

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

кафедра ТМСПР

С.В. Кирсанов

**Современные проблемы инструментального
обеспечения машиностроительных производств**

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в металлообработке благодаря высоким прочности, жесткости и износостойкости все большее применение находят цельные твердосплавные осевые режущие инструменты: сверла, зенкеры, развертки, концевые фрезы и др. Изготавливают эти инструменты из цилиндрических твердосплавных стержней диаметром 0,5...20 мм и более шлифованием. Материалы стержней – однокарбидные твердые сплавы с размером зерна карбида вольфрама менее 1 мкм, содержащие 6...12 % кобальтовой связки. Такие режущие инструменты способны обрабатывать металлы, закаленные до твердости *HRC* 70, осуществлять высокоскоростное резание, а также обработку без применения или с минимальным применением СОЖ (смазочно-охлаждающих жидкостей) [1].

Освоение выпуска цельных твердосплавных осевых режущих инструментов потребовало разработки новых марок твердых сплавов, а также новых технологий изготовления твердосплавных стержней и режущих инструментов из них.

1. СОВРЕМЕННЫЕ ОДНОКАРБИДНЫЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ

Однокарбидные твердые сплавы – это композиционные материалы, состоящие из зерен карбида вольфрама (WC) и связывающей их металлической фазы (Co).

Свойства твердых сплавов очень сильно зависят от размеров d_{WC} зерен WC, состава сплава, наличия легирующих элементов, пористости и технологии изготовления. Чаще всего в качестве легирующих элементов используют карбиды ванадия (VC), тантала (TaC) и титана (TiC), присутствие которых в качестве ингибиторов (замедлителей) позволяет регулировать рост зерен WC при спекании и твердость сплава [2].

В зависимости от размеров зерен WC (дисперсности) твердые сплавы делят на: а) нанодисперсные ($d_{WC} < 0,1$ мкм); б) ультрамелкодисперсные ($d_{WC} = 0,2 \dots 0,5$ мкм); в) субмикронные ($d_{WC} = 0,5 \dots 0,8$ мкм); г) мелкодисперсные ($d_{WC} = 0,8 \dots 1,3$ мкм); д) среднедисперсные ($d_{WC} = 1,3 \dots 2,5$ мкм); е) крупнодисперсные ($d_{WC} = 2,5 \dots 6,0$ мкм); ж) особокрупнодисперсные ($d_{WC} > 6,0$ мкм).

Современные марки твердых сплавов, из которых изготавливают цельные твердосплавные осевые режущие инструменты, характеризуются в большей части малым ($d_{WC} = 0,2 \dots 0,8$ мкм) размером зерна WC (табл. 1). Это объясняется тем, что с уменьшением размера зерна WC происходит существенное изменение свойств твердых сплавов: твердость и прочность увеличиваются, а вязкость разрушения* уменьшается (рис. 1, 2) [3].

* Вязкость разрушения характеризует трещиностойкость твердого сплава и определяется величиной K_{Ic} – критическим значением коэффициента интенсивности напряжений, который служит количественной оценкой сопротивления материала хрупкому разрушению от исходных дефектов при статическом нагружении.

Таблица 1

Состав и физико-механические характеристики некоторых современных марок
однокарбидных твердых сплавов, применяемых для изготовления твердосплавных стержней

| Марка сплава | Группа сплава по ISO | d_{WC} , мкм | Содержание Co, % | Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ | Твердость | | $\sigma_{и}$, МПа | Изготовитель |
|--------------|----------------------|----------------|------------------|--|-----------|------------------|--------------------|--------------------------------|
| | | | | | HRA | HV ₃₀ | | |
| A04 | | 0,7...0,8 | 9 | 14,4 | 92 | 1710 | 3900 | КЗТС (Россия) |
| A04-6 | | 0,7...0,8 | 6 | 14,85 | 93 | 1780 | 3800 | |
| UF10 | K20- K50 | 0,5...0,8 | 10 | 14,5 | 92 | 1650 | 4049 | TaeguTec (Республика Корея) |
| UF12 | K10-K30 | 0,5...0,8 | 12 | 14,1 | 92,5 | 1840 | 3622 | |
| K20 | K20 | 0,8...1,3 | 6 | 14,95 | 91,8 | 1600 | 2754 | |
| HB10 | K10 | | 6 | | 92,8 | 1700 | 2400 | Boehlerit (Австрия) |
| HB10F | K05-K15 | 0,8...1,3 | 6 | | 93,5 | 1850 | 3400 | |
| HB20F | K10-K25 | 0,8...1,3 | 7,5 | | 93,1 | 1775 | 3500 | |
| HB30F | K15-K30 | 0,8...1,3 | 10 | | 92,6 | 1675 | 3600 | |
| HB20UF | K05-K20 | 0,2...0,5 | 8 | | 93,8 | 1950 | 3300 | |
| HB44UF | K30-K40 | 0,2...0,5 | 12,0 | | 92,4 | 1725 | 3500 | |
| H10F | K20-K30 | 0,7 | 10 | 14,5 | 92,1 | 1600 | 4300 | |
| H12F | | 0,7 | 12,4 | 14,2 | 91,1 | 1480 | 4500 | |
| DM80 | | 0,5 | 8,5 | 14,6 | 93,3 | 1830 | 5000 | |
| PN90 | K01-K05 | 0,2 | 9,0 | 14,55 | 93,9 | 1950 | 4700 | |
| TSF22 | K10-K20 | 0,2...0,5 | 8,2 | 14,55 | 93,7 | 1970 | 4400 | Ceratzit (Люксембург) |
| TSF44 | K10-K30 | 0,2...0,5 | 12,0 | 14,10 | 92,7 | 1730 | 4600 | |
| MG12 | K05-K10 | 0,5...0,8 | 6,0 | 14,80 | 93,0 | 1790 | 3500 | |
| TSM10 | K05-K10 | 0,5...0,8 | 6,0 | 14,90 | 93,3 | 1850 | 3300 | |
| TSM20 | K10-K30 | 0,5...0,8 | 7,5 | 14,75 | 92,6 | 1720 | 3500 | |
| TSM33 | K20-K40 | 0,5...0,8 | 10,0 | 14,35 | 91,9 | 1590 | 3700 | |
| MG18 | K20-K40 | 0,5...0,8 | 10,0 | 14,50 | 92,3 | 1660 | 3700 | |

| Марка сплава | Группа сплава по ISO | d_{WC} , мкм | Содержание Co, % | Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ | Твердость | | $\sigma_{и}$, МПа | Изготовитель |
|---------------------|----------------------|----------------|------------------|--|-----------|------------------|--------------------|--|
| | | | | | HRA | HV ₃₀ | | |
| YU06A | K05-K10 | 0,4 | 6,0 | 14,75 | 94,7 | 2100 | 3800 | ZCC-CT (КНР) |
| YU06 | K05-K10 | 0,4 | 6,0 | 14,75 | 94,3 | 2050 | 3000 | |
| YF06 | K05-K10 | 0,5 | 6,0 | 14,90 | 93,1 | 1850 | 3800 | |
| YH6F | K05-K10 | 0,5 | 6,0 | 14,80 | 93,5 | 1900 | 4000 | |
| YU08F | K30-K20 | 0,4 | 8,0 | 14,60 | 94,0 | 1950 | 4100 | |
| YL10.2 | K20-K30 | 0,8 | 10,0 | 14,42 | 91,5 | 1600 | 4000 | |
| YL10A | K10-K20 | 0,8 | 8,0 | 14,65 | 92,8 | 1780 | 4200 | |
| YL15 | P20-P30 | 1,0 | 8,5 | 12,80 | 91,5 | 1600 | 3000 | |
| MT10 | | <0,8 | 6,0 | 14,80 | | 1790 | >3000 | |
| MT21 | | <0,8 | 10,0 | 14,45 | | 1570 | >4000 | |
| MT62 | | <0,4 | 12,0 | 14,10 | | 1720 | >4200 | |
| MT80 | | <1,5 | 6,0 | 14,90 | | 1490 | >2200 | |
| CKi [®] 06 | K05-K10 | 0,6 | 6,0 | 14,95 | 93,6 | 1850 | 3800 | <i>Gerhard Ihle Hartmetalle- Werkzeuge e.K. (Германия)</i> |
| CKi [®] 08 | K10-K20 | 0,7 | 8,0 | 14,60 | 92,7 | 1710 | 3200 | |
| CKi [®] 09 | K10-K30 | 0,2...0,5 | 9,0 | 14,40 | 93,7 | 1920 | 4000 | |
| CKi [®] 10 | K30-K40 | 0,6 | 10,0 | 14,50 | 92,1 | 1610 | 3600 | |
| CKi [®] 12 | K30-K50 | 0,5 | 12,0 | 14,10 | 92,6 | 1680 | 3800 | |
| AFK10UF | K10 | 0,6 | 6,0 | 14,8 | 93,8 | 1900 | >3500 | <i>Arno Friedrichs Hartmetalle (Германия)</i> |
| AFK20CF | K10-K20 | 0,7 | 8,0 | 14,6 | 92,5 | 1710 | >3200 | |
| AFK34EF | K20-K30 | 0,5 | 9,0 | 14,3 | 94,0 | 1930 | >3900 | |
| AFK40UF | K30-K50 | 0,6 | 10,0 | 14,5 | 91,9 | 1610 | >3600 | |
| AFK44EF | K40-K50 | 0,5 | 12,0 | 14,1 | 92,3 | 1680 | >3800 | |
| AFK45EF | K40-K50 | 0,5 | 13,0 | 13,9 | 92,4 | 1700 | >3900 | |
| DK120UF | K05 | 0,5 | 7,0 | 14,7 | 93,4 | 1850 | ≥3000 | |
| DK255F | K20 | 0,7 | 8,0 | 14,55 | 92,6 | 1720 | ≥3500 | |

| Марка сплава | Группа сплава по ISO | d_{WC} , мкм | Содержание Co, % | Плотность $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ | Твердость | | $\sigma_{и}$, МПа | Изготовитель |
|--------------|----------------------|----------------|------------------|--|-----------|------------------|--------------------|--|
| | | | | | HRA | HV ₃₀ | | |
| DK400N | K20-K40 | 0,7 | 10,0 | 14,5 | 91,7 | 1580 | ≥3200 | <i>Konrad Friedrichs</i> (Германия) |
| DK450UF | | 0,5 | 9,0 | 14,45 | | 1870 | | |
| DK460UF | K30-K40 | 0,5...0,6 | 10,0 | 14,45 | 92,0 | 1620 | ≥3700 | |
| DK470UF | K40 | 0,5 | 10,0 | 14,40 | 92,5 | 1750 | 3500 | |
| DK500UF | K40-K50 | 0,5 | 12,0 | 14,15 | 92,4 | 1660 | 3700 | |
| K40UF | K40-K50 | 0,6 | 10,0 | 14,5 | 92,3 | 1610 | >4000 | |
| K44UF | K40-K50 | 0,5 | 12,0 | 14,0 | 92,5 | 1680 | >4000 | |
| K55SF | K10-K30 | 0,2...0,5 | 9,0 | 14,4 | 93,9 | 1920 | >4000 | |
| K6UF | K05 | 0,6 | 6,0 | 14,8 | 93,6 | 1900 | >4000 | |
| EMT100 | | 0,5...0,8 | 6,0 | 14,8 | | 1790 | >3000 | |
| EMT210 | | 0,5...0,8 | 10,0 | 14,45 | | 1570 | >4000 | |
| EMT609 | | 0,2...0,5 | 9,0 | 14,4 | | 1950 | >4000 | |
| EMT612 | | 0,2...0,5 | 12,0 | 14,1 | | 1720 | >4200 | |
| KX-20 | | 0,7 | 8,0 | 14,6 | 62,0 | 1710 | >3200 | <i>Ost-Express</i> (Германия) |
| KX-40 | | 0,6 | 10,0 | 14,5 | 91,5 | 1610 | >3600 | |
| KX-44UF | | 0,5 | 12,0 | 14,1 | 91,8 | 1680 | >3800 | |
| RX8UF-NG | K10-K20 | 0,2...0,5 | 8,0 | 14,6 | 93,5 | 1900 | 4300 | <i>Hartmetall</i> <i>Carduro</i> <i>Radiamant</i> (Чехия) |
| RX12UF-NG | K10-K20 | 0,2...0,5 | 12,0 | 14,1 | 92,4 | 1680 | 4600 | |
| RX7-NG | K10-K30 | 0,5...0,8 | 7,5 | 14,7 | 92,6 | 1720 | 3600 | |
| RX10-NG | K20-K40 | 0,5...0,8 | 10,0 | 14,5 | 91,9 | 1600 | 3800 | |
| F05 | K5-K10 | 0,6 | 6,0 | 14,7 | 93,8 | 1900 | 3550 | <i>Tribo Hartmetalle</i> (Германия) |
| F10 | K20-K30 | 0,6 | 10,0 | 14,3 | 92,1 | 1610 | 4050 | |
| J30 | K20-K40 | 1,0 | 9,9 | 14,4 | 91,8 | 1540 | 4040 | |
| U08 | K10-K20 | 0,5 | 8,0 | 14,4 | 93,6 | 1880 | 4400 | |
| U12 | K20-K40 | 0,5 | 12,0 | 14,1 | 92,3 | 1630 | 4400 | |

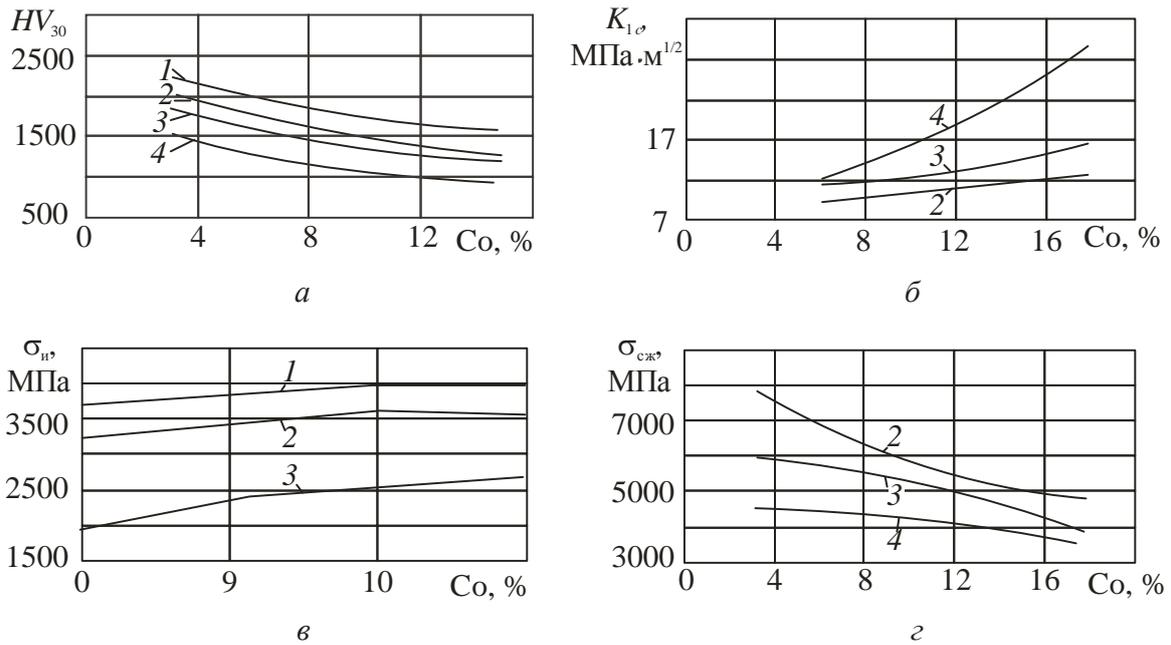


Рис. 1. Влияние размера зерна карбида вольфрама d_{WC} и содержания Со в однокарбидных твердых сплавах на: *a* – твердость HV_{30} ; *б* – коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} ; *в* – предел прочности при изгибе σ_n ; *г* – предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$ (*1* – $d_{WC}=0,2...0,5$ мкм; *2* – $d_{WC}=0,5...0,8$ мкм; *3* – $d_{WC}=0,8...1,3$ мкм; *4* – $d_{WC}=1,3...2,5$ мкм)

