

## Тема: ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ

1. Углеродистые и легированные инструментальные стали
2. Быстрорежущие стали
3. Стали для измерительных инструментов
4. Штамповые стали
5. Твердые сплавы
6. Алмаз как материал для изготовления инструментов

### 1. УГЛЕРОДИСТЫЕ И ЛЕГИРОВАННЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Инструментальная сталь должна обладать высокой твердостью, износостойкостью, достаточной прочностью и вязкостью (для инструментов ударного действия).

Режущие кромки могут нагреваться до температуры 500...900 °С, поэтому важным свойством является теплостойкость, т.е., способность сохранять высокую твердость и режущую способность при продолжительном нагреве (красностойкость).

Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1435-90).

Углеродистые инструментальные стали содержат 0,65...1,35% углерода.

Стали инструментальные нелегированные, делят на качественные, обозначаемые буквой «У» и цифрой, указывающей среднее содержание углерода (например, У7; У8; У10) и высококачественные, обозначаемые дополнительной буквой «А» в конце наименования (например, У8А; У10А; У12А) или дополнительной буквой Г, указывающей на дополнительное увеличение содержания марганца (например, У8ГА).

Стали У7...У13А – обладают высокой твердостью, хорошо шлифуются, дешевы и недефицитны.

Из сталей марок У7, У8А изготавливают инструмент для работы по дереву и инструмент ударного действия, когда требуется повышенная вязкость – пуансоны, зубила, штампы, молотки.

Стали марок У9...У12 обладают более высокой твердостью и износостойкостью – используются для изготовления сверл, метчиков, фрез.

Сталь У13 обладает максимальной твердостью, используется для изготовления напильников, граверного инструмента.

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.

Окончательная термическая обработка – закалка с последующим отпуском.

Закалку для доэвтектоидных сталей проводят полную, а для заэвтектоидных – неполную. Структура закаленных сталей или мартенсит, или мартенсит и карбиды.

Температура отпуска выбирается в зависимости от твердости, необходимой для инструмента.

Для инструментов ударного действия, требующих повышенной вязкости, из сталей У7, У8 отпуск проводят при температуре 280...300 °С, что обеспечивает твердость HRC56...58.

Для напильников, метчиков, плашек отпуск проводят при температуре 150...200 °С, при этом обеспечивается получение максимальной твердости — HRC62...64.

Основными недостатками углеродистых инструментальных сталей является их невысокая прокаливаемость (5...10 мм), низкая теплостойкость (до 200 °С), то есть инструменты могут работать только при невысоких скоростях резания.

### Легированные инструментальные стали

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

Стали инструментальные легированные, обозначаются также как и конструкционные легированные. Возьмем такую марку как ХВГ, расшифровка этой марки показывает наличие в ней основных легирующих элементов: Хрома, Вольфрама, Марганца. Эта сталь отличается от 9ХВГ, повышенным содержанием в ней углерода, примерно 1%, поэтому цифра в начале марки не ставится.

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

Термическая обработка включает закалку и отпуск.

Проводят закалку с температуры 800...850 °С в масле или ступенчатую закалку, что уменьшает возможность коробления и образования закалочных трещин.

Отпуск проводят низкотемпературный, при температуре 150...200 °С, что обеспечивает твердость HRC61...66. Иногда, для увеличения вязкости, температуру отпуска увеличивают до 300 °С, но при этом наблюдается снижение твердости HRC55...60.

Для деревообрабатывающего инструмента из сталей 6ХС и 9ХФ рекомендуется изотермическая закалка, значительно улучшающая вязкость.

Повышенное содержание кремния (сталь 9ХС) способствует увеличению прокаливаемости до 40 мм и повышению устойчивости мартенсита при отпуске.

Недостатками сталей, содержащих кремний, являются чувствительность их к обезуглероживанию при термообработке, плохая обрабатываемость резанием и деформированием из-за упрочнения феррита кремнием.

Повышенное содержание марганца (стали ХВГ, 9ХВСГ) способствует увеличению количества остаточного аустенита, что уменьшает деформацию инструмента при закалке. Это особенно важно для инструмента, имеющего большую длину при малом диаметре, например, протяжек.

Хром увеличивает прокаливаемость и твердость после закалки.

Стали используются для изготовления инструмента и ударного, и режущего.

