}}5$ и др. Введение кобальта (Ni) в состав быстрорежущей стали наиболее *значительно повышает её твердость* (66–68 HRC) и теплостойкость (640–650 °С). Кроме того, повышается теплопроводность стали, так как Ni является единственным легирующим элементом, приводящим к такому эффекту.

Это дает возможность использовать их для обработки жаропрочных и нержавеющей сталей и сплавов, а также конструкционных сталей повышенной прочности. Период стойкости инструментов из таких сталей в 3–5 раз выше, чем из сталей Д18 , ДБ1 5 .

Режущие свойства вольфрамо-кобальтовых сталей выше, чем стали Д18 , особенно при обработке аустенитных сталей (\approx в 3 раза).

Недостатки: высокая хрупкость, низкая прочность, склонность к образованию трещин при работе с ударами.

Дополнительное введение ванадия в сталь, содержащую Co, повышает её прочность и износостойкость при сохранении режущих свойств. Поэтому вольфрамо-ванадий-кобальтовые стали более уни-

версальны. Они применяются как для черновой, так и для чистовой обработки легированных и нержавеющей сталей.

Они содержат большое количество дорогостоящих элементов, в связи с чем отличаются высокой стоимостью. Для уменьшения расхода дорогих и дефицитных элементов, особенно W, преимущественно используют экономно-легированные стали.

Стали высокой теплостойкости характеризуются пониженным содержанием *углерода*, но весьма большим количеством легирующих элементов — В11М7К23, В14М7К25, 3В20К20Х4Ô. Они имеют твердость 69–70 HRC и теплостойкость 700–720 °С. Наиболее рациональная область их использования — резание труднообрабатываемых материалов и *титановых* сплавов. В последнем случае период стойкости инструментов в 60 раз выше, чем из стали Д18, и в 8–15 раз выше, чем из твердого сплава ВÊ8.

Значительными недостатками этих сталей является их низкая прочность при изгибе (не выше 2400 МПа) и низкая обрабатываемость резанием в отожженном состоянии (38–40 HRC) при изготовлении инструмента.

В связи со все более возрастающей дефицитностью W и Mo — основных легирующих элементов, используемых при производстве быстрорежущей стали, — все большее применение находят экономно-легированные марки. Среди сталей этого типа наибольшее применение получила сталь 11ВЗÀÌ 3Ô2, которая используется при производстве инструмента, так как обладает достаточно высокими показателями по твердости (63–64 HRC), прочности ($\sigma_u = 3400$ МПа) и теплостойкости (до 620 °С). Сталь 11ВЗÀÌ 3Ô2 технологична в металлургическом производстве, однако из-за худшей шлифуемости её применение ограничено инструментами простой формы, не требующими больших объемов абразивной обработки (*пилы по металлу, резцы и т. п.*).

Основными видами режущих инструментов из быстрорежущей стали являются *резцы, сверла, долбяки, протяжки, метчики машинные, ножи для резки бумаги*. Часто из быстрорежущей стали изготавливают только рабочую часть инструмента.

Стали повышенной теплостойкости характеризуются повышенным содержанием *углерода, ванадия и кобальта*.

Легирование V приводит к образованию карбидов, которые по твердости на 40 % превосходят карбиды WC. Улучшается растворимость карбидов в аустените. Повышается теплостойкость и износостойкость, но из-за более высокой твердости ухудшается шлифуемость.

Инструменты из **вольфрамо-ванадиевых сталей** рекомендуются использовать при обработке жаропрочных и нержавеющей сталей.

Наряду с высокой износостойкостью ванадиевые стали обладают плохой шлифуемостью из-за присутствия карбидов ванадия (VC), так как твердость последних не уступает твердости зерен электрокорундового шлифовального круга (Al_2O_3).

Среди ванадиевых сталей наибольшее применение получила марка ДБ1 503 .

Ванадиевые быстрорежущие стали находят применение для инструментов несложных форм при чистовых и получистовых условиях резания для обработки материалов, обладающих повышенными абразивными свойствами.

3.2.2. Классификация быстрорежущих сталей по шлифуемости

Инструментальный материал должен хорошо обрабатываться в горячем состоянии (ковки, прокатка) и в холодном состоянии (шлифуемость, отсутствие прижогов, обеспечение высокого качества поверхности).

Обрабатываемость при шлифовании (шлифуемость) — это важнейшее технологическое свойство не только при изготовлении инструментов, но и при его эксплуатации (переточках).

По шлифуемости быстрорежущие стали можно разделить на 4 группы:

Группа 1. Содержание *ванадия* до 1,4 % и относительная шлифуемость 0,9–1 (за единицу принята «обрабатываемость при шлифовании» стали Д18 , обладающая наилучшей шлифуемостью).

Группа 2. Содержание *ванадия* 1,7–2,2 %, относительная шлифуемость 0,5–0,9. В эту группу, в частности, входят стали ДБ1 5 , ДБ1 5E5 , Д2A1 9E5 и др.

Группа 3. Содержание *ванадия* 2,3–3,3 %, относительная шлифуемость 0,3–0,5 (11ВВÀÌ 3Ô2, ЁБÌ 5Ô3, Ё12Ô3, Ё9, Ё9Ì 4Ê8 и др.).

Группа 4. Содержание *ванадия* более 4 %, относительная шлифуемость 0,2–0,3 (Ё12Ô4Ê5 и др.).

3.2.3. Порошковые быстрорежущие стали

Наиболее эффективные возможности повышения качества быстрорежущей стали, её эксплуатационных свойств и создания новых режущих материалов появились при использовании порошковой металлургии.

Порошковая быстрорежущая сталь характеризуется однородной мелкозернистой структурой, равномерным распределением карбидной фазы, пониженной деформируемостью в процессе термической обработки, хорошей шлифуемостью, более высокими технологическими и механическими свойствами, чем сталь аналогичных марок, полученных по традиционной технологии.

Технологическая схема получения порошковых быстрорежущих сталей: газовое распыление в порошок жидкой струи быстрорежущей стали, засыпка и дегазация порошка в цилиндрический контейнер, нагрев и ковка (или прокатка) контейнеров в прутки, окончательная резцовая обдирка остатков контейнера с поверхности прутков. Основным преимуществом порошковой технологии является резкое снижение размеров карбидов, образующихся при кристаллизации слитка в изложнице. Таким образом, порошок, полученная газовым распылением, и является микрослитком, в котором не образуются крупные карбиды.

Новая технология позволяет существенно изменить схему легирования с целью направленного повышения тех или иных эксплуатационных характеристик, определяющих стойкость инструмента.

Основные примеры разработки новых составов порошковой быстрорежущей стали сводятся к возможности введения в состав до 7 % V и значительного, в связи с этим, повышения износостойкости без ухудшения шлифуемости. А также введение углерода с «пересыщением» до 1,7 %, позволяющего получить значительное количество карбидов ванадия и высокую вторичную твердость после закалки с отпуском.

Основным преимуществом порошковой технологии является резкое снижение размеров карбидов, образующихся при кристаллизации слитка в изложнице. Новая технология позволяет существенно изменить схему легирования с целью направленного повышения тех или иных эксплуатационных характеристик, определяющих стойкость инструмента.

Технология порошковой металлургии также используется для получения карбидостали, которая по своим свойствам может быть классифицирована как промежуточная между быстрорежущей сталью и твердыми сплавами.

3.3. КАРБИДОСТАЛИ

Карбидосталими называют порошковые материалы, состоящие из легированной стальной матрицы и карбидов с массовой долей от 20 до 70 %. В качестве карбидной составляющей чаще всего применяют карбид титана. Матрица из легированной стали выполняет роль связки с равномерно распределенными в ней карбидами.

Приготовление порошковой смеси состоит в смешивании порошка TiC с порошком стали-связки заданного состава либо со смесью порошка железа с порошками легирующих компонентов.