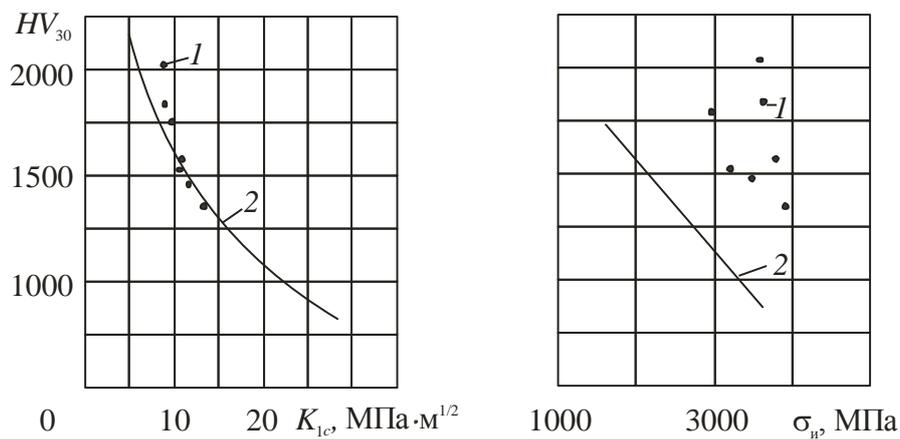


Рис. 2. Соотношения между твердостью HV_{30} , коэффициентом интенсивности напряжений K_{1c} и пределом прочности при изгибе σ_n у однокарбидных твердых сплавов:
1 – $d_{WC}=0,2...0,8$ мкм; *2* – $d_{WC}=1,3...2,5$ мкм

Долгое время считалось, что относительно низкий предел прочности при изгибе ($\sigma_{и} < 1800$ МПа) мелкозернистых ($d_{WC} < 1,0$ мкм) твердых сплавов является следствием присущей им низкой вязкости, а не наличием дефектов (крупные зерна WC, поры, включения, отложения), способных инициировать разрушение инструмента. И лишь относительно недавно было установлено, что для достижения высоких значений твердости и предела прочности при изгибе необходимо, чтобы размеры дефектов не превышали 6...12 мкм [3]. Поэтому современные субмикронные ($d_{WC} = 0,5...0,8$ мкм) и ультрамелкодисперсные ($d_{WC} = 0,2...0,5$ мкм) твердые сплавы имеют наибольший размер микропор 10 мкм, обладают очень высокими твердостью (до 2800 HV30), пределом прочности при изгибе (до 6000 МПа), износостойкостью при трении и абразивном износе, а их высокодисперсная и однородная микроструктура гарантирует малый радиус округления режущих кромок ($\rho = 3...5$ мкм) и, благодаря этому, низкую шероховатость обработанных поверхностей.

В то же время их повышенная твердость сочетается с низкой вязкостью. Такие сплавы относительно слабо сопротивляются диффузионному износу и ползучести, хотя их твердость при температурах менее 800...900 °С выше твердости обычных мелкозернистых твердых сплавов (рис. 3). Благодаря последнему качеству обеспечивается высокая стойкость режущих инструментов при обработке сталей и чугунов.

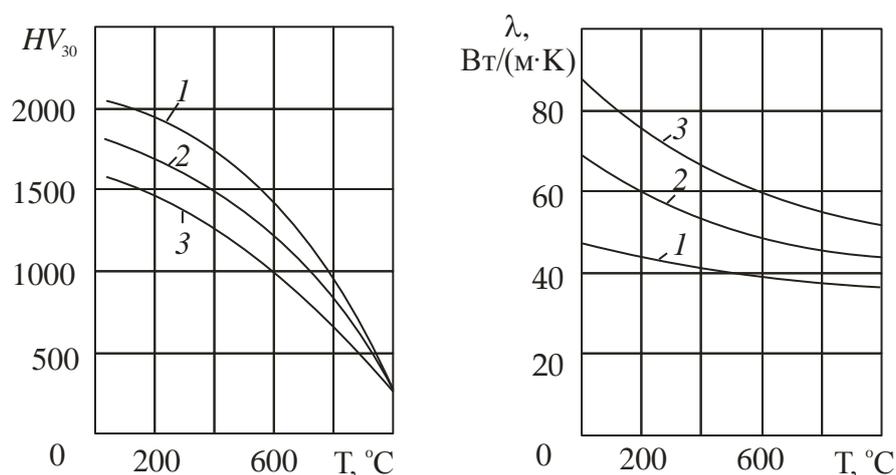


Рис. 3. Влияние размера зерна карбида вольфрама d_{WC} и температуры T на «горячую» твердость HV_{30} и коэффициент теплопроводности λ однокарбидных твердых сплавов:

1 – $d_{WC} = 0,2...0,5$ мкм; 2 – $d_{WC} = 0,5...0,8$ мкм; 3 – $d_{WC} = 0,8...1,3$ мкм

С уменьшением размера d_{WC} зерна WC уменьшается теплопроводность твердых сплавов, характеризуемая коэффициентом теплопроводности λ (рис. 3). В результате тепловая нагрузка на инструмент также уменьшается, так как большая часть теплоты, образовавшейся при резании, переходит в стружку. При этом меньшая теплопроводность вызывает и меньшее сопротивление тепловому удару. Однако уменьшение теплопроводности в этом случае компенсируется увеличением предела прочности при изгибе и поэтому не сказывается отрицательно на сопротивлении инструмента тепловому удару [3].

При общей тенденции к снижению вязкости с увеличением твердости некоторые твердые сплавы имеют лучшее сочетание твердость/вязкость. Это объясняется различиями в их составах и структурах. По этому показателю при твердости 1900...2300 HV_{30} большую вязкость имеют ультрамелкодисперсные ($d_{WC}=0,2...0,5$ мкм) твердые сплавы. При твердости <1900 HV_{30} субмикронные сплавы ($d_{WC}=0,5...0,8$ мкм) имеют еще большую вязкость. Это свойство имеет важное значение при выборе оптимальной марки твердого сплава для чистовой и черновой обработки.

2. ПОЛУЧЕНИЕ ИСХОДНЫХ ПОРОШКОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ МАРОК ОДНОКАРБИДНЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Для изготовления ультрамелкодисперсных ($d_{WC}=0,2...0,5$ мкм) и нанодисперсных ($d_{WC} < 0,1$ мкм) твердых сплавов требуются исходные порошки WC, C, WC-Co соответствующей зернистости. Их получают различными способами, но в промышленности нашли применение лишь некоторые из них [2–7]:

а) получение порошка WC путем термохимической переработки оксида вольфрама (WO_3) – быстрое карботермическое восстановление (технология *RCR – Rapid Carbothermal Reduction*)

Исходное сырье для производства – порошки оксида вольфрама WO_3 и твердого углерода C (сажа). Процесс двухстадийный, осуществляется в ламинарном газовом потоке вертикального графитового реактора (рис. 4).

После первой стадии в процессе водородного восстановительного разложения WO_3 при температуре 650 °C получается порошок карбида вольфрама с дефицитом углерода (WO_{1-x}). Поэтому необходима вторая стадия – науглероживание (карбидизация), проводимая в среде углеродосодержащего газа (окись углерода CO_2) при температуре более 650 °C.

Благодаря углеродному восстановлению при относительно высоких температурах (1800...2000 °C, выдержка 0,2...10,0 с) эта технология обеспечивает получение порошков карбидов с минимальным содержанием кислорода. При этом порошки получаются настолько тонкими (0,2...0,8 мкм), что не требуется их размол или рассев. Они характеризуются высокой степенью однородности, низкой концентрацией примесей, а также постоянным, от партии к партии, содержанием углерода.

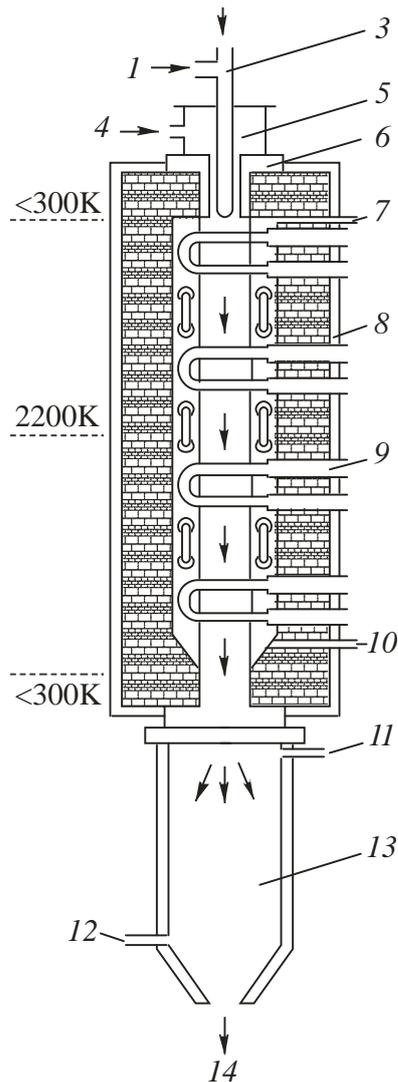


Рис. 4. Схема вертикального графитового реактора ламинарного потока:
 1 – исходный твердый материал (WO_3+C);
 2 – газ-носитель; 3 – охлаждаемая транспортная труба; 4 – оmyвающий газ;
 5 – кольцевой зазор; 6 – изолирующая втулка; 7 – выход охладителя;
 8 – теплоизоляция; 9 – нагревательный элемент; 10 – вход охладителя; 11 – выход охладителя; 12 – вход охладителя; 13 – зона охлаждения готового продукта; 14 – готовый продукт первой стадии (WC_{1-x})

б) получение порошка WC во вращающихся наклонных барабанных печах

Компоненты исходного сырья WO_3 и C смешивают во вращающейся печи в течение 1 часа (рис. 5). Потом смесь гранулируют до частиц размером $1,2 \times 3,0$ мм, а затем гранулы подвергают сушке и прокаливанию в две стадии: в среде азота ($1000 \dots 1600$ °C) и среде водорода ($1400 \dots 2000$ °C). В результате получают ультра- (110 нм) и нанодисперсные (78 нм) порошки WC, характеризующиеся однородным распределением частиц по дисперсности и минимальной концентрацией примесей.

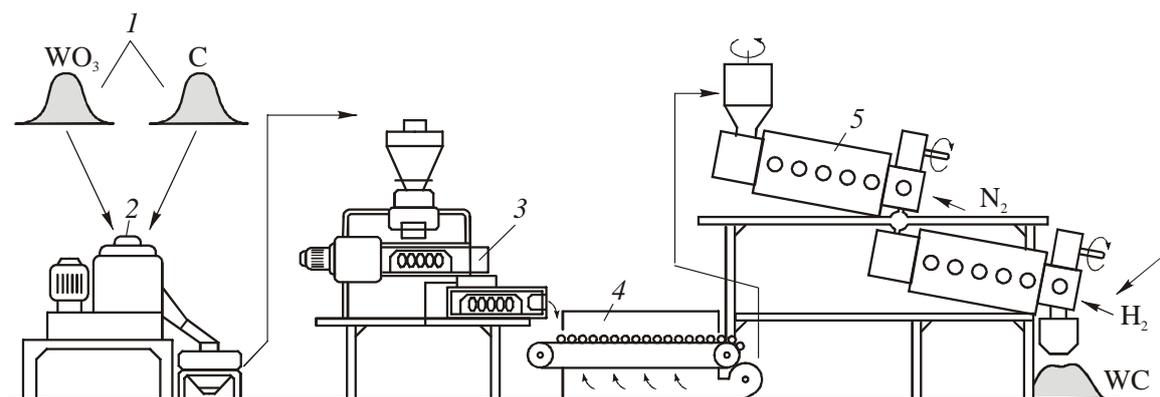


Рис. 5. Схема получения порошка карбида вольфрама WC во вращающейся печи: 1 – исходное сырье; 2 – смеситель *Henschel*; 3 – гранулятор; 4 – сушилка; 5 – вращающаяся печь

в) получение порошка WC прокаливанием – восстановлением – карбидизацией (технология CRC – *Calcination – Reduction – Carburisation*)

Это усовершенствованная технология, использующая традиционное технологическое оборудование, позволяет получить порошки WC со средним размером зерен менее 0,5 мкм. Ее суть заключается в твердофазном разложении порошка паравольфрамата аммония (ПВА) в среде азота в процессе прокаливания. При температурах 500...650 °C аммиак, содержащийся в ПВА, диссоциирует на азот и водород. Последний восстанавливает оксид вольфрама WO_3 до порошка синего оксида вольфрама WO_{3-x} , имеющего тонкодисперсную структуру. Синий оксид восстанавливают в водороде до порошка вольфрама. Карбид вольфрама WC получают при нагревании смесей порошков вольфрама и твердого углерода (сажи).

Тщательное соблюдение режимов и высокая степень автоматизации процесса позволяют повысить однородность дисперсности порошков и добиться высокой точности воспроизведения и повторяемости их характеристик.

г) получение смеси порошков WC-Co конверсионной сушкой распылением (технология SCP – *Spray Conversion Process*)

В отличие от вышерассмотренных эта технология позволяет сразу получать композиционную смесь WC-Co с размерами частиц 20...50 нм (рис. 6).

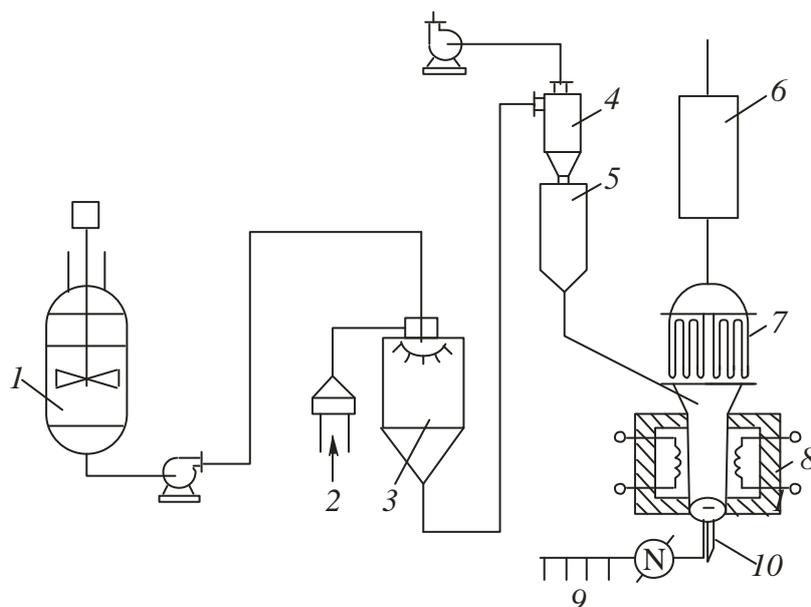


Рис. 6. Схема процесса производства нанокристаллических порошков WC-Co методом сушки распылением: 1 – аппарат для смешивания исходных водных растворов; 2 – подача газа для распыления; 3 – установка «сушка распылением»; 4 – циклон; 5 – бункер-накопитель; 6 – камера сжигания; 7 – фильтр; 8 – реактор кипящего слоя; 9 – углеродосодержащие реакционные газы; 10 – готовый продукт

Процесс состоит из трех стадий: 1) получение суспензии водных растворов порошка WC в смеси со связкой и растворителем – задается основной конечный состав композитного порошка; 2) сушка распылением – предшествующая суспензия водных растворов превращается в легкотекучий порошок в виде гранул сферической формы с хорошей уплотняемостью и малыми размерами гранул, обеспечивающих быстрое спекание формованных заготовок; 3) синтез в кипящем взвешенном восходящем потоке нагретого газа слое – в результате реакции между твердыми частицами и реакционными газами предшествующий порошок в высокотемпературном реакторе кипящего слоя превращается в нанодисперсный композитный порошок WC-Co.