“Алмазная ” сталь ХВ5 содержит 5% вольфрама. Благодаря присутствию вольфрама, в термически обработанном состоянии имеет избыточную мелкодисперсную карбидную фазу. Твердость составляет HRC65...67. Сталь используется для изготовления инструмента, сохраняющего длительное время острую режущую кромку и высокую размерную точность (развертки, фасонные резцы, граверный инструмент).

## 2. БЫСТРОРЕЖУЩИЕ СТАЛИ

Стали получили свое название за свойства. В следствии высокой теплостойкости (550...650 °С), изготовленные из них инструменты могут работать с достаточно высокими скоростями резания.

Стали содержат 0,7...1,5% углерода, до 18% основного легирующего элемента – вольфрама, до 5% хрома и молибдена, до 10% кобальта.

Добавление ванадия повышает износостойкость инструмента, но ухудшает шлифуемость. Кобальт повышает теплостойкость до 650 °С и вторичную твердость HRC67...70.

Стали быстрорежущие расшифровываются следующим образом - такие марки имеют букву Р (с этого начинается обозначение стали), затем следует цифра, указывающая среднее содержание вольфрама (например, Р18; Р9), затем следуют буквы и цифры, определяющие массовое содержание элементов. (например, сталь Р6М5) цифра 5 показывает долю молибдена в этой марке. Содержание хрома не указывают, т.к. оно составляет стабильно около 4% во всех быстрорежущих сталях и углерода, т.к. последнее всегда пропорционально содержанию ванадия. Следует заметить, что если содержание ванадия превышает 2,5%, буква Ф и цифра указывается (например, стали Р6М5Ф3).

Микроструктура быстрорежущей стали в литом состоянии имеет эвтектическую структурную составляющую.

Для получения оптимальных свойств инструментов из быстрорежущей стали необходимо по возможности 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.

Затем проводят отжиг стали при температуре 860...900 °С. Структура отожженной быстрорежущей стали – мелкозернистый (сорбитообразный) перлит и карбиды, мелкие эвтектоидные и более крупные первичные. Количество карбидов около 25%. Сталь с такой структурой хорошо обрабатывается резанием. Подавляющее количество легирующих элементов находятся в карбидной фазе.

Для получения оптимальных свойств стали в готовом инструменте необходимо при термической обработке обеспечить максимальное насыщение мартенсита легирующими элементами. При закалке быстрорежущие стали требуют нагрева до очень высоких температур, около 1280 °С. Нагрев осуществляют в хорошо раскисленных соляных ваннах  $VaCl_2$ , что улучшает равномерность прогрева и снижает возможность обезуглероживания поверхности. Для снижения термических

фазовых напряжений нагрев осуществляют ступенчато: замедляют нагрев при температурах 600...650 °С и при 850...900 °С. График режима термической обработки быстрорежущей стали представлен на рис. 1.