Карбидостали после закалки и отпуска обладают высокой твердостью и износостойкостью. Кроме инструментов разного назначения их можно использовать для изготовления деталей, подвергающихся интенсивному износу: *втулок, валиков, подшипников, зубчатых колес, кулачков*, а также деталей, работающих в условиях гидроабразивного износа, при повышенных температурах и в коррозионных средах. В качестве матрицы могут использоваться инструментальные, конструкционные, нержавеющие и другие стали, что определяется назначением карбидосталей.

Карбидостали обладают высокой твердостью при нагреве, сравнительно низким коэффициентом трения, устойчивостью против адгезии при обработке материалов, незначительным изменением размеров при термической обработке. Карбидостали легче инструментальных сталей на 12 %, твердых сплавов — на 50 %.

В отожженном состоянии твердость карбидостали составляет 40–44 HRC, а после закалки и отпуска — 68–70 HRC.

При использовании в качестве материала режущего инструмента карбидосталь обеспечивает повышение стойкости в 1,5–2 раза по сравнению с аналогичными марками обычной технологии производства. В ряде случаев карбидосталь является полноценным заменителем твердых сплавов, особенно при изготовлении формообразующих инструментов (*деформирующие протяжки*).

4. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ

Твердыми сплавами называются сплавы, состоящие из карбидов вольфрама и титана, цементованных металлической связкой. Сильно измельченные частицы карбидов связываются между собой кобальтом.

Карбиды вольфрама и особенно **титана** обладают высокой твердостью, но хрупки. Поэтому металлокерамические сплавы, содержащие 70–98 % карбидов, также имеют высокую твердость (86–92 HRC) и износостойкость, но плохо сопротивляются изгибу и растяжению. При работе, связанной с ударами и толчками, сплав легко выкрашивается.

Твердые сплавы сохраняют высокую твердость и сопротивление износу до температуры 800–1000 °С. При работе инструментами из твердых сплавов можно допустить разогрев режущей кромки до более высоких температур, чем у инструмента из быстрорежущей стали. Скорость резания этими сплавами в 5–10 раз превышает допустимую скорость резания быстрорежущими сталями.

Твердые сплавы являются основным инструментальным материалом, обеспечивающим высокопроизводительную обработку материалов резанием. Сейчас общее количество твердосплавного инструмента, применяемого в механообрабатывающем производстве, составляет до 30 %, причем этим инструментом снимается до 65 % стружки.

Впервые спеченные твердые сплавы получены из *карбида вольфрама* и *кобальта* в Германии в **1923–1925 гг.**, промышленное

производство начато в **1926 г.** (сплав «видиа»: 94 % WC и 6 % Co). В СССР первые твердые сплавы из *карбида вольфрама* (90 %) и *кобальта* (10 %) — сплав «победит» — создан в 1929 г., а в 1935 г. организовано производство твердых сплавов «альфа» из смесей *карбидов вольфрама* и *титана* (21,15 % и 5 % TiC в сплаве) и *кобальта* (соответственно 8,6 % и 8,0 % Co).

Твердые сплавы получают методами порошковой металлургии в виде пластин. Твердые сплавы по составу и областям применения можно разделить на четыре группы: *вольфрамокобальтовые* (WC–Co), *титановольфрамокобальтовые* (WC–TiC–Co), *титанотанталовольфрамокобальтовые* (WC–TiC–TaC–Co), *безвольфрамовые* (на основе TiC, TiCN с различными связками).

4.1. ВОЛЬФРАМОКОБАЛЬТОВЫЕ СПЛАВЫ (ВК)

Вольфрамокобальтовые сплавы (группа ВК) состоят из карбида вольфрама (WC) и кобальта (Co). Сплавы этой группы различаются содержанием в них Co, размерами зерен карбида вольфрама WC и технологией изготовления. Для оснащения режущего инструмента применяют сплавы с содержанием кобальта 3–10 %.

В условном обозначении сплава цифра показывает процентное содержание кобальтовой связки. Например, обозначение ВК6 показывает, что в нем 6 % Co и 94 % WC.

Сплавы с размерами карбидов от 3 до 5 мкм относятся к **крупнозернистым** и обозначаются буквой «В» ($\hat{A}\hat{E}6\hat{A}$), с размерами карбидов от 0,5 до 1,5 мкм буквой «М» (**мелкозернистый** $\hat{A}\hat{E}6\hat{I}$), а с размерами, когда 70 % зерен менее 1,0 мкм — «ОМ» (**особо мелкозернистый** $\hat{A}\hat{E}6\hat{I}\hat{I}$). Сплавы с меньшим размером карбидной фазы более износостойкие и теплостойкие, а также позволяют затачивать более острую режущую кромку (допускают получение радиуса округления режущей кромки до 1,0–2,0 мкм).

При увеличении в сплавах содержания кобальта в диапазоне от 3 до 10 % предел прочности, ударная вязкость и пластическая деформация возрастают, в то время как твердость и модуль упругости уменьшаются. С ростом содержания Ni повышаются тепло-

проводность сплавов и их коэффициент термического расширения (рис. 4).

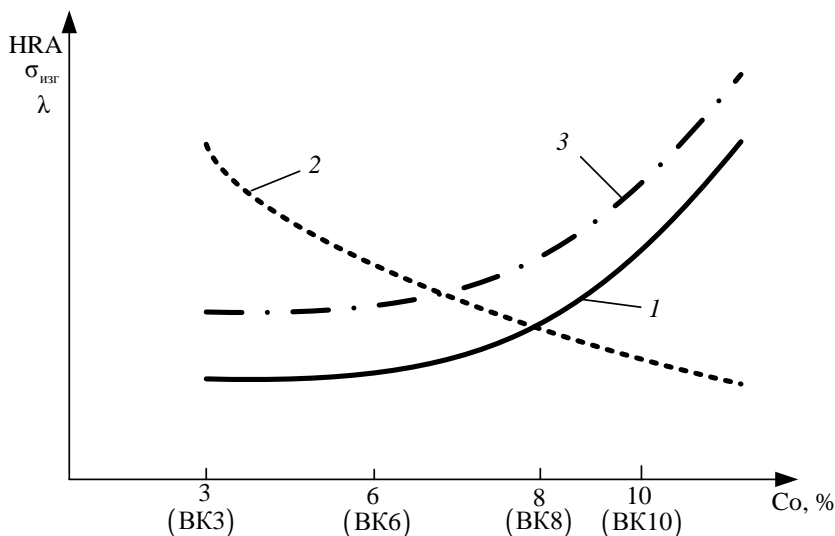


Рис. 4. Влияние кобальта на свойства твердого сплава группы (ВК): 1 — прочность на изгиб, $\sigma_{сг}$; 2 — твердость, HRA; 3 — теплопроводность, λ

Наибольшей твердостью (89–90 HRA) и износостойкостью, но пониженными прочностью ($\sigma_a = 100 \div 110 \text{ кг/см}^2$) и сопротивлением удару ($0,2 \text{ кг/см}^2$ для ненадрезанных образцов) обладают сплавы ВК2 и ВК3.

Из всех существующих твердых сплавов сплавы группы ВК при одинаковом содержании кобальта обладают более высокими ударной вязкостью и пределом прочности при изгибе, а также лучшей тепло- и электропроводностью. Однако стойкость этих сплавов к окислению и коррозии значительно ниже; кроме того, они обладают большой склонностью к схватыванию со стружкой при обработке резанием. При одинаковом содержании кобальта физико-механические и режущие свойства сплавов в значительной мере определяются средним размером зерен (WC). Разработанные тех-

нологические приемы позволяют получать твердые сплавы, в которых средний размер зерен карбидной составляющей может изменяться от долей микрометра до 10–15 мкм.