В качестве исходных соединений здесь используют хлориды-, нитриды-, ацетаты кобальта, метавольфрамат аммония с этилендиамином, раствор вольфрамовой кислоты в водном растворе аммиака.

Для получения двухфазного нанодисперсного состава композита необходимо поддерживать активность углерода в определенных пределах. Это достигается автоматическим контролем газовой среды на входе и выходе реактора кипящего слоя. При этом в реакторе в

псевдооживленном состоянии достигается такое качественное перемешивание газа и частиц, что постоянство температуры в слое обеспечивается с точностью ± 1 °С.

д) получение порошков металлического Со

Традиционная технология получения порошка Со восстановлением оксида кобальта (Co_2O_3 или Co_3O_4) водородом в трубчатых или муфельных электрических печах позволяет получать порошок с размером частиц 1...5 мкм. Однако для изготовления нано- и ультрамелкодисперсных твердых сплавов требуются порошки с размером зерен менее 1 мкм. Их получают по специальной технологии:

- порошки с зернами размером 0,5...5,0 мкм получают в автоклавах под давлением водорода 3,5 МПа. Исходное сырье – раствор сернокислого кобальта. В автоклав загружают водный аммиак, катализатор (соль серебра) для образования зародышей и органику для контроля агломерации;
- порошки с зернами размером 0,2...2,0 мкм получают добавлением полиорганики (этиленгликоль, диэтиленгликоль, тетраэтиленгликоль). Такие порошки характеризуются сферической формой частиц с небольшой степенью агломерации, однородным распределением зерен по размеру и отсутствием пирофорности.

С целью уменьшения пылевыведения и окисляемости порошок Со гранулируют.

Особо следует отметить, что во избежание негативного воздействия рассматриваемых порошков на здоровье человека их предельно допустимые концентрации должны составлять: W, WC – 6,0 мг/м³, Со, Co_2O_3 , Co_3O_4 – 0,5 мг/м³.

3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ

Твердосплавные стержни изготавливают в следующей последовательности: приготовление смеси WC-Co, ее размол, сушка распылением, пластификация смеси, формование и спекание стержней [5, 8].

Основным условием приготовления смеси для производства твердосплавных стержней является равномерное распределение связки (Co), карбидов (WC) и легирующих элементов (если они присутствуют) между собой в соотношении, отвечающем данной марке твердого сплава. Для этого указанные порошки смешивают, а затем подвергают размолу в жидкой среде (этиловый спирт, гексан, ацетон или другие органические жидкости). Здесь жидкая среда препятствует окислению компонентов полученной суспензии и обеспечивает оптимальное диспергирование ингредиентов.

Процесс размола в значительной мере определяет равномерность распределения компонентов смеси, от которой в дальнейшем зависят условия спекания и эксплуатационные свойства твердого сплава.

Для размола обычно применяют атриторные или барабанные (шаровые) мельницы.

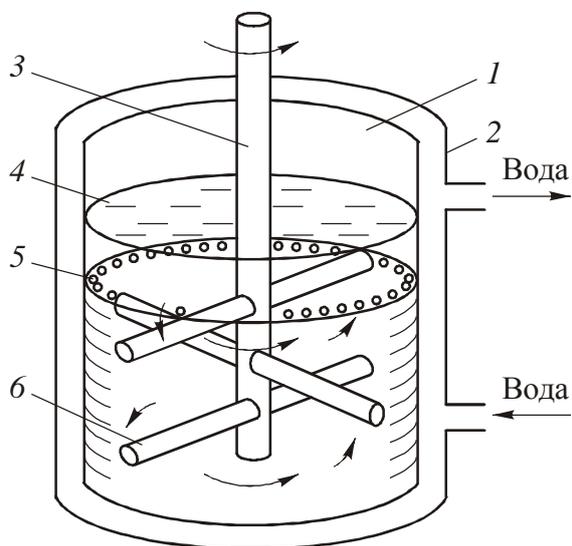


Рис. 7. Схема атриторной мельницы: 1 – размольная емкость; 2 – рубашка водоохлаждаемого кожуха; 3 – вал мешалки; 4 – размазываемая смесь; 5 – размазывающие тела; 6 – лопасти мешалки

Схема атриторной мельницы показана на рис. 7. Это неподвижный водоохлаждаемый стальной барабан, футерованный изнутри твердосплавными пластинами. В барабан загружают

размалываемую смесь и размалывающие тела – твердосплавные шары диаметром 5...15 мм. Последние приводятся в движение лопастной крестовиной (мешалкой), также армированной твердым сплавом. Во время размола в атриторной мельнице работает система циркуляции суспензии. При этом соотношение между объемами шаров и суспензии должно быть равным 6:1.

Барабанная мельница представляет собой вращающийся цилиндрический барабан из коррозионно-стойкой стали, частично заполненный размалывающими шарами (рис. 8). При вращении барабана шары совершают многократные падения и перекатывания, разрушая при этом частицы порошка. Оптимальная частота вращения барабана [5]:

$$n_{\text{опт}} = 30...40 / \sqrt{d}, \text{ мин}^{-1}$$

где d – диаметр барабана, м.

Условия оптимального использования мельницы: 1) диаметр шаров должен быть примерно в 30 раз больше, чем начальный размер частиц порошка; 2) объем шаровой загрузки должен составлять около 50 % объема барабана; 3) объем измельчаемого порошка должен составлять около 25 % объема барабана [9].

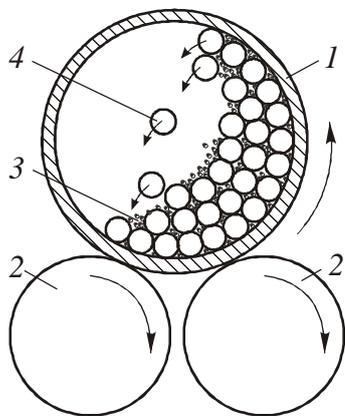


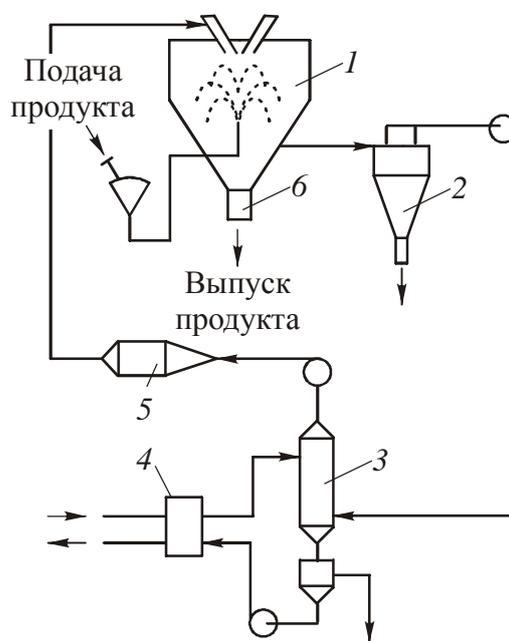
Рис. 8. Схема барабанной (шаровой) мельницы: 1 – барабан; 2 – приводные вальки; 3 – измельчаемый материал; 4 – шары

Для получения гранулированного порошка пульпу после мокрого размола насосом под давлением 0,6 МПа через распылительную форсунку подают в сушильную камеру 1 установки сушки распылением (рис. 9). Туда же, пройдя подогреватель 5, поступает под давлением 0,1...0,3 МПа азот, нагретый до температуры 170...200 °С. Образовавшиеся при распылении гранулы, высохнув, скапливаются в разгрузочном бункере 6. Смесь паров спирта с азотом (температура около 100 °С) из камеры 1 поступает в циклон 2, где в разгрузочном

бункере накапливаются унесенные из камеры 1 мелкие гранулы, и насосом подается в скруббер-конденсатор 3. Здесь спирт отделяется от азота и поступает в холодильник 4.



а



б

Рис. 9. Установка (а) модели NS-120 фирмы Niro Atomizer (Дания) для сушки распылением пульпы твердосплавной смеси после размола компонентов в спирте и ее схема (б): 1 – сушильная камера; 2 – циклон; 3 – скруббер-конденсатор; 4 – холодильник; 5 – подогреватель; 6 – разгрузочный бункер

Полученные таким способом гранулы порошка WC-Co имеют сферическую форму диаметром 20...200 мкм.

Карбидная основа твердосплавной смеси делает ее малопластичной, трудно прессуемой и плохо формируемой. Поэтому перед формованием стержней порошок твердосплавной смеси пластифицируют путем ввода в него 6...15 % пластификатора (парафин, воск и др.). Благодаря этому улучшается текучесть смеси, уменьшается трение между зернами WC и, как следствие, усилие прессования.

При пластифицировании важно обеспечить равномерное распределение пластификатора в смеси, а также удалить из смеси воздух, который вызывает появление вздутий на поверхности и раковин внутри прессованных стержней. Для борьбы с этим явлением пластифицирование осуществляют в вакуумной установке с подогревом

смеси до температуры 38...42 °С горячей водой (рис. 10). Для повышения интенсивности смешения и получения однородной массы (это обязательное требование процесса экструзии) лопасти установки должны вращаться навстречу друг другу с разными частотами вращения ($n_1 = 0,5n_2$) [5].

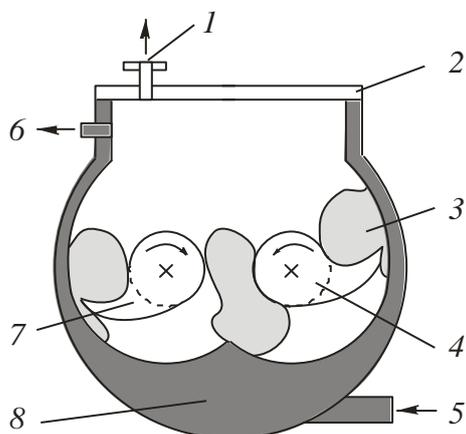


Рис. 10. Вакуумная установка для пластификации смеси порошков WC-Co: 1 – к вакуумному насосу; 2 – крышка; 3 – перемешиваемая масса; 4, 7 – лопасти; 5 – вход горячей воды, 6 – выход горячей воды; 8 – фасонный корпус

Формование пластифицированного порошка осуществляют в экструдере мундштучным прессованием. В качестве примера на рис. 11 представлена схема экструдера фирмы *Dorst* (Германия), используемого для прессования твердосплавных стержней диаметром до 25 мм. Он включает подающий шнек 1, вакуумный насос 2, прессующий (экструдировующий) шнек 12, пресс-цилиндр 8 с держателем 9 мундштука, загрузочный бункер 6, бесступенчатые регуляторы частоты вращения подающего 5 и прессующего 10 шнеков, приводы этих регуляторов 3 и 4, перфорированную шайбу 7, пульт управления 11.

Пресс-цилиндр экструдера имеет возможность регулировать температуру экструдированной массы (рис. 12). Достигается это благодаря наличию независимых контуров терморегулирования прессующего шнека, а также цилиндрической и конической частей пресс-цилиндра.

После экструдера формованные стержни направляют на спекание. Его особенность состоит в том, что в начальный период нагрева из формовки удаляют пластификатор. При этом скорость нагрева до температуры 300...500 °С не должна превышать 4...6 °С/мин из-за опасности появления в стержнях трещин, вызванных значительным, примерно до 20 %, температурным расширением пластификатора.

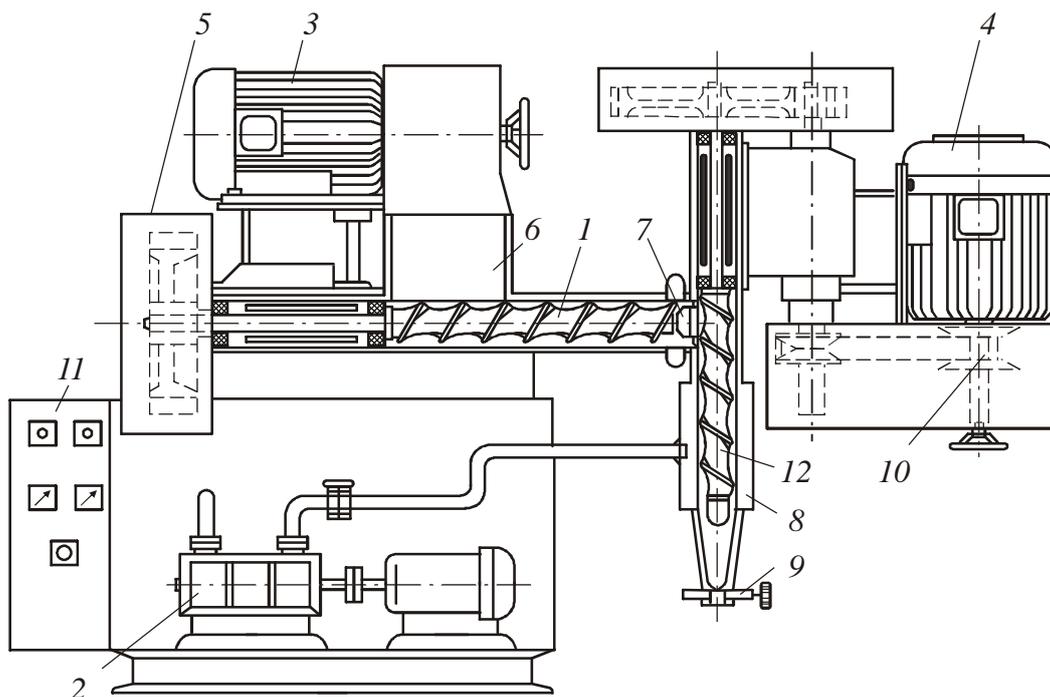


Рис. 11. Схема экструдера фирмы *Dorst* (Германия):

1 – подающий шнек; 2 – вакуумный насос; 3, 4 – электрические приводы регуляторов частоты вращения шнеков; 5, 10 – бесступенчатые регуляторы частоты вращения шнеков; 6 – загрузочный бункер; 7 – перфорированная шайба; 8 – пресс-цилиндр; 9 – держатель мундштука; 11 – пульт управления; 12 – прессующий шнек

При температуре более 500 °С скорость нагрева стержней может быть увеличена до 6...10 °С/мин, т. к. пластификатор к этому времени удален полностью. После этого процесс спекания стержней ничем не отличается от спекания изделий, полученных обычным прессованием.

Спекают стержни либо в печах толкательного типа, работающих в режимах предварительного (в водороде) и окончательного (в вакууме) спекания. Либо в садочных печах, также работающих в режимах предварительного (отгонка пластификатора) и окончательного (в вакууме) спекания.

Работают такие печи соответственно в непрерывном и прерывистом режимах эксплуатации, обеспечивая программу спекания в автоматическом режиме с постоянным контролем всех параметров рабочего цикла.