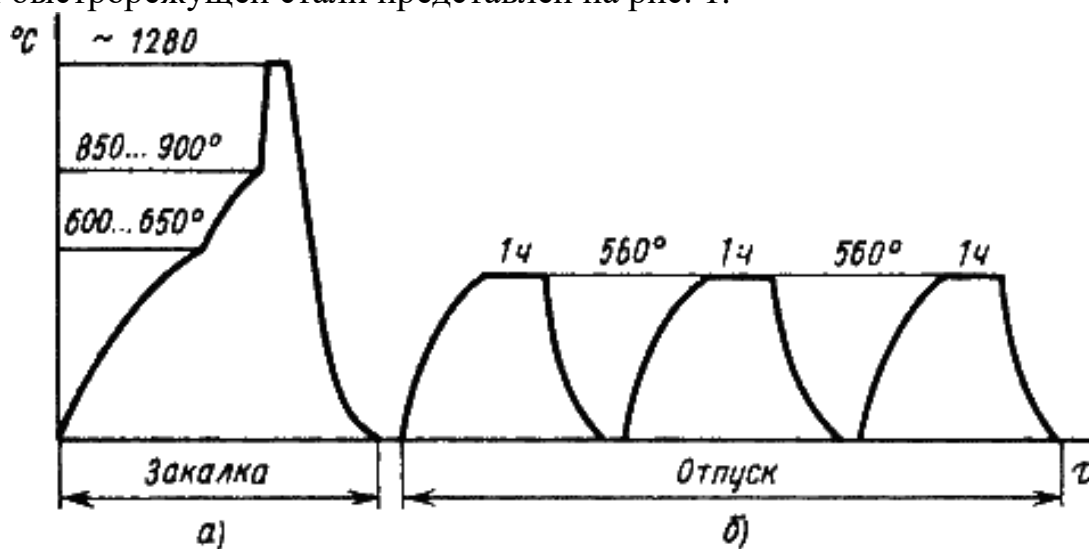


Рисунок 1. - График режима термической обработки быстрорежущей стали

Охлаждение от закалочной температуры производится в масле. Структура стали после закалки состоит из легированного, очень тонкодисперсного мартенсита, значительного количества (30...40%) остаточного аустенита и карбидов вольфрама. Твердость составляет 60...62HRC. Наличие аустенита остаточного в структуре закаленной стали ухудшает режущие свойства.

Для максимального удаления аустенита остаточного проводят трехкратный отпуск при температуре 560 °С. При нагреве под отпуск выше 400 °С наблюдается увеличение твердости. Это объясняется тем, что из легированного остаточного аустенита выделяются легированные карбиды. Аустенит при охлаждении от температуры отпуска превращается в мартенсит отпуска, что вызывает прирост твердости. Увеличению твердости содействуют и выделившиеся при температуре отпуска мелкодисперсные карбиды легирующих элементов. Максимальная твердость достигается при температуре отпуска 560 °С.

После однократного отпуска количество аустенита остаточного снижается до 10%. Чтобы уменьшить его количество до минимума, необходим трехкратный отпуск.

Твердость стали после отпуска составляет 64...65HRC. Структура стали после термообработки состоит из мартенсита отпуска и карбидов.

При термической обработке быстрорежущих сталей применяют обработку холодом. После закалки сталь охлаждают до очень низкой температуры:

–80 ... –100 °С,

после этого проводят однократный отпуск при температуре 560 °С для снятия напряжений.

Иногда для повышения износостойкости быстрорежущих сталей применяют низкотемпературное цианирование.

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.

### 3. СТАЛИ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Основными требованиями, предъявляемыми к сталям, из которых изготавливаются измерительные инструменты, являются высокая твердость и износостойчивость, стабильность в размерах в течение длительного времени. Последнее требование обеспечивается минимальным температурным коэффициентом линейного расширения и сведением к минимуму структурных превращений во времени.

Для изготовления измерительных инструментов применяются:

- высокоуглеродистые инструментальные стали, легированные и углеродистые (стали У12, Х, Х9, ХГ) – после закалки и стабилизирующего низкотемпературного (120...170 °С) отпуска в течение 10...30 ч. До отпуска желательно провести обработку холодом. Получают твердость 62...67HRC;
- малоуглеродистые стали (сталь 15, 20) – после цементации и закалки с низким отпуском;
- сплав «нитралой» (сталь 38ХМЮА) – после азотирования на высокую твердость.

### 4. ШТАМПОВЫЕ СТАЛИ

Инструмент, применяемый для обработки металлов давлением (штампы, пуансоны, матрицы) изготавливают из штамповых сталей. Различают стали для штампов холодного и горячего деформирования.

#### Стали для штампов холодного деформирования

Стали должны обладать высокой твердостью, износостойкостью, прочностью, вязкостью (чтобы воспринимать ударные нагрузки), сопротивлением пластическим деформациям.

Для штампов небольших размеров (до 25 мм) используют углеродистые инструментальные стали У10, У11, У12 после закалки и низкого отпуска на твердость 57...59HRC. Это позволяет получить хорошую износостойкость и ударную вязкость.

Для более крупных изделий применяют легированные стали Х, Х9, Х6ВФ. Для повышения износостойкости инструмента после термической обработки проводят цианирование или хромирование рабочих поверхностей.

Для уменьшения брака при закалке необходимо медленное охлаждение в области температур мартенситного превращения (например, закалка из воды в масло для углеродистых сталей, ступенчатая закалка для легированных сталей).