Эти сплавы применяют для чернового точения, строгания, фрезерования и сверления чугуна, цветных металлов и их сплавов, а также неметаллических материалов. Сплавы с высоким содержанием кобальта $\hat{A}\hat{E}20$, $\hat{A}\hat{E}30$ применяют для штампов и инструментов для горных работ.

4.2. ТИТАНОВОВОЛЬФРАМОВОКОБАЛЬТОВЫЕ СПЛАВЫ (ТК)

Сплавы второй группы ТК состоят из трех основных фаз: твердого раствора карбидов титана и вольфрама ($TiC - WC$) и кобальтовой связки.

Цифры после буквы «Т» указывают весовое количество карбида TiC , цифры после буквы «К» — весовое содержание кобальта (остальное WC).

Кроме того, в обозначении сплава может стоять буква «В» — **крупнозернистый** сплав и «М» — **мелкозернистый**.

Сплавы ТК менее прочны, чем сплавы ВК, но обладают большей износостойкостью. Так, например, у сплава $\hat{O}30\hat{E}4$ прочность $\sigma_a = 90 \hat{A}/\hat{i}^2$, а у сплава $\hat{O}5\hat{E}10$ прочность $\sigma_a = 130 \hat{A}/\hat{i}^2$.

Так же как у сплавов на основе $WC - Co$, предел прочности при изгибе и сжатии и ударная вязкость увеличиваются с ростом содержания Co .

Теплопроводность сплавов группы ТК существенно ниже, а коэффициент линейного термического расширения выше, чем у сплавов группы ВК. Соответственно меняются и режущие свойства сплавов: при увеличении содержания Co снижается износостойкость сплавов при резании, а при увеличении содержания $\hat{O}iC$ снижается эксплуатационная прочность (рис. 5).

Наибольшей эксплуатационной прочностью, сопротивляемостью ударным нагрузкам и выкрашиванию, но пониженной износостойкостью обладают сплавы $\hat{O}5\hat{E}10$ и $\hat{O}14\hat{E}8$.

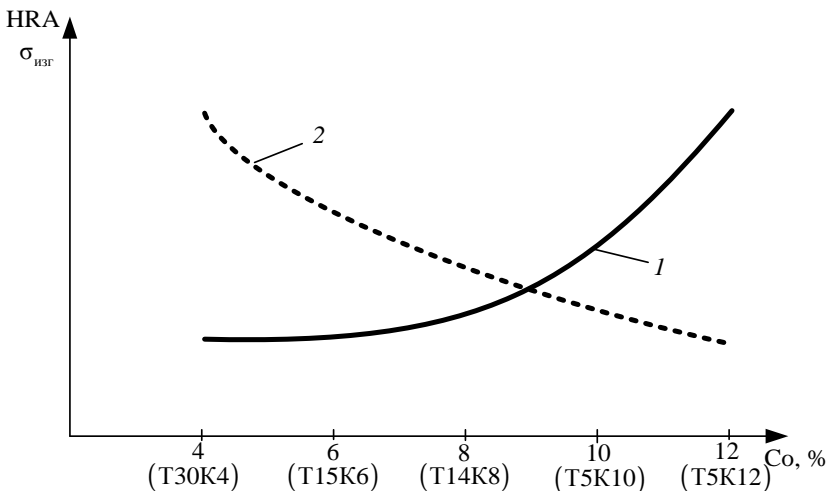


Рис. 5. Влияние кобальта на свойства твердого сплава группы ТК:
 1 — прочность на изгиб, $\sigma_{изг}$; 2 — твердость, HRA

Твердость этой группы сплавов от 88,5 HRA ($\text{05}\hat{\text{E}}10$) до 92 HRA ($\text{030}\hat{\text{E}}4$). Предназначены они главным образом для оснащения инструментов при обработке резанием сталей, дающих сливную стружку. По сравнению со сплавами группы ВК они обладают большей стойкостью к окислению, твердостью и жаропрочностью и в то же время меньшими теплопроводностью и электропроводностью, а также модулем упругости.

Способность сплавов группы ТК сопротивляться изнашиванию под воздействием скользящей стружки объясняется также и тем, что температура схватывания со сталью у сплавов этого типа выше, чем у сплавов на основе WC-Co, что позволяет применять более высокие скорости резания при обработке стали и существенно повышать стойкость инструмента.

Сплавы $\text{030}\hat{\text{E}}4$ и $\text{015}\hat{\text{E}}6$ применяют для чистовой и получистовой обработки стали с высокой скоростью резания и малыми нагрузками на инструмент. В то же время сплавы $\text{05}\hat{\text{E}}10$ и $\text{05}\hat{\text{E}}12$ с наибольшим содержанием Co предназначены для работы в тяжелых условиях ударных нагрузок с пониженной скоростью резания.

Путем введения легирующих добавок получены сплавы, применяемые для резания стали с большими ударными нагрузками.

Разработан сплав TiC-8Co для замены стандартного сплава TiC-10Co . Предел прочности его при изгибе — 1600 МПа, в то время как у сплава TiC-10Co он составляет 1400 МПа. Предельная пластическая деформация TiC-8Co — 1,6 %, а у сплава TiC-10Co — 0,4 %.

Сплав TiC-8Co в большей степени, чем сплав TiC-10Co , сопротивляется ударным нагрузкам и может применяться при черновой токарной обработке стальных отливок при скорости резания 30–70 м/мин, глубине резания до 40 мм и подаче 1–1,2 мм/об. Стойкость инструмента, оснащенного сплавом TiC-8Co , в 1,5–2,0 раза выше, чем стойкость инструмента, оснащенного сплавом TiC-10Co .

4.3. ТИТАНОТАНТАЛОВОЛЬФРАМОКОБАЛЬТОВЫЕ СПЛАВЫ (ТТК)

Промышленные танталосодержащие твердые сплавы на основе WC-TiC-TaC-Co состоят из трех основных фаз: твердого раствора карбидов титана и тантала (TiC-TaC), а также карбида вольфрама (WC) и кобальтовой связи.

Цифра после букв «ТТ» показывает суммарное содержание TiC+TaC , а после буквы «К» — количество Co (TiC-8Co-12K).

Эти сплавы имеют более высокую прочность ($\sigma_a = 155 \text{ кг/мм}^2$), чем сплавы ТК. Твердые сплавы изготавливают в виде пластин, прикрепленных к державке, изготовленной из обычной стали, или инструментов простой формы. Введение в сплавы добавок *карбида тантала* улучшает их физико-механические и эксплуатационные свойства, что выражается в увеличении прочности при изгибе при температуре 20 °С и 600–800 °С.

Сплав, содержащий TaC , имеет более высокую твердость, в том числе и при 600–800 °С. TaC в сплавах снижает ползучесть, существенно повышает предел усталости трехфазных сплавов при циклическом нагружении, а также термостойкость и стойкость к окислению на воздухе.

Металлокерамические твердые сплавы получают не сплавлением, а *спеканием*. Для этой цели сначала готовят порошки WC и TiC, которые смешивают в определенной пропорции с порошком Co. Смесь порошков прессуют под давлением $500\text{--}2000 \text{ МПа}$ в формах, соответствующих размерам и форме пластинок (заготовки инструмента). Затем пластинки подвергают спеканию при высокой температуре ($1400\text{--}1450 \text{ }^\circ\text{C}$).

Увеличение в сплаве содержания TaC повышает его стойкость при резании, особенно благодаря меньшей склонности к лункообразованию и разрушению под действием термоциклических и усталостных нагрузок. Поэтому танталосодержащие сплавы рекомендуются главным образом для тяжелых условий резания с большими сечениями среза, когда на режущую кромку инструмента действуют значительные силовые и температурные нагрузки, а также для прерывистого резания, особенно фрезерования.