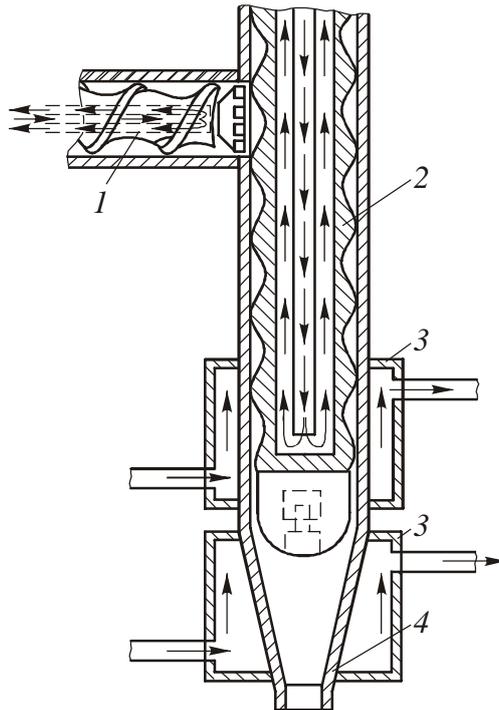


Рис. 12. Пресс-цилиндр экструдера: 1 – подающий шнек; 2 – прессующий шнек; 3 – контуры терморегулирования; 4 – держатель мундштука

Однако наиболее эффективными для этой цели являются печи *Sinter HIP*, соединяющие в себе печь для спекания и газостат (рис. 13). Работает такая печь следующим образом. Газ (аргон) из баллонов 1 проходит фильтр 2 и заполняет рабочую камеру 10, после чего компрессор 3 повышает давление газа в камере. Давление свыше предельного рабочего давления компрессора создается в камере 10 за счет нагрева газа нагревателем 9. Давление газа в трубопроводе 6 контролирует манометр 5. По окончании выдержки под давлением газ возвращают в баллоны 1, причем горячий газ охлаждается автоматически в момент ухода из рабочей камеры вследствие его расширения. В установке имеется дополнительный охладитель 4 для снижения температуры газа до комнатной. Выкачивание газа из рабочей камеры 10 и закачивание его в баллоны 1 прекращают, когда давление в камере 10 становится равным атмосферному. После этого небольшой остаток газа из камеры 10 выпускают в атмосферу. Трехзонный нагреватель 9 создает длинную равномерную зону нагрева в рабочей

камере 10 и обеспечивает быстрый нагрев газа до заданной температуры. Рабочая камера рассчитана на давление до 200 МПа и температуру до 2200 °С.

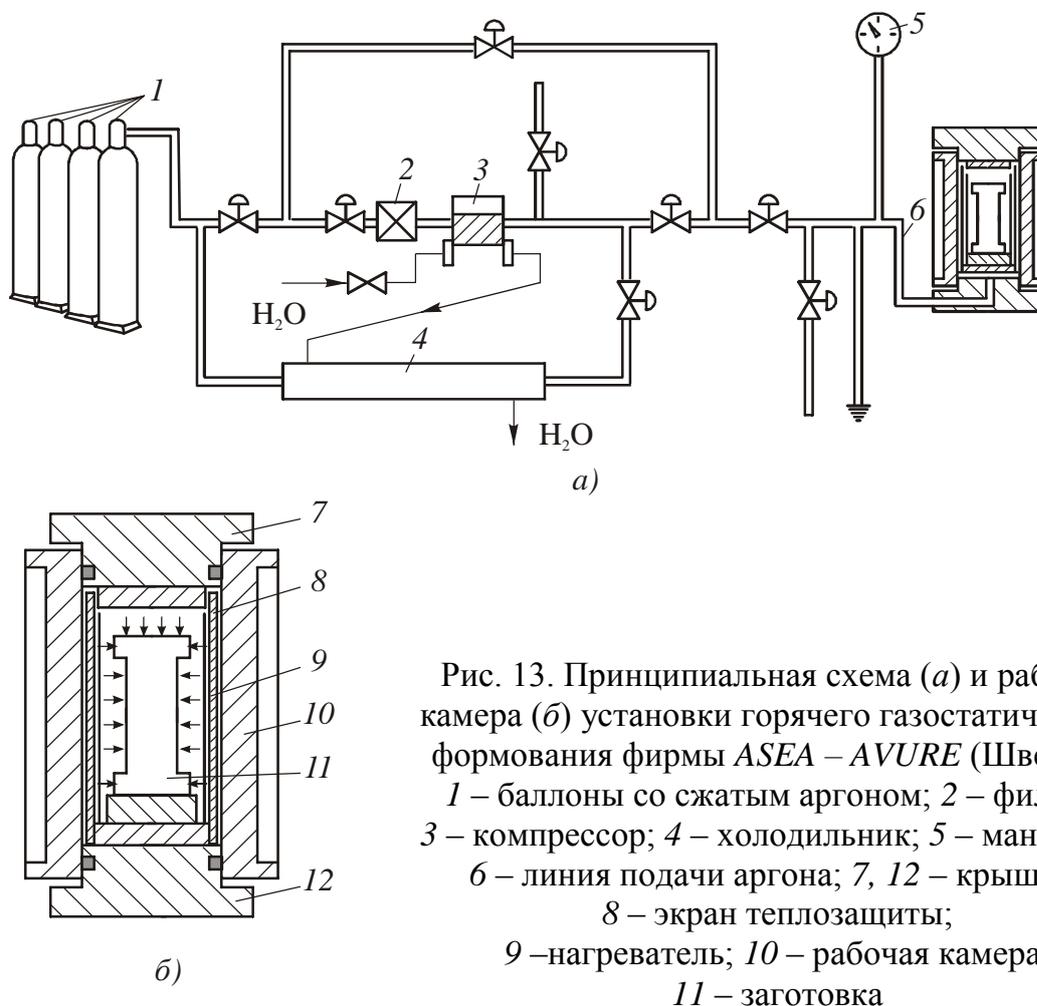


Рис. 13. Принципиальная схема (а) и рабочая камера (б) установки горячего газостатического формования фирмы ASEA – AVURE (Швеция):
 1 – баллоны со сжатым аргоном; 2 – фильтр;
 3 – компрессор; 4 – холодильник; 5 – манометр;
 6 – линия подачи аргона; 7, 12 – крышки;
 8 – экран теплозащиты;
 9 – нагреватель; 10 – рабочая камера;
 11 – заготовка

Таким образом, технология спекания в печах *Sinter HIP* заключается в последовательном выполнении спекания и горячего изостатического прессования (*Hot isostatic pressing – HIP*). На первой стадии спекание обеспечивает относительную плотность стержней около 92...95 %, при которой все поры являются закрытыми. Спекание производят в вакууме для того, чтобы не оставлять газов в закрытых порах. После достижения указанной плотности вакуум в печи заменяют атмосферой аргона при повышенном (до 10 МПа) давлении, допрессовывая стержни до беспористого состояния. Благодаря

всестороннему сжатию равными по величине давлениями аргона твердый сплав приобретает более однородную структуру и повышенные механические характеристики. График изменения температуры T и давления P во времени τ в печах *Sinter HIP* представлен на рис. 14 [10].

При спекании стержней происходит их усадка, сопровождаемая короблением. При этом стрела прогиба стержня длиной до 310...330 м может достигать 0,35 мм и более. Поэтому далее спеченные стержни подвергают механотермической правке [5]. Суть ее состоит в том, что стержень, нагретый в специальной печи до температуры на 100 °С ниже температуры спекания, сжимают при небольшой нагрузке между двумя пластинами (одна плоская, а вторая с треугольной канавкой под спеченный стержень), изготовленными из высококачественного тонкозернистого графита. В результате такой правки кривизна стержней уменьшается.

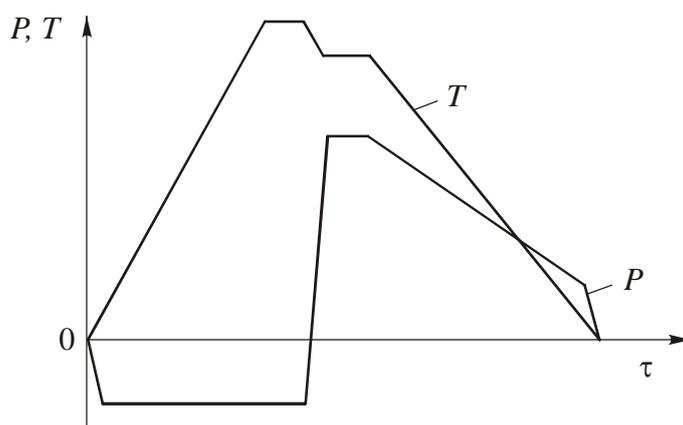


Рис. 14. Рабочий цикл совмещенного процесса спекания и газостатической обработки твердосплавной заготовки:

P – давление, T – температура, τ – время

Дальнейшую правку стержней осуществляют шлифованием алмазными кругами на бесцентровых круглошлифовальных станках, например, фирмы *Junker* (Германия) (табл. 2), где стержни обрабатывают с точностью $h6$ (реже $h5$) и шероховатостью обработанной поверхности $Ra < 0,05$ мкм. Отсюда следует, что спеченные стержни должны иметь припуск на шлифование и тогда (рис. 15):

Таблица 2

Основные технические характеристики некоторых моделей
бесцентровых круглошлифовальных станков фирмы
Junker (Германия)

| Технические характеристики | Модель станка | |
|--|--|------------------------|
| | <i>Jupiter 125</i> | <i>Jupiter 200</i> |
| Заготовка диаметр, мм длина, мм | 0,5...40,0 125 | 1,5...100,0 200 |
| Шлифовальный круг наибольшие размеры круга из электрокорунда (63 м/с) наибольшие размеры круга из кубического нитрида бора (КНБ) (120 м/с) мощность привода, кВт | 500×125×305 400×125×127 22 | 500×200×305 |
| Ведущий круг наибольшие размеры, мм мощность привода, кВт | 300×125×203 6,7 | 300×200×127 4,7 |
| Методы шлифования сквозное врезное | да да | |
| Габариты ширина × длина × высота, мм вес, кг | 1600×3600×2200 8000 | 1680×1950×2200 4800 |

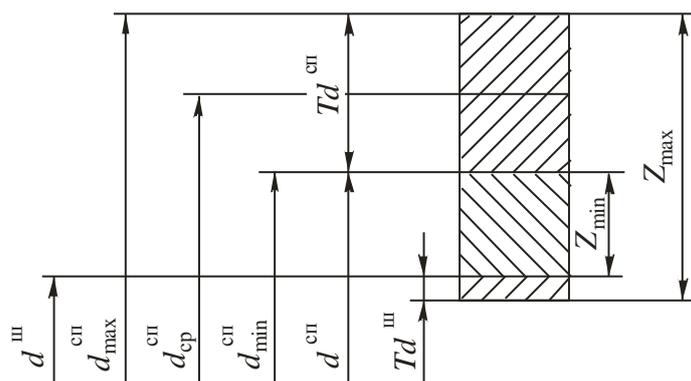


Рис. 15. Схема для расчета диаметра отверстия в мундштуке экструдера и припусков на шлифование печенных стержней

– максимальный диаметр печенного стержня

$$d_{\max}^{\text{сп}} = d^{\text{ш}} + (0,2...0,3) \text{ мм} + Td^{\text{сп}},$$

где $Td^{\text{сп}}$ – допуск на диаметр спеченного стержня (табл. 3).

Таблица 3

Допуски на диаметры спеченных и шлифованных
твердосплавных стержней

| $d^{\text{ш}}, \text{ мм}$ | От 1 до 3 | Св. 3 до 6 | Св. 6 до 10 | Св. 10 до 18 | Св. 18 до 30 |
|---------------------------------|-------------|------------|-------------|--------------|--------------|
| $Td^{\text{ш}}(h5), \text{ мм}$ | 0,004 | 0,005 | 0,006 | 0,008 | 0,009 |
| $Td^{\text{ш}}(h6), \text{ мм}$ | 0,006 | 0,008 | 0,009 | 0,011 | 0,013 |
| $Td^{\text{сп}}, \text{ мм}$ | 0,15...0,30 | | 0,30...0,40 | | 0,4...0,5 |

- минимальный диаметр спеченного стержня

$$d_{\min}^{\text{сп}} = d^{\text{ш}} + (0,2...0,3) \text{ мм},$$

где $d^{\text{ш}}$ – номинальный диаметр шлифованного стержня;

- средний диаметр спеченного стержня

$$d_{\text{ср}}^{\text{сп}} = (d_{\max}^{\text{сп}} + d_{\min}^{\text{сп}}) / 2.$$

Для получения спеченного стержня определенного диаметра необходимо знать диаметр отверстия в мундштуке. Его рассчитывают с учетом влияния на диаметр стержня: а) упругого последействия, вызывающего увеличение диаметра сырого стержня после выхода экструдированной массы из отверстия мундштука (учитывается коэффициент уширения $k_{\text{уш}} = 1,0015...1,0030$ [11]); б) линейной усадки, вызывающей уменьшение диаметра стержня после спекания (учитывается коэффициент усадки $k_y = 1,18...1,22$ [11]).

Тогда диаметр отверстия в мундштуке

$$D_o = \frac{d_{\text{ср}}^{\text{сп}} \cdot k_y}{k_{\text{уш}}}.$$

При расчете припусков на шлифование твердосплавных стержней определяют:

- максимальный припуск

$$Z_{\max} = (d^{\text{сп}} + Td^{\text{сп}}) - (d_{\text{ш}} - Td^{\text{ш}}),$$

где $d^{\text{сп}}$ – номинальный диаметр спеченного стержня; $Td^{\text{ш}}$ – допуск на диаметр шлифованного стержня (табл. 2);

- минимальный припуск

$$Z_{\min} = d^{\text{сп}} - d^{\text{ш}};$$

- допуск на припуск

$$T_Z = Z_{\max} - Z_{\min}.$$

Перед круглым бесцентровым шлифованием стержни проверяют на кривизну по просвету на стальной шлифованной плите с помощью щупа. Допускаемая кривизна для стержней длиной 100 мм – 0,15 мм, а длиной 310...330 мм – 0,25 мм. Затем стержни сортируют на группы по диаметру через 0,1 мм. Цель этой и предыдущей операций – избежать поломок стержней при шлифовании напроход вследствие их кривизны и большого припуска.

В процессе шлифования припуск удаляют постепенно, снимая при первом проходе и двух последних слоёв толщиной по 0,05 мм, а на всех промежуточных проходах – по 0,1 мм [12].

4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЦЕЛЬНЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ОСЕВЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

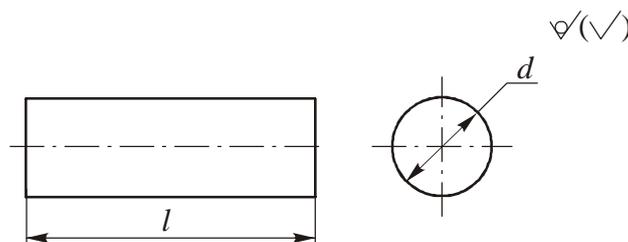
До недавнего времени цельные твердосплавные осевые инструменты в нашей стране изготавливали на универсальном оборудовании за 10...12 операций [12–14]. При этом в качестве заготовок использовали твердосплавные стержни цилиндрической по ОСТ 48-97-80 (получали мундштучным прессованием) и бочкообразной по ОСТ 48-98-80 (получали поперечным прессованием) форм. Материал стержней – однокарбидные твердые сплавы [15].