Если штамповый инструмент испытывает ударные нагрузки, то используют стали, обладающие большей вязкостью (стали 4ХС4, 5ХНМ). Это достигается снижением содержания углерода, введением легирующих элементов и соответствующей термической обработкой. После закалки проводят высокий отпуск при температуре 480...580 °С, что обеспечивает твердость 38...45HRC.

## Стали для штампов горячего деформирования

Дополнительно к общим требованиям, от сталей этой группы требуется устойчивость против образования трещин при многократном нагреве и охлаждении, окалиностойкость, высокая теплопроводность для отвода теплоты от рабочих поверхностей штампа, высокая прокаливаемость для обеспечения высокой прочности по всему сечению инструмента.

Для изготовления молотовых штампов применяют хромоникелевые среднеуглеродистые стали 5ХНМ, 5ХНВ, 4ХСМФ. Вольфрам и молибден добавляют для снижения склонности к отпускной хрупкости. После термической обработки, включающей закалку с температуры 760...820 °С и отпуск при 460...540°С, сталь имеет структуру – сорбит или троостит и сорбит отпуска. Твердость 40...45HRC.

Штампы горячего прессования работают в более тяжелых условиях. Для их изготовления применяются стали повышенной теплостойкости. Сталь 3Х2В8Ф сохраняет теплостойкость до 650 °С, но наличие карбидов вольфрама снижает вязкость. Сталь 4Х5В2ФС имеет высокую вязкость. Повышенное содержание хрома и кремния значительно увеличивает окалиностойкость стали.

## 5. ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ

Твёрдые сплавы являются основным инструментальным материалом, обеспечивающим высокопроизводительную обработку материалов резанием.

Общее количество режущего инструмента из твердого сплава не превышает 25%, но из-за высокой скорости резания (в 2,5...3 раза выше по сравнению с быстрорежущим инструментом) они снимают до 65% всей стружки (из всего объёма стружки, снимаемой инструментами из всех имеющих инструментальных материалов).

Стандартные твердые сплавы состоят из тугоплавких соединений (карбидов вольфрама W, титана Ti и тантала Ta) и связующей фазы (кобальт Co). Они изготавливаются методами порошковой металлургии.

Характерной особенностью твердых сплавов является очень высокая твердость 87...92HRC при достаточно высокой прочности. Твердость и прочность зависят от количества связующей фазы (кобальта) и величины зерен карбидов. Чем крупнее зерна карбидов, тем выше прочность. Твердые сплавы отличаются большой износостойкостью и теплостойкостью. Они подразделяются на три основные группы:

1. ВК (WC + Co) - однокарбидные (вольфрамовые);
2. ТК (WC + TiC + Co) - двухкарбидные (вольфрамотитановые);
3. ТТК (WC + TiC + TaC + Co) - трёхкарбидные (вольфрамотитанотанталовые).

Обозначение твердых сплавов включает буквы, характеризующие карбидообразующие элементы (В-вольфрам, Т-титан, вторая буква Т-тантал) и связку (К-кобальт). Цифра после буквы К обозначает массовую долю связки в процентах.

Массовая доля карбидообразующих элементов в однокарбидных сплавах, содержащих только карбид вольфрама, определяется разностью между 100% и массовой долей связки. Например, сплав ВК4 содержит 4% кобальта и 96% WC.

В двухкарбидных WC+TiC сплавах цифра после буквы карбидообразующего элемента обозначает массовую долю карбида этого элемента (TiC), а массовая доля карбида второго элемента (WC) определяется разницей между 100% и массовыми долями связки и карбида первого элемента (например, сплав Т5К10 содержит 5% TiC, 10% Co и 85% WC).

В трехкарбидных WC+TiC+TaC сплавах цифра после букв ТТ означает массовую долю карбидов титана и тантала. Массовая доля карбида вольфрама определяется разницей между 100% и массовыми долями связки и карбидов TiC и TaC. Например, сплав ТТ7К12 содержит 12% Co, 7% карбидов титана и тантала (TiC+TaC) и 81% WC.

Различие в свойствах сплавов ТК и ВК определяет существенная разница свойств карбидов на основе титана и вольфрама. Твердость карбидов TiC заметно выше, чем WC (3200 и 1780 HV соответственно). Модуль упругости, напротив, значительно выше у карбида вольфрама (710 ГПа для WC и 460 ГПа для TiC).