Наиболее прочным для обработки стали в особо неблагоприятных условиях (прерывистое точение, строгание, черновое фрезерование) является сплав WC-12TiC . Применение его взамен быстрорежущей стали позволяет повысить скорость резания в 1,5–2 раза.

4.4. БЕЗВОЛЬФРАМОВЫЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ (БВТС)

В связи с дефицитностью W и Co промышленность выпускает безвольфрамовые твердые сплавы на основе карбидов и карбонитридов титана с никельмолибденовой связкой.

По твердости БВТС находятся на уровне вольфрамосодержащих сплавов (группы ВК), по прочностным характеристикам и особенно по модулю упругости им уступают. Твердость БВТС по Виккерсу при повышенных температурах в диапазоне температур $293\text{--}1073 \text{ K}$ несколько ниже, чем твердость вольфрамосодержащего сплава TiC-6NbC .

БВТС имеют низкую окисляемость. Наибольшая термостойкость у сплава TiC-16NbC , у сплава TiC-20NbC она значительно ниже. Поэтому из сплава TiC-16NbC целесообразно изготавливать инструмент, работающий при прерывистом резании, например фрезеровании. Средняя «ломающая подача» (при которой происходит разрушение

лезвия) составляет для сплава Ö1 20 — 0,3 мм/зуб., а для сплава Ö1 016 — 0,54 мм/зуб. При выборе режимов резания подача не должна превышать этих значений, а глубина резания — 5 мм.

Наибольшей износостойкостью обладает сплав Ö1 20 . При точении стали 45 и стали 40X при 0,2 мм/об стойкость сплава Ö1 20 выше стойкости сплава Ö15 06 во всем диапазоне скорости резания (от 200 до 600 м/мин).

Нагрев инструмента из БВТС на установках ТВЧ, обычно применяемых при пайке инструмента, ухудшает его эксплуатационные характеристики. Поэтому для резания из БВТС изготавливают в основном сменные неперетачиваемые пластины (СМП).

В связи с пониженной теплопроводностью наибольшую стойкость БВТС имеют в случае применения четырех-, пяти- и шестигранных СМП, а не трехгранных; оптимальными геометрическими параметрами пластин при этом являются передний угол 10° , задний угол $8\text{--}10^\circ$, радиус при вершине 0,8 мм.

Эффективность применения БВТС зависит от правильности подготовки инструмента, выбора режимов резания и условий обработки. Пластины должны иметь высококачественную доводку по режущим кромкам и опорной поверхности и прилегать к опоре без зазора.

Обрабатываемая заготовка не должна иметь биения, превышающего половину припуска на обработку, а также следов газовой сварки, шлаковых включений.

При точении по возможности следует применять охлаждение.

Для предотвращения катастрофических поломок инструмента рекомендуется производить принудительный поворот пластинки после обработки определенного числа заготовок. Допустимый износ резцов по задней грани — 1,5–1,8 мм.

При фрезеровании БВТС можно эксплуатировать до износа 2,5–3,0 мм по задней грани.

4.5. КРАТКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Твердые сплавы на основе WC–Co рекомендуют для обработки серых, модифицированных и отбеленных чугунов, цветных

металлов и их сплавов, стеклопластиков и других подобных материалов, дающих короткую сыпучую стружку надлома.

Обладая высокой прочностью, сплавы WC–Co лучше сопротивляются пульсирующей высокой нагрузке, имеющей место в данных условиях обработки. Превалирующим видом изнашивания в этом случае является адгезионно-усталостное, а при обработке белых чугунов и стеклопластиков — абразивное, при которых важным фактором, определяющим стойкость инструмента, является не только содержание кобальта в сплаве, но и размеры зерен фазы WC. И чем выше твердость обрабатываемого материала, тем существеннее влияние зернистости твердого сплава на стойкость инструмента.

Сплавы WC–Co рекомендуются также для обработки труднообрабатываемых высокопрочных и жаропрочных материалов, особенно сплавов на основе никеля и титана.

Сплавы на основе Ni, обладающие высокой прочностью и значительным сопротивлением ползучести при высоких температурах, а также низкой теплопроводностью, с большим трудом обрабатываются резанием. На поверхности резания «инструмент–заготовка» генерируются очень высокие температуры и напряжения, происходят схватывание и последующий отрыв частиц твердого сплава. Лучшую стойкость в этих условиях показывают особо мелкозернистые высококобальтовые сплавы.

Твердые сплавы на основе WC–TiC–Co рекомендуют в случае обработки стали при высоких скоростях резания, когда образуется сливная стружка. Стружка постоянно контактирует с передней поверхностью инструмента в условиях значительных температуры и давления, что приводит к интенсивному образованию лунки износа на передней поверхности резца. В этом случае превалирует диффузионное изнашивание. Раствор WC в TiC растворяется в стали при более высокой температуре и гораздо медленнее, чем WC. Кроме того, присутствие фазы WC–TiC–Co способствует уменьшению скорости растворения зерен WC в стали и тем самым снижает интенсивность изнашивания.

При диффузионном характере изнашивания его скорость, определяемая скоростью растворения карбидных зерен в стали, в большей степени зависит от химических свойств сплава, чем от его

твердости, связанной с зернистостью. В таких условиях значительно большей стойкостью обладают безвольфрамовые сплавы, основой которых является карбид или карбонитрид титана. Они взаимодействуют со сталью менее интенсивно, чем сложный карбид WC – TiC.

Твердые сплавы на основе WC – TiC – TaC – Co рекомендуют при прерывистом резании, например фрезеровании, когда на рабочих поверхностях инструмента появляются многочисленные короткие трещины, перпендикулярные к режущей кромке. Эти трещины вызваны периодическим расширением при нагреве в процессе резания и сжатием при охлаждении поверхностных слоев твердого сплава. При дальнейшем развитии трещины приводят к выкрашиваниям и сколам и становятся главной причиной выхода инструмента из строя. Поэтому для оснащения фрезерного инструмента применяют твердые сплавы, наименее чувствительные к термической усталости и динамическим циклическим нагрузкам, сплавы, содержащие в своем составе карбид тантала, т. е. сплавы на основе WC – TiC – TaC – Co.

5. СТАЛИ ДЛЯ УДАРНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Исходя из назначения, эти стали должны обладать: повышенной вязкостью для предупреждения поломок и выкрашивания режущих кромок инструмента, работающего в условиях больших ударных нагрузок; высокими прокаливаемостью и закаливаемостью в горячих средах, т. е. возможностью принимать **изотермическую закалку** в больших сечениях, что обеспечивает повышение ударной вязкости.

Необходимый комплекс свойств сталей этой группы обеспечивается соответствующим легированием.

Хромокремнистые стали (40Ñ, 60Ñ) прокаливаются в образцах диаметром до 50–60 мм при охлаждении в *масле*. Кроме того, стали, легированные Si, имеют повышенную устойчивость при отпуске и предел текучести.

Недостатком этих сталей является отпускная хрупкость первого рода **после отпуска** при 270–400 °С на твердость 46–50 HRC.

Поэтому для получения удовлетворительной вязкости в этом случае необходимо применять **изотермическую закалку**.

Хромовольфрамокремнистые стали 50А2Н0, 60А2Н и другие, как более сложнелегированные, прокаливаются в больших сечениях (до 70–80 мм, при охлаждении в масле и хорошо принимают **изотермическую закалку**. Стали с *вольфрамом* менее чувствительны к отпускной хрупкости первого рода.

Стали этой группы предназначены для изготовления пневматических инструментов: *зубил, обжимок, вырубных, обрезных и чекалочных штампов, работающих с повышенными ударными нагрузками, рубильных ножей, штемпелей, клейм, прошивочного, деревообрабатывающего инструмента* и т. д.