Для изготовления трех- и пятизубых концевых фрез по ГОСТ 18372-73Е применяли профилированные заготовки по ОСТ 48-124-76, а для изготовления шпоночных фрез по ГОСТ 16463-80 – профилированные заготовки по ОСТ 48-39-81. Материал стержней – одно- и двухкарбидные твердые сплавы [15].

В настоящее время для этой же цели КЗТС (Кировградский завод твердых сплавов, Россия) выпускает твердосплавные стержни формы 41 (табл. 4), формы Р01 (табл. 5) и стержни длиной 330 мм (табл. 6). Материал стержней – одно- и двухкарбидные твердые сплавы.

Таблица 4

Твердосплавные цилиндрические стержни формы 41
(Кировградский завод твердых сплавов, Россия)

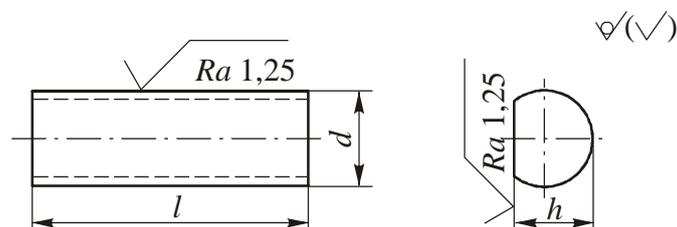


| d , мм | l , мм | d , мм | l , мм |
|----------|----------|----------|----------|
| 3,4 | 10 | 5,2 | 16 |
| 4,4 | 12 | 5,4 | 20 |
| 4,4 | 16 | 5,4 | 25 |
| 4,4 | 20 | -- | -- |

Примечание. Материал стержней – твердые сплавы марок ВК3-М, ВК6, ВК8, ВП322, Т30К4, Т15К6, Т5К10

Таблица 5

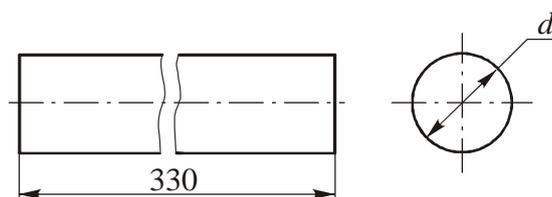
Твердосплавные шлифованные цилиндрические стержни формы P01
(Кировградский завод твердых сплавов, Россия)



| d , мм | l , мм | h , мм | d , мм | l , мм | h , мм |
|----------|----------|-----------|----------|----------|-----------|
| 3 | 13,8 | 2,7 | 6 | 31,3 | 5,3 |
| 3 | 14,8 | 2,7 | 6 | 35,8 | 5,3 |
| 4 | 10,8 | 3,6 | 6 | 38,3 | 5,3 |
| 4 | 10,8 | без лыски | 6 | 60,0 | без лыски |
| 4 | 11,8 | 3,6 | 8 | 25,8 | 7 |
| 4 | 15,8 | 3,6 | 8 | 31,8 | 7 |
| 4 | 18,3 | 3,6 | 8 | 32,5 | 7 |
| 4 | 18,8 | 3,6 | 8 | 36,8 | 7 |
| 4,76 | 15,3 | 4,3 | 8 | 42,3 | 7 |
| 4,76 | 16,8 | 4,3 | 8 | 80 | без лыски |
| 4,76 | 20,8 | 4,3 | 10 | 100 | без лыски |
| 4,76 | 23,8 | 4,3 | 12 | 100 | без лыски |
| 5 | 12,3 | 4,5 | 10 | 37,0 | 9 |
| 5 | 15,8 | 4,5 | 10 | 45,5 | 9 |
| 5 | 16,8 | 4,5 | 3 | 26,0 | без лыски |
| 5 | 18,8 | 4,5 | 3 | 33,0 | без лыски |
| 5 | 23,8 | 4,5 | 3 | 51,0 | без лыски |
| 5 | 27,8 | 4,5 | 4 | 31,0 | без лыски |
| 5 | 30,8 | 4,5 | 5,5 | 20,0 | без лыски |
| 5 | 50,3 | без лыски | 6 | 20,0 | без лыски |
| 6 | 20,8 | 5,3 | 4 | 33,0 | без лыски |
| 6 | 25,8 | 5,3 | 8 | 19,0 | без лыски |
| 6 | 30,8 | 5,3 | 10 | 19,0 | без лыски |

Примечания. 1. Материал стержней – твердые сплавы марок ВК6, ВК6-ОМ, ВК8, Т15К6, Т14К8, Т5К10, А04. 2. Возможно изготовление нешлифованных стержней с предельными отклонениями диаметра $d^{+0,3}_{-0,4}$.

Твердосплавные цилиндрические стержни
(Кировградский завод твердых сплавов, Россия)
ТУ 48-4205-91-2010



| d , мм | | d , мм | |
|----------------|-------------|----------------|-------------|
| Не шлифованные | Шлифованные | Не шлифованные | Шлифованные |
| 3,3 | 3,0 | 9,3 | 9,0 |
| 4,3 | 4,0 | 10,3 | 10,0 |
| 5,3 | 5,0 | 12,3 | 12,0 |
| 6,3 | 6,0 | 14,3 | 14,0 |
| 8,3 | 8,0 | 16,3 | 16,0 |

Примечания. 1. Материал стержней – твердые сплавы марок А04, А04-6.
2. Возможно изготовление стержней длиной менее 330 мм.

Из-за несовершенства применяемой технологии изготовления твердосплавные стержни имели относительно невысокие физико-механические характеристики, значительные отклонения диаметральных размеров, кривизну и в таком виде поставлялись на инструментальные заводы. Там, как было сказано выше, заготовки проверяли на кривизну, сортировали на группы по диаметру и шлифовали на бесцентровых круглошлифовальных станках. После этого со стороны рабочей и хвостовой частей инструмента, например спирального сверла, шлифовали наружные центры. Далее, установив заготовку в эти центры, осуществляли получистовое шлифование рабочей и чистовое шлифование хвостовой частей инструмента. Затем рабочую часть сверла подвергали чистовому шлифованию с образованием обратной конусности. Потом шлифовали стружечные канавки, спинки, затачивали задние поверхности и подтачивали поперечную режущую кромку [12–14].

Изготовленные по такой технологии инструменты не отвечают современным требованиям: а) из-за низкой точности инструментов; б) высокой трудоемкости изготовления; в) низкой прочности и

износостойкости применяемых твердых сплавов и наносимых покрытий; г) относительно узкого диапазона диаметральных и осевых размеров инструментов; е) низкой производительности технологического процесса изготовления инструмента.

Современная технология изготовления цельных твердосплавных осевых режущих инструментов повышенной точности, прочности и износостойкости предусматривает:

- 1) использование в качестве заготовок осевых режущих инструментов цилиндрических стержней с различной формой поперечного сечения (рис. 16) длиной до 330 мм и диаметром до 20 мм и более, шлифованных по наружному диаметру с точностью $h6$ (реже $h5$) и шероховатостью $Ra < 0,05$ мм;
- 2) применение в качестве материала стержней однокарбидных твердых сплавов, чаще всего с субмикронной и ультрамелкодисперсной структурой, обладающих повышенными прочностью и износостойкостью (см. табл. 1);
- 3) изготовление инструментов на пятикоординатных шлифовально-заточных станках с ЧПУ (числовым программным управлением) (табл. 7, 8);
- 4) нанесение на рабочую часть инструментов современных одно- и многослойных покрытий, в т. ч. алмазоподобных.

Использование в качестве заготовок цилиндрических стержней, шлифованных по цилиндру и по одному торцу с образованием фаски с размером $s \times 45^\circ$ (табл. 9), значительно сокращает технологический процесс изготовления инструментов, так как отпадает необходимость в подготовке базовых поверхностей инструмента (табл. 10–12).

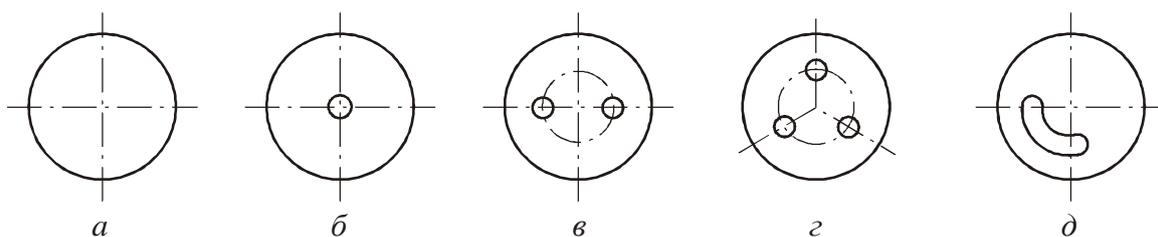


Рис. 16. Основные типы цилиндрических твердосплавных стержней, получаемых мундштучным прессованием:

- а* – сплошной; *б* – с центральным прямым круглым отверстием;
в – с двумя круглыми прямыми или винтовыми отверстиями;
г – с тремя круглыми прямыми или винтовыми отверстиями;
д – с фасонным прямым отверстием

Применение однокарбидных твердых сплавов с ультрамелкодисперсной структурой обеспечивает режущим инструментам столь высокие физико-механические характеристики, что их можно использовать для высокоскоростной обработки, при резании без применения или с минимальным (до 30 мг/ч) применением СОЖ, при обработке закаленных сталей и сплавов, а также для изготовления мелкоразмерных (диаметром менее 3...5 мм) осевых режущих инструментов.

Высокие производительность и точность изготовления инструментов обеспечивают трех–шестикоординатные шлифовально-заточные станки с ЧПУ. Из них наибольшее применение получили пятикоординатные шлифовально-заточные станки. На таких станках можно изготавливать концевые фрезы (цилиндрические, конические, с плоским, радиусным или сферическим торцом), сверла, зенкеры, развертки (в т. ч. ступенчатые) и др. осевые инструменты.

Пятикоординатные станки позволяют быстро настроить станок и за одну установку почти полностью изготовить инструмент (далее требуется только нанести покрытие, маркировку, осуществить консервацию и упаковку инструмента).

Достигается это благодаря высокой точности и жесткости станков, а также весьма эффективному программному обеспечению, позволяющему производить быстрое и точное перемещение заготовки и алмазных кругов по пяти координатам, одновременно управляемым системой ЧПУ станка. В результате становится экономически целесообразным изготовление даже одного инструмента, а технологический процесс превращается, по существу, в многопереходную шлифовально-заточную операцию. Высокая концентрация переходов на одном станке во многом достигается благодаря тому, что с обеих сторон шлифовального шпинделя станка можно установить до восьми шлифовальных кругов. Примеры возможных комбинаций различных форм алмазных кругов, применяемых при изготовлении осевых инструментов, рекомендуемые фирмой *Toolgal Degania Industrial Diamonds Ltd.* (Израиль), приведены на рис. 17. При этом важно правильно выбрать не только размеры и форму алмазных кругов, но и их зернистость, связку, концентрацию зерен в алмазоносном слое и другие параметры, а также режимы шлифования твердых сплавов. Указанные параметры, рекомендуемые, например, ОАО «Полтавский алмазный инструмент» (Украина), приведены в табл. 13 и 14.

Таблица 7

Технические характеристики некоторых моделей пятикоординатных шлифовально-заточных станков с ЧПУ, применяемых для изготовления цельных твердосплавных осевых режущих инструментов

| Модель станка | <i>WALTER HELITRONIC POWER</i> | <i>ANCA RX7</i> | <i>SCHNEEBERGER Corvus</i> | <i>Haas Miligring HT</i> | <i>Schütte WU305</i> |
|--|--|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| <i>Характеристики ЧПУ</i> | | | | | |
| Система ЧПУ | Fanuc серии 310i модель A5 | ANCA 5DX | Fanuc серии 160i | Siemens 840D | Siemens |
| Процессор/RAM | PC Pentium M, 1,6 ГГц /1024 Мб | PC Pentium 4, 2,8 ГГц /512 Мб | Pentium 4 | Sinumerik | Sinumerik |
| Дисплей | Активный экран 15" | Активный экран 15" | ЖК экран 10,4" | 15" | 15" |
| Пульт управления | Поворотный, перемещаемый | Поворотный, перемещаемый | Поворотный | Поворотный | Поворотный, перемещаемый |
| <i>Расположение шлифовального шпинделя</i> | | | | | |
| | Портальное | Консольное | Консольное | Консольное | Консольное |
| <i>Оси станка</i> | | | | | |
| Перемещение по X-оси, мм | 480 | 435 | 400 | 700 | 400 |
| Перемещение по Y-оси, мм | 320 | 457 | 300 | 500 | 250 |
| Перемещение по Z-оси, мм | 700 | 275 | 300 | 300 | 250 |
| Ось C | ±200° | 310° | 210° | -200°/100° | 225° |
| Ось A | 360° | 360° | 360° | 360° | 360° |

| Модель станка | <i>WALTER HELITRONIC POWER</i> | <i>ANCA RX7</i> | <i>SCHNEEBERGER Corvus</i> | <i>Haas Miligring HT</i> | <i>Schütte WU305</i> |
|--|---|---------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------|
| Скорость перемещения по линейным осям, м/мин | 15 | 18 | 15 | 15 | 24 |
| Число оборотов бабки изделия (для круглого шлифования) | 750 | 600 | Не указано | Не указано | 200 |
| Максимальный диаметр инструмента, мм | 320 | 220 | 410 | 260 | 235 |
| Максимальный вес инструмента, кг | 50 | 20 | 25 | Не указано | Не указано |
| <i>Система приводов</i> | | | | | |
| Производитель | <i>Fanuc</i> | <i>ANCA</i> | <i>Fanuc</i> | <i>Siemens</i> | <i>Siemens</i> |
| Система приводов | <i>Fanuc</i> | <i>ANCA Digital</i> | <i>Fanuc</i> | <i>Siemens</i> | <i>Siemens</i> |
| Тип привода X, Y, Z, A, C-осей | Шариковая передача винт-гайка | | | | |
| Температурные деформации | Температурный датчик автоматической компенсации деформации шлиф. шпинделя | Нет | Нет | Нет | Нет |
| <i>Данные станка</i> | | | | | |

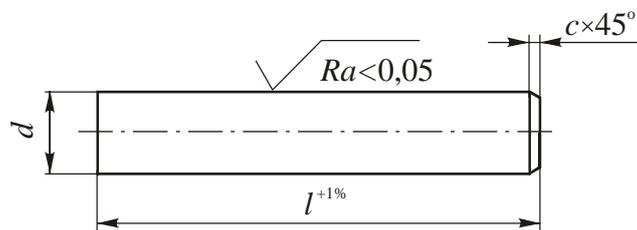
| Модель станка | <i>WALTER HELITRONIC POWER</i> | <i>ANCA RX7</i> | <i>SCHNEEBERGER Corvus</i> | <i>Haas Miligring HT</i> | <i>Schütte WU305</i> |
|--|---|--|--|--|--|
| Тип шпинделя | Двунаправленный с бесступенчато-регулируемой скоростью, с охлаждением | <i>ANCA</i> двунаправленный с бесступенчато-регулируемой скоростью | Поворотный с водяным охлаждением | Поворотный | Поворотный |
| Мощность шпинделя, кВт | 11,5 (опция 24) | 19 | 26 | 12 (25 опция) | 15 |
| Шлифовальная бабка | Портальная | Консольная | Консольная | Консольная | Консольная |
| Частота вращения, об/мин | 10000 | 10000 | 10000 | 2000-10000 | 12000 |
| Конус шпинделя | <i>HSK40</i> | <i>ISO30</i> | <i>HSK50</i> | -- | <i>HSK50E</i> |
| Максимальный диаметр шлифовального круга, мм | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Внутреннее отверстие круга, мм | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Количество шлифкругов за одну установку | 8 | 6 | 6 | 3 | 3 |
| Измерительный щуп | <i>Renishaw</i> | | | | |
| Система подачи СОЖ в зону резания | Универсальные гибкие шланги на каждый круг справа и слева | Блочная сменная с жесткими металлическими трубками | Блочная сменная с жесткими металлическими трубками | Блочная сменная с жесткими металлическими трубками | Блочная сменная с жесткими металлическими трубками |
| Станина станка | Чугун | Полимербетон | -- | -- | -- |
| Вес, кг | 4650 | 4500 | 9000 | от 8000 | от 2800 |