Механические свойства сплавов ТК зависят от содержания карбида титана и кобальта. Чем больше в сплаве карбида титана, тем выше его твердость, прочность при этом снижается. Влияние кобальта такое же, как и в сплавах ВК, — увеличение его содержания повышает прочность и снижает твердость сплава (рис. 2).

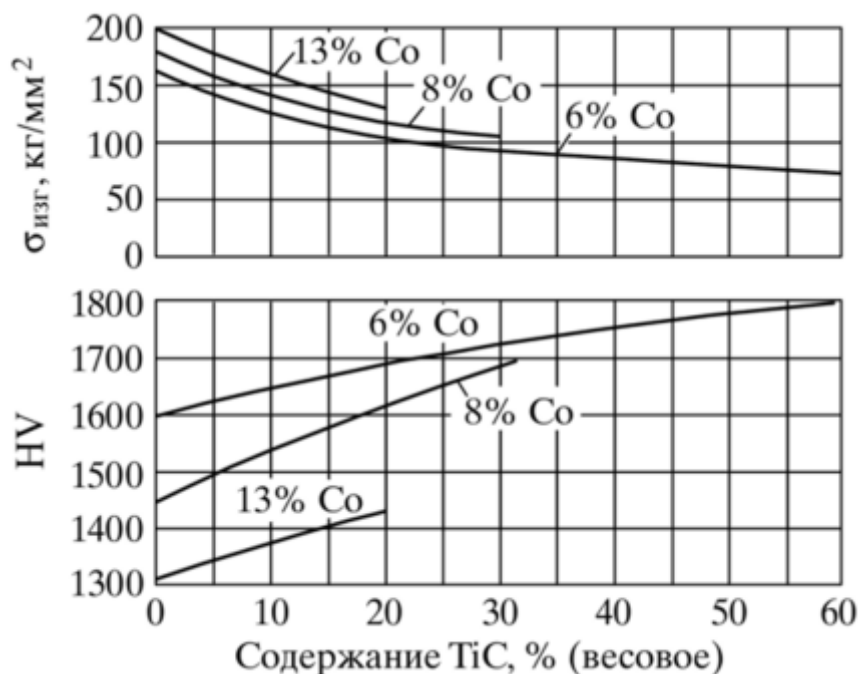


Рисунок 2. - Влияние содержания TiC и Co на твердость и предел прочности сплавов ТК

Более сложное влияние размера карбидов. Наименьшую прочность имеют сплавы с крупнозернистой титановой фазой и мелкозернистой вольфрамовой. При постоянном размере зерен карбида титана прочность возрастает с увеличением размера зерен карбида вольфрама.

Высокая твердость сплавов ТК сохраняется до 950-1000 °С. При этих температурах их твердость такая же, как у быстрорежущих сталей при 20 °С (рис. 3).

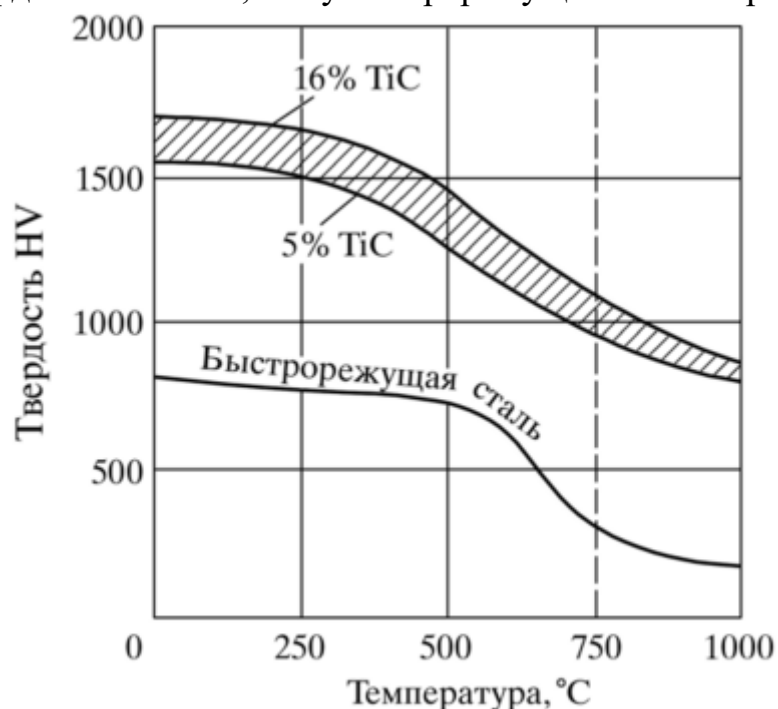


Рисунок 3. - Горячая твердость сплавов ТК и быстрорежущей стали

Наиболее распространенными сплавами группы ВК являются сплавы марок ВК3, ВК6, ВК8, ВК20, где число показывает содержание кобальта в процентах, остальное – карбиды вольфрама WC.