Для повышения износостойкости этих сталей иногда необходимо проведение дополнительной химико-термической обработки (*азотирование, нитроцементация* и др.), обеспечивающей при правильно выбранных режимах значительное возрастание поверхностной твердости без заметного снижения сопротивления хрупкому разрушению.

6. СТАЛИ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА

Стали этого назначения должны обладать высокой твердостью и износостойкостью, сохранять постоянство формы и размеров в течение длительного срока эксплуатации. Кроме того, от них требуется хорошая обрабатываемость для получения высокого класса чистоты поверхности и малая деформация при термической обработке.

Для измерительного инструмента обычно применяют высокоуглеродистые стали 08 ÷ 012 и низколегированные стали марок 0, 0АА, 0АН, 90Н, содержащие около 1 % С и до 1,5 % Нг. Их твердость после термообработки должна быть не менее 60–64 НRC.

После обычной термической обработки в структуре высокоуглеродистых сталей обычно присутствует *остаточный аустенит*, из-за чего она не является стабильной. Для обеспечения высокой твердости стали и стабильности размеров инструмента в процессе

эксплуатации проводится специальная термическая обработка. Она состоит из *закалки в масле*, для особо точных инструментов включает дополнительно обработку холодом при температуре $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и длительного (до 30 ч) *низкотемпературного отпуска* при $120\text{--}170\text{ }^{\circ}\text{C}$. Нагрев при более высокой температуре недопустим из-за снижения твердости и износостойкости инструмента. Длительный отпуск предотвращает процессы старения и распад *мартенсита* в течение всего периода эксплуатации инструмента.

Для измерительных инструментов большого размера и сложной геометрии используют *азотируемые стали* типа 38Ö21 P A.

7. ШТАМПОВЫЕ СТАЛИ

Штамповыми называют стали для изготовления инструментов, предназначенных для изменения формы материала деформированием без снятия стружки. Основные требования, которые предъявляют к таким сталям, — это высокие значения *твердости, вязкости, износостойкости, теплостойкости*.

Состав сталей зависит от условий работы инструмента. Чаще применяют комплексно-легированные стали, однако содержание легирующих элементов должно быть минимальным и при этом обеспечивать максимальные свойства.

Легируют такими элементами, как Cr, W, Mo, V, Ni, Co, Ti, в количестве от 0,5 до 1,5 % и более. Содержание *углерода* при этом понижено до 0,3–0,5 %.

7.1. ШТАМПОВЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Штампы для холодного деформирования работают в условиях высоких переменных нагрузок, выходят из строя *вследствие хрупкого разрушения*, поверхностной усталости и изменения формы и размеров за счет смятия (пластической деформации). Поэтому *штамповые стали для холодного деформирования* должны иметь высокую *твердость, износостойкость и повышенную вязкость* (особенно для инструментов, работающих при динамических нагрузках).

Необходимым свойством стали является *теплостойкость*, так как условия работы деталей связаны со значительным разогревом инструмента (до 300–400 °С).

В качестве штамповых сталей для холодного деформирования могут применяться *нетеплостойкие углеродистые* или *легированные стали* (вытяжные и высадочные малогабаритные штампы, работающие при небольших давлениях и скоростях деформирования, и т. п.) или *полутеплостойкие высокохромистые* (с содержанием 3–12 % Ni и 0,7–1,5 % C), дополнительно легированные *ванадием, молибденом, вольфрамом* и другими элементами.

Нетеплостойкие малолегированные стали обычно бывают заэвтектоидными или, реже, эвтектоидными. Они имеют высокую твердость после закалки (60–63 HRC и выше), достаточную вязкость, хорошую обрабатываемость резанием в отожженном состоянии. Однако пониженная теплостойкость и износостойкость этих сталей ограничивают их применение.

Составы легированных штамповых сталей холодного деформирования регламентированы **ГОСТ 5950-73** и соответствующими ТУ.

По основным свойствам штамповые легированные стали для холодного деформирования можно разделить на:

- ◆ стали повышенной (высокой) износостойкости;
- ◆ дисперсионно-твердеющие стали с высоким сопротивлением смятию;
- ◆ высокопрочные стали с повышенной вязкостью.

Рассмотрим только **стали повышенной (высокой) износостойкости**: полутеплостойкие стали с высоким содержанием *хрома* (6–12 %).

Термическая обработка сталей высокой износостойкости заключается *в закалке* от температур 950–1050 °С и *отпуске* при 150–250 °С. Вследствие пониженной теплопроводности нагрев под закалку легированных штамповых сталей осуществляют ступенчато с предварительным подогревом до 650–700 °С. В структуре закаленной стали кроме *мартенсита* присутствует некоторое количество нерастворенных *карбидов* и остаточный *аустенит*.

Повышение температуры **закалки** способствует уменьшению количества нерастворенных карбидов, увеличению содержания *хрома* в твердом растворе и, следовательно, повышению тепло-

стойкости, но при этом возрастает количество остаточного *аустенита* и увеличивается размер *аустенитного зерна*, что сопровождается понижением твердости и прочности стали.

После **закалки и отпуска** в этих сталях выделяются специальные *карбиды*, в основном Me_7C_3 и в меньшем количестве $Me_{23}C_6$ и MeC . Объемная доля карбидных фаз высока и составляет 12–24 % массы в зависимости от содержания $\tilde{N}r$ и других элементов.

При увеличении доли более твердого карбида MeC (например VC) износостойкость стали возрастает, однако одновременно значительно снижаются ударная вязкость и прочность.

Из-за пониженной вязкости такие стали пригодны для изготовления инструментов, работающих без значительных динамических нагрузок: *вытяжные и вырубные штампы, матрицы прессования порошков* и т. п.

Молибден и ванадий в сталях $\tilde{O}12\hat{O}1$ и $\tilde{O}12\hat{I}$ способствуют сохранению *мелкого зерна*. Обе стали обладают высокой прокаливаемостью. При закалке на первичную твердость сталь $\tilde{O}12\hat{O}1$ прокаливается до 150–180 мм, а сталь $\tilde{O}12\hat{I}$ — до 200 мм при охлаждении в *масле*.

Высокохромистые стали $\tilde{O}12\hat{O}1$ и $\tilde{O}12\hat{I}$ относятся по структуре к *ледебуритному классу* (после отжига) и *мартенситному* (после нормализации), содержат 16–17 % карбидов $(\tilde{N}r, Fe)_7C_3$, $D_{e\delta} = 180 \div 200 \text{ мм}$.

Низколегированные стали X, ХВГ, ХГВС, 9ХС, так же как и углеродистые У10, У11, У12 используют преимущественно для вытяжных, высадочных, обрезных и обрубных штампов, высадочных пуансонов, которые из-за несквозной прокаливаемости имеют твердый износостойкий слой и вязкую сердцевину, позволяющую работать при небольших ударных нагрузках.

Недостаток высокохромистых сталей заключается в трудности обработки резанием в отожженном состоянии (НВ 207–269) и снижении механических свойств в случае резко выраженной карбидной неоднородности (крупные скопления карбидов, карбидная сетка, карбидная полосчатость). Меньшей карбидной неоднородностью обладает сталь ХБВФ, которая применяется для инструментов с высокой механической прочностью и сопротивлением изнашиванию

(накатные плашки, накатники для холодного накатывания зубчатых колес и т. д.). Прокаливаемость стали ХБВФ меньше и не превышает 70–80 мм.

Для изготовления штампов сложной формы, пневматического инструмента, гибочных и вытяжных штампов, ножей для резания металлов, пуансонов и обжимных матриц, зубил и другого инструмента, испытывающего в работе ударные нагрузки, применяют доэвтектоидные стали 40А2Н, 50А2Н, 60А2Н, а также 4ХС и 6ХС, содержащие 1,0–1,6 % Ni и 0,6–1,6 % Si . Высокая вязкость сталей достигается низким содержанием в них *углерода* и более высоким отпуском после закалки.