Таблица 8

Основные технические характеристики шлифовально-заточных станков с ЧПУ фирмы *Ulmer Schleiftechnik* (Германия)

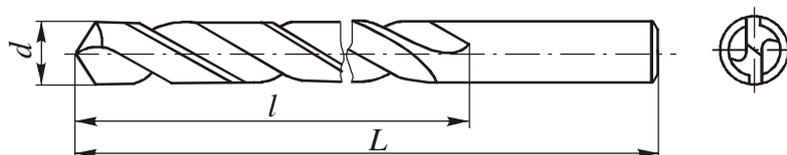
| Технические характеристики | Модель станка | |
|---|---------------------------|----------------------------|
| | WZS 60 <i>Reineker</i> | WZS 700 <i>Reineker</i> |
| Наибольшие рабочие перемещения по управляемым осям координат: | | |
| ось <i>X</i> , мм | 800 | 300 |
| ось <i>Y</i> , мм | 270 | 570 |
| ось <i>Z</i> , мм | 660 | 700 |
| ось <i>B</i> , град | 400 | 270 |
| ось <i>C</i> , град | -- | n×360 |
| Дискретность перемещений по осям координат: | | |
| ось <i>X</i> , мм | | 0,0001 |
| ось <i>Y</i> , мм | | 0,0001 |
| ось <i>Z</i> , мм | | 0,0001 |
| ось <i>B</i> , град | | 0,0001 |
| ось <i>C</i> , град | | 0,0001 |
| Усилия, развиваемые приводами подачи: | | |
| ось <i>X</i> , кН | 2,4 | 5 |
| ось <i>Y</i> , кН | 2,4 | 5 |
| ось <i>Z</i> , кН | 2,4 | 5 |
| ось <i>B</i> , Н·м | 690 | 315 |
| ось <i>C</i> , Н·м | -- | 60 |
| Скорость ускоренных подач <i>X / Y / Z</i> , м/мин | 30/15/30 | |
| Шлифовальный мотор-шпиндель: | | |
| размеры (диаметр × длина), мм | 150×300 | 170×408 |
| мощность привода, кВт (200 Гц) | 12 | 22/29 |
| бесступенчатое регулирование частоты вращения шпинделя, мин ⁻¹ | 1000...9000 | |
| вращающийся момент (до 6000 мин ⁻¹), Н·м | 20 | 35/46 |
| наибольший диаметр шлифовального круга, мм | 203 | 203/105 |
| тип конца шпинделя | <i>HSK50E</i> | |
| Шпиндель заготовки (ось <i>C</i>): | | |
| высота центров, мм | | 145 |
| тип конца шпинделя | | <i>ISO50</i> |
| стандартная частота вращения (опция), мин ⁻¹ | | 30 (1200) |
| максимальный момент, Н·м | | 60 |
| Станок: | | |
| потребляемая мощность, кВт | | 25 |
| напряжение/частота, В/Гц | | 400/50 |
| габариты | | |
| ширина × длина × высота, мм | 1900×2300×2300 | 2300×2360×2140 |
| вес, кг | 5400 | 6000 |

Таблица 9

Шлифованные твердосплавные стержни по *DIN 6527*

| $d(h6)$, мм | l , мм | c , мм | $d(h6)$, мм | l , мм | c , мм | $d(h6)$, мм | l , мм | c , мм |
|--------------|----------|----------|--------------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| 3,0 | 39 | 0,3 | 10 | 67 | 0,6 | 16 | 83 | 0,8 |
| 4; 5; 6 | 51 | 0,4 | 10 | 73 | 0,8 | 16 | 93 | 0,8 |
| 6 | 55; 58 | 0,4 | 12 | 73; 84 | 0,8 | 18 | 85; 93 | 1,0 |
| 8 | 59; 64 | 0,6 | 14 | 76; 84 | 0,8 | 20 | 93; 105 | 1,0 |

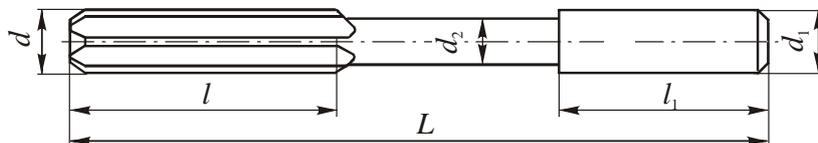
Таблица 10

Технологический процесс изготовления
цельных твердосплавных спиральных сверл

| Номер операции | Наименование и содержание операции |
|----------------|---|
| 1 | Шлифовально-заточная с ЧПУ – шлифовать рабочую часть с образованием обратной конусности; – шлифовать стружечные канавки; – шлифовать спинки; – заточить задние поверхности; – подточить перемычку. |
| 2 | Термическая. Нанести покрытие. |
| 3 | Маркировочная. Нанести текст лазерным способом. |
| 4 | Упаковочная. Провести антикоррозионную обработку и упаковать. |

Таблица 11

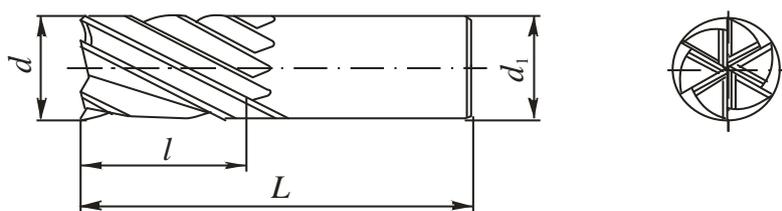
Технологический процесс изготовления
цельных твердосплавных разверток



| Номер операции | Наименование и содержание операции |
|----------------|---|
| 1 | Шлифовально-заточная с ЧПУ <ul style="list-style-type: none"> – шлифовать шейку; – шлифовать рабочую часть предварительно и окончательно с образованием обратного конуса; – шлифовать стружечные канавки; – довести передние поверхности; – заточить задние поверхности на калибрующей части предварительно и окончательно; – заточить задние поверхности на заборной части предварительно и окончательно. |
| 2 | Термическая. Нанести покрытие. |
| 3 | Маркировочная. Нанести текст лазерным способом. |
| 4 | Упаковочная. Провести антикоррозионную обработку и упаковать. |

Таблица 12

Технологический процесс изготовления
цельных твердосплавных концевых фрез



| Номер операции | Наименование и содержание операции |
|----------------|---|
| 1 | Шлифовально-заточная с ЧПУ <ul style="list-style-type: none"> – шлифовать стружечные канавки; – заточить задние поверхности по цилиндру; – заточить зубья по торцу. |
| 2 | Термическая. Нанести покрытие. |
| 3 | Маркировочная. Нанести текст лазерным способом. |
| 4 | Упаковочная. Провести антикоррозионную обработку и упаковать. |

Таблица 13

Выбор зернистости круга при шлифовании и заточке твердосплавных инструментов алмазными шлифовальными кругами ОАО «Полтавский алмазный инструмент»

| Типы и марки связок | Рекомендуемый диапазон зернистостей | Шероховатость обработанной поверхности, Ra , мкм | | |
|--|-------------------------------------|--|---|------------------------|
| | | При торцевом шлифовании и заточке | При плоском шлифовании периферией круга | При круглом шлифовании |
| Органические связки | | | | |
| Органические В1-01, В1-04, В1-13, В1-02 | 200/160...100/80 | 0,63...0,16 | 1,00...0,32 | 1,00...0,32 |
| | 80/63...50/40 | 0,32...0,16 | 0,63...0,20 | 0,63...0,20 |
| Органические В1-01 (алмазы с покрытием) В2-01, В1-04, В1-13, В1-01 | 125/100...50/40 | 0,32...0,10 | 0,63...0,16 | 0,80...0,20 |
| Органические (алмазы без покрытия) В2-01, В1-13, В1-02, В1-01 | 125/100...20/14 | 0,32...0,05 | 0,50...0,10 | 0,63...0,125 |
| Металлические связки | | | | |
| Металлические повышенной производительности М2-01, М3-04, М300 | 200/160...125/100 | 1,00...0,32 | 1,25...0,63 | 1,25...0,63 |
| | 100/80...80/63 | 0,50...0,16 | 1,00...0,32 | 1,25...0,40 |
| | 63/50...50/40 | 0,32...0,16 | 0,63...0,16 | 0,63...0,32 |

| Типы и марки связок | Рекомендуемый диапазон зернистостей | Шероховатость обработанной поверхности, <i>Ra</i> , мкм | | |
|---|-------------------------------------|---|---|------------------------|
| | | При торцевом шлифовании и заточке | При плоском шлифовании периферией круга | При круглом шлифовании |
| Металлические повышенной стойкости М2-01, М1-01, М3-04, М3-08, М300 | 250/200...125/100 | 1,00...0,32 | 1,25...0,63 | 1,25...0,63 |
| | 100/80...80/63 | 0,50...0,16 | 1,00...0,32 | 1,25...0,40 |
| | 63/50...50/40 | 0,32...0,16 | 0,63...0,16 | 0,63...0,32 |

Таблица 14

Режимы резания при шлифовании твердых сплавов, рекомендуемые ОАО «Полтавский алмазный инструмент»

1. Окружная скорость инструмента, м/с

| Вид шлифования | Органические связки | | Металлические связки | |
|---------------------|---------------------|---------|----------------------|---------|
| | Сухое | Мокрое | Сухое | Мокрое |
| Плоское | | 20...30 | | 20...25 |
| Круглое внутреннее | 8...12 | 10...20 | 8...12 | 12...20 |
| Круглое наружное | | 20...30 | | 12...20 |
| Заточка инструмента | 15...22 | 18...28 | 8...12 | 12...20 |

2. Глубина t , продольная $S_{\text{прод}}$, поперечная $S_{\text{поп}}$ подачи и окружная скорость $V_{\text{окр}}$ заготовки / инструмента

| Вид шлифования | Зернистость алмазного круга | t , мм | $S_{\text{прод}}$, м/мин | $S_{\text{поп}}$ | $V_{\text{окр}}$, м/мин |
|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| Плоское | 250/200...160/125 | 0,01...0,02 | 10...20 | 1/5...1/3 ширины абразивного слоя | -- |
| | 125/100...80/63 | 0,007...0,01 | 10...20 | 1/5...1/3 ширины абразивного слоя | -- |
| | 80/63...50/40 | 0,005...0,007 | 10...20 | 1/5...1/3 ширины абразивного слоя | -- |
| Круглое наружное | 250/200...160/125 | 0,015...0,03 | 0,5...2,0 | -- | 20...40 |
| | 125/100...80/63 | 0,009...0,010 | 0,5...2,0 | -- | 20...40 |
| | 80/63...50/40 | 0,005...0,008 | 0,5...2,0 | -- | 20...40 |
| Круглое внутреннее | 250/200...100/80 | 0,007...0,02 | 0,3...3,0 | -- | 20...40 |
| | 80/63...50/40 | 0,001...0,007 | 0,3...3,0 | -- | 20...40 |
| Заточка инструмента | 250/200...160/125 | 0,01...0,03 | 0,5...3,0 | -- | -- |
| | 125/100...80/63 | 0,008...0,02 | 0,5...3,0 | -- | -- |
| | 80/63...50/40 | 0,005...0,009 | 0,5...3,0 | -- | -- |

Шлифование твердых сплавов на шлифовально-заточных станках с ЧПУ с целью предотвращения засаливания кругов и появления прижогов осуществляют с применением многофункциональных СОЖ, т. е. жидкостей, которые можно использовать как для шлифования твердых сплавов, так и быстрорежущей стали. Например, фирма *Walter* для этой цели рекомендует использовать на своих станках маловязкую ($v_{20^{\circ}\text{C}} = 12 \text{ мм}^2/\text{с}$, $v_{40^{\circ}\text{C}} = 6 \text{ мм}^2/\text{с}$) масляную СОЖ марки *Iono Grind* фирмы *Oelheld* (Германия). Можно также использовать масляную СОЖ марки *TRIM[®]OG108* фирмы *Master Chemical* (Великобритания) и другие жидкости.

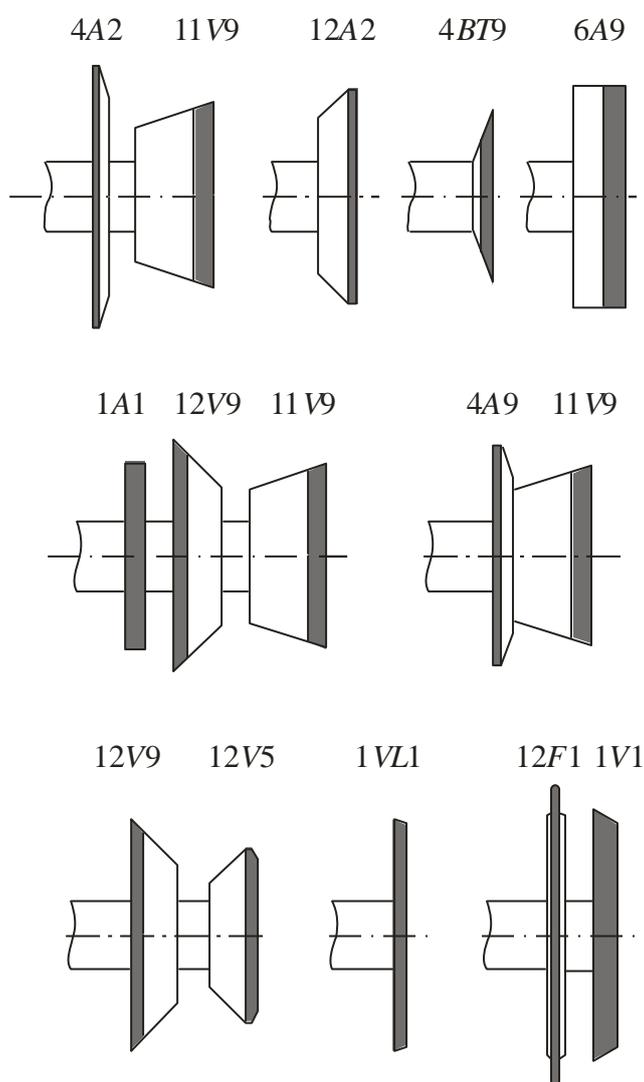


Рис. 17. Примеры возможных комбинаций форм алмазных кругов на пятикоординатных шлифовально-заточных станках с ЧПУ

Важным средством повышения износостойкости режущих инструментов является модификация их рабочих поверхностей путем нанесения износостойких покрытий (рис. 18). В последнее время в инструментальной промышленности все большее применение находит метод физического осаждения покрытий в вакууме – *PVD (Physical Vapour Deposition)* [16]. Это объясняется следующими его достоинствами:

1. Высокая производительность (скорость осаждения до 40 мкм/ч);
2. Можно получать одно- и многослойные покрытия практически любого состава, в т. ч. с алмазоподобной и наноразмерной структурами;
3. Метод реализуется при температуре 500...600 °С, что позволяет применять его для инструментов из быстрорежущей стали, твердых сплавов и керамики;
4. Высокая прочность адгезионной связи покрытия с инструментальной подложкой, которая обеспечивается благодаря наличию на границе раздела «инструментальный материал–покрытие» переходного металлического подслоя, формируемого при очистке поверхности инструмента бомбардировкой ионами материала катода.