Сплавы группы ТК марок Т30К6, Т14К8 – первое число показывает содержание карбидов титана в процентах, второе – содержание кобальта в процентах. Сплавы этой группы лучше противостоят изнашиванию, обладают большей твердостью, тепло- и жаростойкостью, стойкостью к коррозии, но меньшей теплопроводностью и большей хрупкостью. Используются на средних и высоких скоростях резания.

Сплавы с малым количеством кобальта обладают повышенной твердостью и износостойкостью, но минимальной прочностью, Поэтому их используют для чистового точения (ВК3, Т30К4).

Сплавы с повышенным содержанием кобальта используют для чернового точения (ВК8, Т14К8).

Сплав ВК20 начинают использовать для армирования штампов, что повышает их износостойкость.

Износостойкость инструментов из твердых сплавов превышает износостойкость инструментов из быстрорежущих сталей в 10...20 раз и сохраняется до температур 800...1000 °С.

Разница в свойствах определяет основные направления использования сплавов. Сплавы группы ВК применяются, главным образом, для обработки материалов, при резании которых образуется элементная стружка, — чугунов, а также цветных металлов, стеклопластиков и др. Это связано с возникновением динамических нагрузок, что предопределяет использование твердых сплавов с повышенной прочностью. В этих условиях заметно их преимущество перед сплавами ТК.



Мелкозернистые сплавы обладают высокой термоциклической стойкостью, поэтому их используют, в основном, для обработки труднообрабатываемых материалов (высокие температуры в зоне резания).

Сплавы группы ТК используются для обработки материалов со сливной стружкой, т.е. сталей. При обработке стали, в отличие от чугуна со стружкой надлома, инструмент находится в постоянном контакте с обрабатываемым материалом. Это определяет его большой нагрев, т.е. от инструментального материала требуется повышенная теплостойкость. В этих условиях преимущество имеют сплавы ТК, и особенно при высоких скоростях резания.

В условиях непрерывного контакта инструментального и обрабатываемого материала возникает нежелательный процесс — наростообразование за счет возникновения адгезионных связей между инструментальным и обрабатываемым материалами.

«Схватывание» стали со сплавами ТК происходит при более высоких температурах. Это позволяет выполнять обработку с более высокими скоростями. Сила адгезии в паре «сталь—ТК» значительно, примерно в 10—50 раз, ниже, чем в паре «сталь—ВК». Поэтому под воздействием сил резания при использовании инструментов из сплавов ТК наиболее вероятно удаление только нароста, слабо связанного с материалом инструмента, тогда как у инструмента из сплава ВК может происходить скалывание режущей кромки из-за более сильных адгезионных связей между обрабатываемой сталью и твердым сплавом.

## 6. АЛМАЗ КАК МАТЕРИАЛ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТОВ

80% добываемых природных алмазов и все синтетические алмазы используются в качестве инструментальных материалов.

Основное количество алмазов используется в виде алмазного порошка для изготовления алмазно-абразивного инструмента – шлифовальных кругов, притиров, хофов, надфилей и др., для обработки особо твердых металлов и горных пород.

Большое значение имеет применение алмазных заточных кругов для твердосплавного инструмента. Это увеличивает производительность труда и срок службы инструмента. Повышение стойкости твердосплавного инструмента обеспечивается высокой чистотой алмазной обработки лезвия инструмента (отсутствие зазубрин, мелких трещин).

Алмазный инструмент изготавливается в виде алмазосодержащих кругов с бакелитовой или металлической связкой.

Также изготавливают алмазные резцы (для обработки корпусов часов), фильеры (для волочения проволоки из высокотвердых и драгоценных металлов) и др.