7.2. ШТАМПОВЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Штампы для горячей обработки работают при высоких температурах, испытывают многократные теплосмены, динамические нагрузки и коррозионное воздействие.

Основными требованиями к штамповым сталям для горячего деформирования являются *высокая теплостойкость* и *вязкость*, *сопротивление термической усталости (разгаростойкость)*, *коррозионная стойкость (окалиностойкость)*.

Разгаростойкость — особое свойство сталей, которое характеризует устойчивость к образованию поверхностных трещин при многократных теплосменах (K_{CU} повышается, а α понижается).

Содержание *углерода* должно составлять 0,3–0,5 %.

Теплостойкость обеспечивает комплексное легирование следующими элементами: W , Mo , Ni , V , Co . Вязкость должна быть $> 0,4–0,45 \text{ кгс/см}^2$ при 20 °С и $0,6 \text{ кгс/см}^2$ при рабочей температуре.

Упрочнение сталей связано с дисперсионным твердением (*закалка на мартенсит и отпуск*) или можно использовать *мартенситно-стареющие* стали.

Многие штампы имеют большие размеры, поэтому сталь для их изготовления должна обладать высокой прокаливаемостью. Это обеспечивает высокие механические свойства по всему сечению

штампа. Важно, чтобы сталь не была склонна к обратимой отпускной хрупкости, так как быстрым охлаждением крупных штампов её устранить нельзя.

По основным свойствам и химическому составу стали горячего деформирования делят на три группы:

- 1) стали умеренной теплостойкости и повышенной вязкости;
- 2) стали повышенной теплостойкости и вязкости;
- 3) стали повышенной теплостойкости.

1. Стали умеренной теплостойкости и повышенной вязкости. Стали этой группы используют для изготовления крупных прессовых и молотовых штампов. Эти стали должны быть комплексно-легированными. Для повышения прокаливаемости и высокой вязкости стали легируют Ni — 2,5 %, Mn — 1,5–2,0 %. Также добавляют немного карбидообразующих элементов: Cr — 2 %, W — 1 %, Mo — 1 %, V — 0,5 % (например, 50Г1, 50Г1А, 40Н1, 30Г1, 50Г1В).

Термическая обработка предусматривает проведение закалики от 920–950 °С с высоким отпуском.

Закалка от 980–1020 °С и отпуск с 580–600 °С позволяют получить твердость 46–49 HRC и структуру $\dot{\Gamma} + \dot{A}_{\dot{\Gamma}} + \dot{E}$.

Охлаждают штампы в масле, хорошие результаты получают при ступенчатой закалке.

Если кроме $(Fe, Me)_3C$ содержатся карбиды Me_6C и MeC , то температуру закалки надо повысить до 1020 °С.

Структура закаленной стали зависит от размеров штампа и состава стали. В крупногабаритных штампах она смешанная: $\dot{\Gamma} + \dot{A}_{\dot{\Gamma}} + \dot{A}$, в мелких штампах — $\dot{\Gamma} + \dot{A}_{\dot{\Gamma}}$. Наличие бейнита нежелательно, так как это уменьшает теплостойкость и замедляет дисперсионное твердение при отпуске, а также понижает пластичность и ударную вязкость.

Хорошее сочетание прочности и пластичности стали 50Г1В: $KCU = 0,35 \div 0,40 \cdot \dot{A} / \dot{\Gamma}^2$ при 20 °С и $KCU = 1,0 \cdot \dot{A} / \dot{\Gamma}^2$ при 600 °С.

2. Стали повышенной теплостойкости и вязкости. Стали этой группы содержат больше легирующих элементов и меньше угле-

рода (0,3–0,4 %). Твердость стали зависит от содержания в *мартенсите углерода* и легирующих элементов. При отжиге образуются карбиды — Me_{23}C_6 , Me_6C , MeC . Стали имеют большую теплостойкость и менее склонны к перегреву. Термическая обработка включает *закалку в масле и высокий отпуск*.

Прочностные свойства зависят от состава. Для стали марки 404: $\sigma_{\lambda} = 1700 \div 1800 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_{0,2} = 1550 \div 1650 \text{ Н/мм}^2$, $\psi = 40 \div 45 \%$, 47–49 HRC.

Сопротивление хрупкому разрушению, а также термомеханической усталости теплостойких сталей растет с понижением прочности. Cr придает им хорошую окалиностойкость и повышенную износостойкость при нагреве. Для таких штампов применяют *ионное азотирование*.

Сталь марки 405 используется при изготовлении игл для прошивки труб, работающих до температур 600–630 °С; 403 — для инструментов, работающих в условиях высоких давлений 800–1500 МПа и при температуре 650–800 °С.

3. Стали высокой теплостойкости. Такие стали содержат много карбидов W, Mo, V, Co (8–15 %) и имеют карбидное или интерметаллидное упрочнение. В структуре можно выделить *карбиды* или *карбиды* и *интерметаллиды*. К этой группе относят стали 206A8I 2E8, 3O10A7I 2E10, 3O2A8O, 5O3A3O1 N.

Фазовый состав сталей и их свойства зависят от количества углерода и суммарного количества Mo и W, они устойчивы к перегреву, характеризуются высокой теплостойкостью и разгаростойкостью. При большом содержании W и Mo понижается теплостойкость, ударная вязкость и разгаростойкость.

Теплостойкость сталей достигает 700–750 °С за счет выделения *интерметаллидов* $(\text{Fe, Co})_2\text{W}$, $(\text{Fe, Co})_7\text{W}_6$.

Термическая обработка предусматривает *закалку* от 1130–1200 °С и *отпуск* при 600–700 °С, после чего сталь 503A3I будет иметь следующие свойства: 45–47 HRC, $\text{KCU} = 0,2 \div 0,3 \text{ Дж/см}^2$ при 20 °С и $\text{KCU} = 0,3 \div 0,4 \text{ Дж/см}^2$ при 600 °С, $\sigma_{\lambda} = 1700 \div 1800 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_{0,2} = 1450 \div 1500 \text{ Н/мм}^2$, $\psi = 35 \div 49 \%$.

Такие стали применяют для изготовления тяжело нагруженных инструментов, прессов и горизонтально-ковочных машин, пуансонов для горячего прессования.

Штамповые стали высокой износостойкости, легированные *молибденом* и *ванадием*, упрочняются путем дисперсионного твердения. Для обработки на вторичную твердость применяют более высокие температуры *аустенитизации*: 1110–1140 °С для стали Ö12Ö и 1120–1130 °С для стали Ö12Ì . При этом в большей степени растворяются избыточные *карбиды*, растет легированность *аустенита*. Высокая твердость стали (60–62 HRC) достигается посредством *трех- или четырехкратного отпуска при 490–530 °С* благодаря выделению высокодисперсных карбидов и образованию *мартенсита* из *остаточного аустенита* при охлаждении. Также повышается и теплостойкость стали, однако снижается прочность и ударная вязкость вследствие роста *аустенитного зерна*.

8. МИНЕРАЛОКЕРАМИКА

Минералокерамика изготавливается из недефицитного сырья. Основным компонентом, из которого состоит минералокерамика, является электроплавленная при температуре 1500–1700 °С окись алюминия Al_2O_3 (электрокорунд) с небольшими добавками окиси магния. Окись магния препятствует росту кристаллов и является связкой. Размер зерна электрокорунда составляет 1–2 мкм.

Основной особенностью режущей керамики является отсутствие связующей фазы, что значительно снижает степень её разупрочнения при нагреве в процессе изнашивания, повышает пластическую прочность, что и предопределяет возможность применения высоких скоростей резания, намного превосходящих скорости резания инструментом из твердого сплава. Если предельный уровень скоростей резания для твердосплавного инструмента при точении сталей с тонкими срезами и малыми критериями затупления составляет 500–600 м/мин, то для инструмента, оснащенного режущей керамикой, этот уровень увеличивается до 900–1000 м/мин.