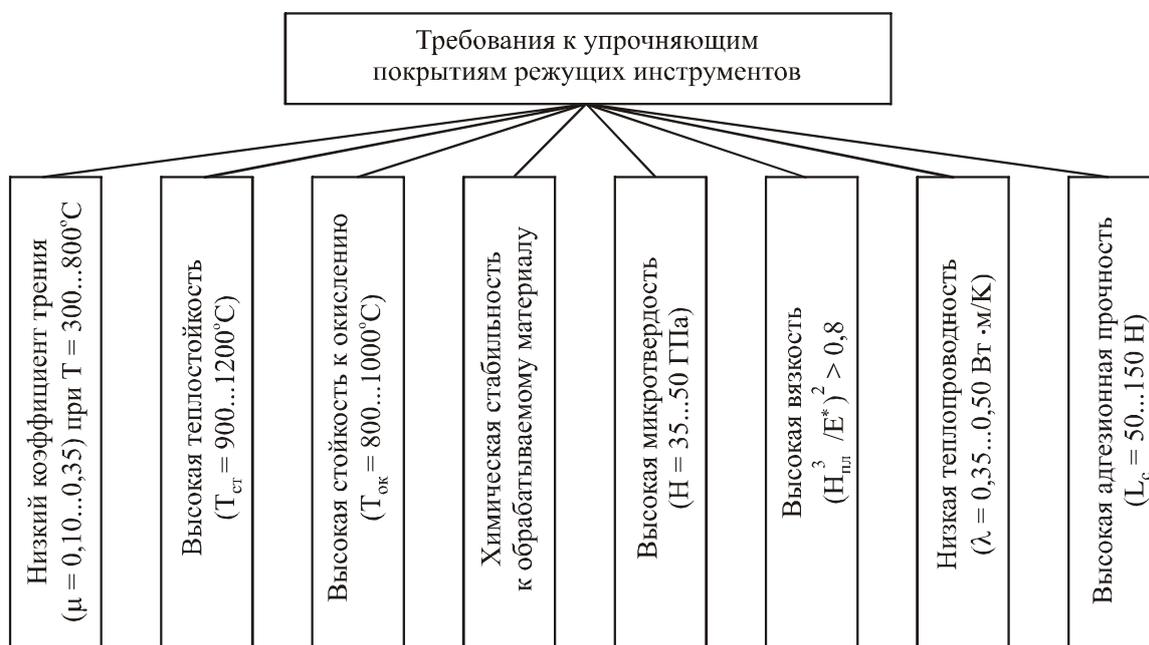


Рис. 18. Требования к упрочняющим покрытиям режущих инструментов

В основе *PVD*–метода обычно лежит испарение (распыление) вещества в вакуумной камере, с последующей ионизацией частиц, ускорением в электрическом или магнитном поле по направлению к покрываемой поверхности и их конденсацией на этой поверхности в присутствии реакционного газа. В качестве испаряемого вещества обычно используют такие тугоплавкие металлы, как, например, Ti, Cr, Mo, Zr, Al и др., а в качестве реакционных газов применяют азот, метан, кислород. В результате получают покрытия соответственно в виде нитридов, карбидов, карбонитридов или оксикарбидов тугоплавких металлов (табл. 15).

Таблица 15

Характеристика покрытий, получаемых методом *PVD*

| Покрытие | Цвет | Твердость HV*, ГПа | Коэффициент трения по стали 45 | Температура начала окисления на воздухе, °С |
|---------------|--------------------------|--------------------|--------------------------------|---|
| TiN | золотистый | 23...25 | 0,55 | 550...600 |
| TiCN | серо-голубой | 35...37 | 0,2 | 400 |
| (Ti, Al)N | фиолетово-черный | 31...35 | 0,6 | 800...850 |
| (Ti, Al)CN | фиолетово-красный | 35...37 | 0,25 | 500 |
| CrN | серебристо-металлический | 12...14 | 0,3 | 650 |
| ZrN | золотисто-белый | 26...28 | 0,5 | 550 |
| (Ti, Cr)N | золотисто-серый | 18...20 | 0,5 | 700 |
| (Ti, Al, Cr)N | бронзовый | 28...30 | 0,4 | 850...900 |

* Так как твердость может варьироваться в широком диапазоне и зависит от режимов осаждения и химического состава покрытия, в таблице представлены данные об оптимальной твердости, рекомендуемой для покрытий на режущий инструмент

Рекомендации по применению различных покрытий, в том числе многослойных, полученных физическим осаждением, в зависимости от вида режущего инструмента и обрабатываемого материала представлены в табл. 16 [16].

Рекомендации по применению *PVD*–покрытий

| Обрабатываемый материал | Виды инструментов | | | |
|-------------------------|---|--|---|------------------------|
| | Фрезы | Сверла, зенкеры | Метчики | Развертки |
| Сталь | (Ti, Cr)N, (Ti, Al)CN | TiN, TiCN, (Al, Ti,)N | (Nb, Zr)N, TiCN, (Al, Ti,)N | (Ti, Al)CN, (Al, Ti,)N |
| Чугун | (Ti, Cr)N, (Ti, Al)N | (Ti, Al)N, (Ti, Zr)N, | (Al, Ti,)N, (Nb, Zr)N | (Al, Ti,)N |
| Алюминиевые сплавы | MoS ₂ , (Ti, Cr)N, (Ti, Cr)N+MoS ₂ | TiN, TiCN, MoS ₂ , (Ti, Cr)N, (Ti, Cr)N+ MoS ₂ | MoS ₂ , (Ti, Cr)N+ MoS ₂ | (Ti, Mo)N, TiCN |
| Титановые сплавы | (Hf, Zr, Cr)N, CrN, (Al, Cr)NC | MoS ₂ , (Al, Ti,)N, (Cr, Al)N+ MoS ₂ , (Hf, Zr, Cr)N | MoS ₂ , TiCN+MoS ₂ | (Hf, Zr, Cr)N |
| Никелевые сплавы | (Ti, Cr)N, (Hf, Zr, Cr)N | (Al, Ti,)N | (Ti, Zr)N | (Ti, Nb, Al)N |
| Медь | CrN | CrN | CrN | (Ti, Cr)N |
| Латунь, бронза | TiCN, (Al, Ti,)N, (Ti, Cr)N | TiCN, (Al, Ti,)N, (Nb, Zr)N | TiCN | TiCN |
| Пластик | TiCN, (Ti, Al)N | TiCN, (Ti, Al)N | TiCN, (Ti, Al)N | TiCN, (Ti, Al)N |

В настоящее время весьма перспективными при обработке цветных металлов и сплавов являются алмазоподобные покрытия – *DLC* (*Diamond Like Coating*). Технология нанесения таких покрытий сводится, например, к плазменному распылению углерода (графита) в вакуумной камере и осаждению ионов углерода с большой энергией на режущий инструмент [17]. В результате на рабочей поверхности инструмента образуется аморфное покрытие, состоящее из атомов углерода, как с алмазными (SP^3), так и с графитоподобными (SP^2) связями. Высокое (до 85 %) содержание атомов углерода с алмазными связями в присутствии графитоподобных связей приводит к появлению уникальных характеристик алмазоподобных покрытий: а) высокая (HV 5000...10000 Гпа) твердость, сравнимая с чистым алмазом; б) низкий (0,15...0,08) коэффициент трения, характерный для графита; в) высокая износостойкость и теплопроводность; г) химическая инертность по отношению к обрабатываемым материалам, не содержащим железа.

При этом толщина одно- и многослойных покрытий находится в пределах от ангстрем до нескольких микрометров.

Одной из проблем, имеющей место при нанесении алмазоподобных покрытий, является негативное влияние кобальтовой связки на адгезионное взаимодействие покрытия с твердосплавной подложкой. Для борьбы с этим недостатком требуется специальная предварительная обработка рабочей части твердосплавного инструмента. Например, в работе [18] предлагается следующая технология подготовки инструмента для нанесения алмазоподобного покрытия. Сначала поверхность инструмента травят в щелочном растворе для образования грубой шероховатой поверхности, обеспечивающей более прочное механическое сцепление покрытия с подложкой. Затем с этой поверхности удаляют кобальт травлением в кислотном растворе. После этого обработанная подложка борировается для образования промежуточного слоя, действующего как диффузионный барьер, предотвращающий диффузию кобальта в покрытие. И только после этого наносится алмазоподобное покрытие, поверхность которого характеризуется очень низкой шероховатостью.

Маркируют цельные твердосплавные осевые инструменты лазерным способом благодаря его высокой производительности и качеству, отсутствию механического воздействия на инструмент, легкости управления и возможности автоматизации.

Консервацию и упаковку инструментов с целью обеспечения их сохранности при транспортировке и хранении осуществляют в соответствии с ГОСТ 9.014–78 «Временная противокоррозионная

защита изделий», упаковывая инструменты в пластиковые многократно используемые пеналы следующих типов:

- КвадроПак – квадратные, со ступенчатым изменением длины;
- РектоПак – прямоугольные, со ступенчатым изменением длины;
- ВинтоПак – круглые, с бесступенчатым изменением длины (шестигранный торец предотвращает раскатывание);
- ТелеПак – круглые, со ступенчатым изменением длины (квадратный торец предотвращает раскатывание);
- ПробоПак – круглые, с крышкой-пробкой (различной фиксированной длины, квадратный торец предотвращает раскатывание);
- ФиксоПак – круглые, с резьбовым замком, фиксированной длины;
- СплитПак – многоместные, со съемными секциями на 5 и 6 инструментов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1.

Некоторые современные направления совершенствования обработки материалов резанием

Продукция современного машиностроения характеризуется использованием высокопрочных и труднообрабатываемых материалов, резким повышением требований к точности и качеству изделий и значительным усложнением конструктивных форм деталей машин, получаемых обработкой резанием. Поэтому процесс механической обработки требует постоянного совершенствования. В настоящее время наиболее перспективными направлениями такого совершенствования являются: а) высокоскоростная обработка; б) «сухая» обработка; в) «твердая» обработка.

Исследования в этих направлениях ведутся уже давно, но лишь успехи последних лет в области создания новых инструментальных материалов и высокоэффективных конструкций металлорежущих станков и оснастки позволили достигнуть значительных практических результатов.

Высокоскоростная обработка – это обработка, при которой скорость резания в 3...5 раз и более превышает скорость обычной обработки (табл. П 1.1). Она экономически целесообразна при чистовой обработке заготовок, имеющих большое количество поверхностей, для обработки которых необходимо малое время, частые изменения позиционирования узлов станка и смена инструментов. Для этого требуется применение весьма жестких и виброустойчивых станков с частотой вращения шпинделей 15000...20000 мин⁻¹ и более, оснащенных линейными двигателями для ускоренных вспомогательных перемещений.

Высокоскоростная обработка по сравнению с обычной обработкой имеет следующие преимущества: а) бóльшая производительность; б) бóльшая точность и низкая шероховатость обработанной поверхности; в) возможность обработки тонкостенных заготовок из-за малых сил резания, так как снимаются тонкие стружки; г) хорошие стружкодробление и стружкоотвод; д) отсутствие тепловых деформаций заготовок.

Таблица П. 1.1

Скорость резания при обычной
и высокоскоростной обработках (ВСО)

| Обрабатываемый материал | | Стандартные твердосплавные инструменты (концевые фрезы и сверла) | | Специальные инструменты (профильные и торцовые фрезы) | |
|-------------------------|------------------------------|---|-------|--|-------|
| | | Скорость резания, м/мин | | | |
| | | обычная | ВСО | обычная | ВСО |
| Алюминиевые сплавы | | >305 | >3050 | >610 | >3658 |
| Чугун | мягкий | 152 | 366 | 366 | 1219 |
| | обычный | 107 | 244 | 244 | 914 |
| Сталь | конструкционная | 107 | 366 | 366 | 610 |
| | легированная | 76 | 244 | 213 | 366 |
| | нержавеющая | 107 | 152 | 152 | 274 |
| | закаленная ($< HRC 65$) | 24 | 122 | 30 | 136 |
| Титановые сплавы | | 38 | 61 | 46 | 91 |

К недостаткам высокоскоростной обработки относятся: а) высокая стоимость станков; б) невозможность изготовления нетехнологичных деталей; г) для каждой заготовки из-за сложности конфигурации необходимо назначать свои режимы резания; д) инструменты с частотой вращения более 8000 мин^{-1} требуют динамической балансировки и специальных патронов для их крепления.

Идею о возможности высокоскоростной обработки впервые высказал в 1931 г. С. Salomon (Германия). Исследуя отрезку алюминиевых листов дисковой фрезой большого диаметра, он пришел к выводу, что с увеличением скорости резания температура сначала резко возрастает, а затем также резко падает (рис. П. 1.1). Это позволило ему предположить, что для каждого обрабатываемого материала существуют две критические скорости v_1 и v_2 , ограничивающие диапазон скоростей, в котором из-за слишком высоких температур процесс резания невозможен.

Уменьшение температуры резания на правой ветви этой кривой акад. В.Д. Кузнецов объяснял тем, что с ростом скорости резания (деформации) предел текучести обрабатываемого материала приближается к его пределу прочности и металл становится хрупким. В результате объем пластических деформаций, а, следовательно, и количество выделяющейся теплоты уменьшается.

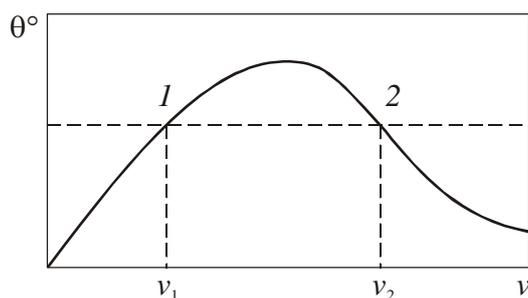


Рис. П. 1.1. Влияние скорости резания на температуру (С. Salomon)

При резании пластичных металлов с ростом скорости резания изменяется характер образования стружки: сливная стружка постепенно переходит в суставчатую стружку, а затем в элементную. М.И. Клушин объяснял это эффектом адиабатического разогревания зоны сдвига теплотой, образуемой при пластическом деформировании слоя, срезаемого с высокой скоростью деформации. В этом случае выделившаяся теплота локализуется в тонком сдвигаемом слое и тем самым способствует интенсификации разрушения срезаемого слоя в процессе его деформирования. В результате локализованной остается также и деформация, нераспространяющаяся в окружающий металл, и сопротивление деформации уменьшается. Таким образом, имеет место так называемый локальный высокотемпературный сдвиг, который приводит к нарушению сплошности стружки с образованием суставов и элементов. При этом, чем выше скорость резания, тем выше скорость деформации и тем вероятнее действие разрушающего сдвига, приводящее к цикличности процесса стружкообразования.

Адиабатическим разогреванием зоны сдвига объясняется также влияние переднего угла режущего клина и толщины срезаемого слоя на тип стружки. Сливная стружка будет превращаться в суставчатую и элементную при тем меньшей скорости резания, чем больше толщина срезаемого слоя и меньше передний угол, то есть чем выше температура резания.

При высокоскоростной обработке скорость резания превышает скорость распространения теплоты и поэтому основная доля теплоты уходит в стружку, а в заготовку и инструмент теплота почти не поступает. В результате стойкость инструмента увеличивается, а тепловые деформации заготовки уменьшаются.