Минералокерамика изготавливается в виде непористых многогранных пластинок, которые припаивают, приклеивают или

крепят механически. Из-за низкой прочности при теплосменах напайку пластины выдерживают плохо и необходимо применять специальные меры.

Промышленность выпускает четыре группы режущей керамики:

- 1) оксидную (белая керамика) на основе Al_2O_3 ;
- 2) оксикарбидную (черная керамика, кермет) на основе композиции $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiC}$;
- 3) оксиднитридную (кортинит) на основе $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiN}$;
- 4) нитридную керамику (силинит) на основе Si_3N_4 .

Оксидная: ÒÏ 332, состав: Al_2O_3 — 99 %, MgO — 1 %;

ÂÎ -13, состав: Al_2O_3 — 99 %.

Оксикарбидная: Â-3, состав: Al_2O_3 — 60 %, TiC — 40 % ;

ÂÎ Ê-63, состав: Al_2O_3 — 60 %, TiC — 40 %;

ÂÎ Ê-71, состав: Al_2O_3 — 60 %, TiC — 40 %.

Оксинитридная: ОНТ-20 (кортинит), состав: $\text{Al}_2\text{O}_3 > 60$ %, TiN — 30 %.

Нитридная: РК-30 (силинит), состав: Si_3N_4 , Y_2O_3 , TiC .

По теплостойкости минералокерамика превосходит все инструментальные материалы, кроме алмазов, имеет вдвое меньший коэффициент трения, чем твердые сплавы.

Недостаток оксидной керамики — её относительно высокая чувствительность к резким температурным колебаниям (тепловым ударами). Поэтому охлаждение при резании керамикой не применяют.

Указанное является главной причиной микро- или макрорывчатости режущей керамики и контактных площадок инструмента уже на стадиях приработочного или начального этапа установившегося изнашивания, приводящего к отказам из-за хрупкого разрушения инструмента. Отмеченный механизм изнашивания керамического режущего инструмента является преобладающим.

В последние годы появились новые марки оксидной керамики, в состав которых введены окись циркония (ZrO_2) и армирование её «нитевидными» кристаллами карбида кремния (SiC). Армиро-

ванная керамика имеет высокую твердость (HRCА - 92) и повышенную прочность ($\sigma_{\text{сж}} \hat{=} 1000 \text{ Н/мм}^2$).

Для повышения прочности керамики в нее дополнительно вводят металлы (молибден, вольфрам, титан) или карбиды хрома, титана, вольфрама, молибдена. Это повышает предел прочности до 450–700 МПа, но немного снижает температуру теплостойкости ($t = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$) и износостойкость. Керамика с металлами называется **керамид**, с добавками карбидов — **карбиδο-оксидная керамика**. Наиболее распространенные марки $\hat{A} \hat{E}$ -60, $\hat{A} \hat{E}$ -63 (черного цвета). Предел прочности на изгиб этой керамики 600–750 МПа. Оксидно-карбидную керамику получают методом горячего прессования в графитовых формах.

Инструменты с минералокерамикой используют для чистовой и черновой обработки закаленных сталей, высокопрочного чугуна, белого чугуна. Они позволяют снимать припуски до 4 мм, но очень плохо работают в условиях действия ударов. Стойкость минералокерамики выше при обработке хрупких материалов, чем при обработке вязких. Для минералокерамики существует нижняя граница скорости резания (100 м/мин), при более низких скоростях происходит хрупкое выкрашивание пластины.

Параллельно с совершенствованием керамических материалов на основе оксида алюминия созданы новые марки режущей керамики на основе нитрида кремния (силинит-Р). Такой керамический материал имеет высокую прочность на изгиб ($\sigma_{\text{сж}} = 800 \text{ Н/мм}^2$), низкий коэффициент термического расширения, что выгодно отличает его от оксидных керамических материалов. Это позволяет с успехом использовать нитридокремниевый инструмент при черновом точении, полустачковом фрезеровании чугуна, а также чистовом точении сложнoleгированных и термообработанных (до HRC 60) сталей и сплавов.

9. АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Большое место в современном производстве деталей машин занимают процессы шлифования, при которых используются раз-

личные абразивные инструменты. Режущими элементами этих инструментов служат твердые и теплоустойчивые зерна абразивного материала с острыми кромками.

Абразивные материалы подразделяются на естественные и искусственные. К естественным абразивным материалам относятся такие минералы, как *кварц, наждак, корунд* и др. Естественные абразивные материалы отличаются большой неоднородностью, наличием посторонних примесей, поэтому по качеству абразивных свойств они не удовлетворяют растущие потребности промышленности.

В настоящее время обработка **искусственными абразивными** материалами занимает ведущее место в машиностроении.

Наиболее распространенными искусственными абразивными материалами являются *электрокорунды, карбиды кремния и бора*.

Электрокорунд получают методом плавки в дуговых электропечах при температуре 2000–2050 °С из материалов, богатых окисью алюминия (бокситы, глинозем). Электрокорунд — весьма твердый, плотный и термостойкий материал. В зависимости от процентного содержания Al_2O_3 он бывает нормальный, белый, легированный и монокорунд.

Электрокорунд нормальный содержит до 95 % Al_2O_3 . Выпускают его марок 12А, 13А, 14А, 15А и 16А. Применяют электрокорунд нормальный для менее ответственных кругов при шлифовании сталей, чугунов и твердых бронз.

Электрокорунд белый содержит более 97 % Al_2O_3 . Выпускают его марок 22А, 23А, 24А и 25А. Имеет белый, серовато-белый или светло-розовый цвет. Электрокорунд белый более твердый, чем электрокорунд нормальный. Применяют электрокорунд белый для резьбошлифовальных, заточных кругов, выполняющих более точные работы, бруски к хонинговальным и суперфинишным головкам.

Легированный электрокорунд бывает хромистый, титанистый и циркониевый. Электрокорунд хромистый (технический рубин) получают из глинозема с добавкой от 0,4 до 2 % Cr_2O_3 . По сравнению с электрокорундом белым зерна хромистого электрокорунда более стабильны по физико-механическим свойствам, более

твердые. Выпускают марки 32А, 33А и 34А. Электрокорунд титанистый (технический сапфир) получают плавкой глинозема с добавкой 2–3 % окиси титана. Его зерна имеют повышенную режущую способность, он тверже хромистого электрокорунда. Выпускается марка 37А. Электрокорунд циркониевый получают из глинозема, двуокиси циркония (10–40 %) и окислов титана. Циркониевый электрокорунд более твердый (21 ГПа) и износостойкий, чем титанистый электрокорунд. Выпускается марка 38А.

Монокорунд — одна из разновидностей электрокорунда, зерна которого имеют форму правильных кристаллов малых размеров или их осколков. Его особенность — наличие большого числа граней, а значит, режущих кромок зерна. Применяется монокорунд для скоростных и заточных кругов, а также для микропорошков. Выпускаются марки 43А, 44А и 45А.

Карбид кремния (SiC) получают в электропечах при температуре 1800–1850 °С из материалов, богатых кремнеземом и материалов с высоким содержанием углерода. Карбид кремния обладает большей твердостью (32–35 ГПа) и хрупкостью, чем электрокорунд, имеет более острые режущие кромки. Карбид кремния делится на черный и зеленый. Карбид кремния черный обозначается маркой 5С, содержит 95–98 % SiC и имеет черный или темно-синий цвет. Выпускаются марки 52С, 53С, 54С и 55С. Применяется карбид кремния черный для заточки инструментов, шлифования твердых сплавов и хрупких материалов. Карбид кремния зеленый выпускается марок 62С, 63С, 64С. По твердости и остроте режущих кромок карбид кремния зеленый превосходит карбид кремния черный. Карбид кремния зеленый применяют для заточки быстрорежущих и твердосплавных инструментов и правки шлифовальных кругов.

Карбид бора (B_4C) получают при плавке борной кислоты B_2O_3 и нефтяного кокса в электропечах. Он имеет серовато-черный цвет, содержит до 93 % B_4C и 1,5 % свободного углерода. Карбид бора значительно тверже (39–44 ГПа) карбида кремния, но термостойкость ниже. Поэтому применяется в виде микропорошков или паст для доводки твердосплавных инструментов.

10. АЛМАЗЫ И СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Алмаз как инструментальный материал получил в последние годы широкое применение в машиностроении.

В настоящее время выпускается большое количество различного инструмента с использованием алмазов: шлифовальные круги, инструменты для правки шлифовальных кругов из электрокорунда и карбида кремния, пасты и порошки для доводочных и притирочных операций. Значительные по размерам кристаллы алмазов применяются для изготовления алмазных резцов, фрез, сверл и других режущих инструментов.

Алмаз представляет собой одну из модификаций углерода кристаллического строения. Алмаз — самый твердый из всех известных в природе минералов. Твердость алмаза выше твердости карбида бора в 2,3 раза, карбида кремния — в 3 раза. Высокая твердость алмаза объясняется своеобразием его кристаллического строения, прочностью связей атомов углерода в кристаллической решетке, расположенных на равных и очень малых расстояниях друг от друга. Однако прочность алмаза невелика и он легко раскалывается по плоскостям спайности. Поэтому алмаз используется для обработки при относительно малых нагрузках.

Коэффициент теплопроводности алмаза в два и более раза выше, чем у сплава ВК8, поэтому тепло от зоны резания отводится сравнительно быстро.

Алмаз имеет весьма низкий коэффициент линейного расширения и высокий модуль упругости. Следовательно, инструменты с кристаллами алмаза имеют малые деформации, в результате можно получать детали высокой точности и поддерживать эту точность в течение длительного времени. Теплостойкость алмаза характеризуется тем, что при температуре около 800 °С в обычных условиях он начинает превращаться в графит. Вместе с тем алмаз обладает наиболее высокой абразивной способностью по сравнению с другими абразивными материалами. Так, при заточке и доводке твердого сплава расход алмаза в 100–400 раз меньше, чем при обработке карбидом кремния.

В настоящее время освоено промышленное производство синтетических алмазов из графита при больших давлениях и высоких температурах.

Синтетические алмазы могут быть различных марок, которые отличаются между собой по прочности, хрупкости, удельной поверхности и форме зерен.

Зернистость алмазных шлифовальных порошков, контролируемая ситовым методом, колеблется от 630 до 40 мкм, а зернистость микропорошков, определяемая под микроскопом, колеблется от 60 до 1 мкм.

Наряду с совершенствованием способов получения синтетических алмазов ведутся исследования по разработке других искусственных сверхтвердых материалов. Одним из таких материалов является кубический нитрид бора (КНБ) — *эльбор*, или *боразон*, который имеет кристаллическую решетку, аналогичную решетке алмаза, и состоит из двух элементов — бора и азота. Синтезируется боразон в виде кристаллов размером до 600 мкм. Он не имеет природного двойника.

Боразон имеет твердость, близкую к твердости алмаза, такую же прочность и большую теплостойкость и не теряет режущих свойств при нагреве до 1500–1600 °С. Он рекомендуется для изготовления абразивных инструментов, предназначенных для шлифования труднообрабатываемых сталей, особенно быстрорежущих сталей нормальной и повышенной производительности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите, какие основные требования предъявляются к инструментальным материалам.
2. Перечислите основные группы инструментальных материалов.
3. Определите теплостойкость различных групп инструментальных материалов.
4. Назовите физико-механические свойства, состав и области применения углеродистых и легированных инструментальных сталей.
5. Назовите химический состав, физико-механические свойства и области применения быстрорежущих сталей.
6. Перечислите, на какие группы по химическому составу делятся твердые сплавы.
7. Назовите области рационального использования каждой группы твердых сплавов.
8. Назовите преимущества и недостатки режущей керамики и области её рационального применения.
9. Определите, по каким характеристикам отличаются естественные и искусственные сверхтвердые материалы на основе алмаза.
10. Укажите, по каким свойствам кубический нитрид бора превосходит алмаз.
11. Объясните, какие инструментальные материалы предпочтительно выбирать при обработке сталей? чугунов? цветных металлов? при черновой обработке? при чистовой обработке?
12. Определите, какие инструментальные материалы могут использоваться при обработке высокопрочных материалов? в закаленном состоянии?
13. Назовите области применения крупнозернистых и мелкозернистых твердых сплавов.
14. Укажите, как изменяются износостойкость и прочность твердого сплава в зависимости от увеличения индекса подгруппы применения по ИСО513.
15. Перечислите требования, предъявляемые к свойствам износостойких покрытий для режущего инструмента.
16. Назовите методы нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент.
17. Назовите области эффективного и малоэффективного применения покрытий на режущем инструменте.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Богодухов С.И.* Курс материаловедения в вопросах и ответах : учебное пособие / С.И. Богодухов, А.В. Синюхин, Е.С. Козик. Москва, Машиностроение, 2014, 352 с. URL: <http://e.lanbook.com/book/63212>.
2. *Сапунов С.В.* Материаловедение : учебное пособие. Санкт-Петербург, Лань, 2015, 208 с. URL: <http://e.lanbook.com/book/56171>.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ МАТЕРИАЛАМ	4
2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	10
3. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ	13
3.1. СТАЛИ ДЛЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА	13
3.1.1. Углеродистые инструментальные стали (стали пониженной прокаливаемости)	13
3.1.2. Инструментальные легированные стали (стали повышенной прокаливаемости)	17
3.1.3. Влияние легирующих элементов на свойства инструментальных сталей	19
3.2. БЫСТРОРЕЖУЩИЕ СТАЛИ	21
3.2.1. Классификация быстрорежущих сталей по теплоемкости	26
3.2.2. Классификация быстрорежущих сталей по шлифуемости	30
3.2.3. Порошковые быстрорежущие стали	31
3.3. КАРБИДОСТАЛИ	32

4. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ	33
4.1. ВОЛЬФРАМОКОБАЛЬТОВЫЕ СПЛАВЫ (ВК)	34
4.2. ТИТАНОВОВОЛЬФРАМОВОКОБАЛЬТОВЫЕ СПЛАВЫ (ТК)	36
4.3. ТИТАНОТАНТАЛОВОЛЬФРАМОКОБАЛЬТОВЫЕ СПЛАВЫ (ТТК)	38
4.4. БЕЗВОЛЬФРАМОВЫЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ (БВТС)	39
4.5. КРАТКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ	40
5. СТАЛИ ДЛЯ УДАРНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ	42
6. СТАЛИ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА	43
7. ШТАМПОВЫЕ СТАЛИ	44
7.1. ШТАМПОВЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ	44
7.2. ШТАМПОВЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ	47
8. МИНЕРАЛОКЕРАМИКА	50
9. АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	52
10. АЛМАЗЫ И СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ	55
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	57
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	58

Наталья Сергеевна Герасимова

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ
МАТЕРИАЛЫ**

Учебное пособие

Редактор *С.Н. Капранов*
Корректор *Т.В. Тимофеева*
Технический редактор *А.Л. Репкин*

Подписано в печать 27.02.2017.
Формат 60×84/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Печ. л. 3,75. Усл. п. л. 3,49. Тираж 50 экз. Заказ № 24

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Изготовлено в редакционно-издательском отделе
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57–31–87