В качестве инструментальных материалов для высокоскоростной обработки применяют мелкозернистые и особомелкозернистые твердые

сплавы группы ВК, в том числе с одно- и многослойными покрытиями, а также режущую керамику и СТМ.

«Сухая» обработка – это лезвийная обработка материалов без применения СОЖ или с применением альтернативных СОЖ (аэрозоль, воздух и т. д.). Последние применяют в тех случаях, когда полный отказ от СОЖ невозможен, например, при сверлении, растачивании, резьбонарезании и др.

Все большее применение «сухой» обработки вызвано ростом расходов на приобретение, эксплуатацию и утилизацию СОЖ, а также ее неблагоприятным воздействием на организм человека и окружающую среду.

Наиболее легко без СОЖ обрабатывается чугуны, несколько труднее – углеродистые стали и еще труднее – коррозионно-стойкие стали.

«Сухая» обработка труднообрабатываемых материалов приводит к снижению стойкости инструментов и ухудшению качества обработанной поверхности. Это является следствием высоких температур резания, трения и адгезионного взаимодействия между инструментальным и обрабатываемым материалами. В результате усиливаются процессы адгезионного, усталостного и абразивного износов и деформации режущего клина. При этом обычно образуется сливная или путанная стружка, затрудняющая ее отвод из зоны резания.

В качестве альтернативной СОЖ используют, например, аэрозоль, состоящую из воздушной среды, подаваемой в зону резания под давлением 0,05...0,6 МПа, в которой взвешены частицы СОЖ, расходуемые в количестве 5...30 мг/ч. Такого объема СОЖ часто бывает вполне достаточно для значительного снижения в зоне резания сил трения и адгезионного взаимодействия и, как следствие, температуры резания. При этом предотвращается налипание стружки на режущие кромки инструмента.

Охлаждение зоны резания осуществляют и дозированной подачей СОЖ в виде микрокапсул. В результате уменьшается выброс в атмосферу вредных веществ, технологические характеристики процесса резания не ухудшаются, упрощается утилизация и сокращаются расходы на СОЖ.

При «сухом» электростатическом охлаждении режущих инструментов воздух активируют непрерывным электрическим разрядом коронного типа. В результате воздух ионизируется, насыщается озоном и охлаждается. Озон является сильным окислителем и попадая при обработке на поверхности металла приводит к образованию оксидной пленки. Ионизированный охлажденный воздух

обладает бóльшей проникающей способностью, чем СОЖ и оказывает значительное воздействие на процессы контактного взаимодействия в зоне резания. Метод сохраняет технологические показатели, обеспечиваемые СОЖ, улучшает санитарно-гигиенические условия, а также сокращает эксплуатационные расходы.

Инструментальные материалы для «сухой» обработки должны обладать повышенными теплостойкостью, твердостью, износостойкостью и пределом прочности на изгиб. Такие свойства имеют твердые сплавы группы ТТК, а также мелкозернистые и особомелкозернистые твердые сплавы группы ВК, в том числе с одно- и многослойными покрытиями.

Очень хорошие результаты получают при использовании режущей керамики и СТМ.

«Твердая» обработка – это лезвийная обработка металлов, закаленных до твердости *HRC* 47...70. Она осуществляется без применения СОЖ, так как в противном случае из-за тепловых ударов резко снижается стойкость инструментов.

При «твердой» обработке благодаря специально подобранной геометрии режущего клина и режиму обработки в зоне резания металла, например твердостью *HRC* 62, выделяется такое большое количество теплоты, что происходит местный отпуск металла до твердости *HRC* 25. При этом основная доля теплоты отводится стружкой, а заготовка и инструмент почти не нагреваются. В результате твердость детали уменьшается примерно на *HRC* 2, а твердость стружки становится равной *HRC* 45.

«Твердую» обработку чаще всего применяют вместо шлифования с целью уменьшения трудоемкости изготовления деталей и, как следствие, увеличения на 30...50 % экономичности процесса обработки. Это достигается благодаря следующим достоинствам «твердой» обработки: 1) более высокая производительность за счет высоких скоростей резания и уменьшения вспомогательного времени; 2) проще наладка станков; 3) экологичность из-за отсутствия СОЖ; 4) отсутствие прижогов; 5) бóльшая точность обработки, так как малы температурные деформации заготовок.

Высокие температурные (около 1500°C) и силовые (до 20 кН/мм²) нагрузки, характерные для «твердой» обработки, вызывают большой износ режущего клина и, как следствие, появление на обработанной поверхности так называемого «белого слоя». Последний имеет более высокую, чем обрабатываемый металл, твердость и неблагоприятные растягивающие напряжения, которые возникают из-за высоких температур и быстрого охлаждения заготовки.

При «твердой» обработке высокая температура с одной стороны облегчает процесс резания, приводя к разупрочнению металла в зоне резания и, тем самым, снижает силу резания, а с другой – отрицательно влияет на стойкость инструмента.

В зависимости от твердости обрабатываемых металлов при «твердой» обработке применяют следующие инструментальные материалы:

а) *металлы твердостью менее HRC 40* – мелкозернистые твердые сплавы с покрытиями и без них, так как они хорошо сопротивляются абразивному износу, обладают высокими теплостойкостью и стойкостью к пластическим деформациям;

б) *металлы твердостью HRC 40...50* – твердые сплавы, режущая керамика и КНБ. В этом случае инструментальные материалы выбирают исходя из экономических расчетов, так как твердые сплавы имеют низкую теплостойкость, а режущая керамика и КНБ разрушаются в виде сколов, вызванных срывающимся наростом, столь характерным для обработки этих металлов. Поэтому применяют либо твердосплавные инструменты, имеющие низкую размерную стойкость и производительность, либо инструменты из режущей керамики и КНБ, рискуя работать с поломкой пластин;

в) *металлы твердостью HRC 50...70* – режущая керамика и КНБ. Режущая керамика обеспечивает бóльшую шероховатость обработанной поверхности (Ra 0,6 мкм), чем КНБ (Ra 0,3 мкм). Это объясняется тем, что для КНБ характерен равномерный износ по задней поверхности, а для режущей керамики – микровыкрашивания. Поэтому пластины из КНБ сохраняют режущие кромки непрерывными и это позволяет достигать меньшей шероховатости обработанной поверхности.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

Шлифовально-заточные станки с ЧПУ, выпускаемые в странах Союза независимых государств (СНГ)

В странах СНГ шлифовально-заточные станки с ЧПУ выпускает ОАО Визас (Беларусь) (рис. П. 2.1, табл. П. 2.1). Более подробно станки этого производителя рассмотрим на примере пятикоординатного шлифовально-заточного станка модели ВЗ-454Ф4 [19]. У этого станка шлифовальный круг совершает главное движение и поступательно перемещается по оси Z за счет движения стола станка по поперечным направляющим. Угловая координата B обеспечивается поворотом стола вокруг оси Y (рис. П. 2.2).

Кинематическая схема станка, его конструктивные составляющие, пульт управления и информация о кнопках пульта управления представлены соответственно на рис. П. 2.3, в табл. П. 2.2, на рис. П. 2.4 и в табл. П. 2.3.



Рис. П. 2.1. Общий вид шлифовально-заточных станков с ЧПУ
ОАО Визас (Беларусь):
a – модель ВЗ-531Ф4; *б* – модель ВЗ-454Ф4

Таблица П. 2.1

**Основные технологические характеристики пятикоординатных
шлифовально-заточных станков с ЧПУ ОАО Визас**

| Технические характеристики | Модель станка | |
|---|--|---------------------------------|
| | ВЗ-454Ф4 | ВЗ-531Ф4 |
| Размер заготовок: диапазон диаметров отверстий цанг, мм наибольший диаметр заготовок, мм | 2...25 200 | 250 |
| Наибольшая длина заготовки, устанавливаемой в цанговом патроне /в центрах, мм | 160/- | 180/400 |
| Расстояние от зеркала поворотного стала до оси бабки изделия, мм | 125±0,8 | - |
| Наибольший диаметр шлифовального круга, мм | 150 | |
| Частота вращения шлифовального круга, мин ⁻¹ | 0...6000 | |
| Количество управляемых осей координат: всего (с применением УЧПУ SINUMERIK 802DSL/840DSL) одновременно | -5 | 4/5 |
| Наибольшее рабочее перемещение по управляемым осям координат: продольное шлифовальной головки / стола (ось X), мм поперечное бабки изделия/каретки (ось Z), мм вертикальное шлифовальной головки/суппорта (ось Y), мм угол поворота шпинделя бабки изделия (ось A), град угол поворота бабки изделия/шлифовального круга (ось B), град | 200±10 200±10 200±10 не ограничен 240±10 | 630 320 320 +60...-240 |
| Дискретность задания перемещений по осям координат: линейных, мм угловых, град | 0,001 0,001 | |
| Мощность электродвигателя шлифовального круга, кВт | 2,2 | 3,0 |
| Габаритные размеры (с отдельно расположенным оборудованием/без отдельно расположенного оборудования) длина × ширина × высота, мм | 1350×3000 ×2020 | 2500×2680 ×2350 |
| Масса, кг | 3500 | 7000 |

Конструктивно этот станок состоит из следующих основных узлов:

- станина – жесткая, виброустойчивая, оребренная конструкция, наполненная модифицированным бетоном;

- каретки – поперечная (ось Z), продольная (ось X), колонна (ось Y); корпуса чугунные; бескачковые прецизионные шариковые линейные направляющие качения с предварительным натягом; прецизионные шариковые винтовые пары с предварительным натягом; движение кареток обеспечивается синхронными электродвигателями с цифровыми приводами;
- поворотный стол (ось B) – корпус чугунный; беззазорная высокоточная червячная передача (зазор устраняется с помощью червяка с прогрессивным шагом); прецизионные подшипники качения имеют предварительный натяг; движение стола обеспечивается синхронным электродвигателем с цифровым приводом;
- бабка изделия (ось A) – корпус чугунный; высокоточная червячная передача с выборкой зазора упругим элементом; шпиндель базируется на прецизионных подшипниках качения с предварительным натягом (его вращение обеспечивается синхронным электродвигателем с цифровым приводом от встроенного высокомоментного двигателя–тормотора); круговой датчик обеспечивает измерения угла поворота двигателя с точностью $\pm 30''$;
- шлифовальная головка (мотор-шпиндель) – базируется на высокоскоростных прецизионных дуплексных шарикоподшипниках с предварительным натягом; частотный привод позволяет плавно регулировать частоту вращения шлифовального шпинделя;
- механизм правки абразивных кругов – состоит из прецизионного шпинделя, приводного электродвигателя и устанавливается на столе станка; правка абразивных кругов осуществляется координатным перемещением круга относительно вращающегося алмазного ролика; правка алмазных кругов чаще всего выполняется вне станка с ЧПУ круглым шлифованием, когда алмазный круг медленно вращается и играет роль заготовки, а инструментом служит абразивный круг из карбида кремния зеленого;
- устройство предварительной ориентации заготовок – выполнено на базе трехмерного датчика *TS230* фирмы *Heidenhain* (Германия), который автоматически, в соответствии с управляющей программой, осуществляет следующие функции: а) угловую и осевую привязки изготавливаемого (затачиваемого) инструмента к станочной системе координат;

- б) измерение неизвестных параметров инструмента (углы γ , α , ω и др.);
- системы подачи, очистки СОЖ, отвода и фильтрации аэрозоли – выполнены на базе резервуара и включает насос ($P = 0,5$ МПа), лентопротяжное устройство и бумажный фильтр; обеспечивают гигиенические нормы эксплуатации станка (в качестве СОЖ рекомендуется применять минеральные или синтетические углеводородные масла вязкостью $\nu_{40^{\circ}\text{C}} = 5 \dots 8 \text{ мм}^2/\text{с}$ (И5А, Велосит 7–ТНК, *HM-Sintogrind* и др.);
 - ограждение рабочей зоны – кабинного типа с поворотными дверями спереди и с боков станка; внутри ограждения установлено освещение;
 - устройство ЧПУ (модель *SINUMERIK 840 DSL* фирмы *SIEMENS*) – осуществляет управление позиционированием по пяти осям; в качестве исполнительного привода используется цифровой привод с синхронным электродвигателем; имеет мощную систему диагностики и визуализации; позволяет выводить на дисплей любую информацию, необходимую оператору для контроля за процессом изготовления (заточки) инструмента.

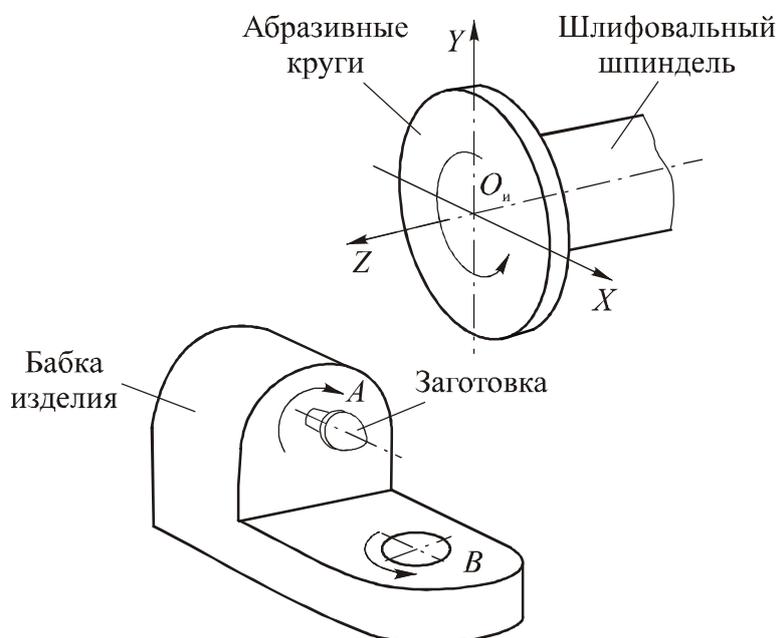


Рис. П. 2.2. Система координат шлифовально-заточного станка с ЧПУ модели ВЗ-454Ф4 ОАО Визас

Конструктивные составляющие шлифовально-заточного
станка с ЧПУ модели ВЗ-454Ф4 ОАО Визас

| Позиция | Назначение |
|------------------|--|
| 4; 9; 15; 12; 21 | Электродвигатели, играющие роль приводов в кинематических цепях |
| 8; 10; 13 | Ходовые винты, входящие в состав шарико-винтовых пар (ШВП), которые с использованием беззазорных муфт соединяются с валами электродвигателей |
| 7; 11; 14 | Шарико-винтовые гайки, обеспечивающие совместно с ходовыми винтами беззазорность и натяг в ШВП |
| 17; 18 | Червяки беззазорных червячных передач, соединенные с червячным колесом 16, обеспечивающим вращение заготовки относительно своей оси (угловая координата) |
| 19; 20 | Конические колеса, передающие вращение от червяка 17 на червяк 18 |
| 22; 23 | Червячная передача, обеспечивающая поворот бабки изделия 27 относительно вертикальной оси (угловая координата) |
| 16 | Червячное колесо, обеспечивающее вращение заготовки вокруг ее оси |
| 1 | Электродвигатель, обеспечивающий главное движение – вращение шлифовального круга |
| 2; 3 | Ременная передача, обеспечивающая за счет смены шкивов необходимую частоту вращения шлифовального круга |
| 5 | Колонна вертикальная, обеспечивающая подачу по оси Y , на которой располагается шпиндель главного движения |
| 24 | Станина с расположенными на ней направляющими продольной (ось X) и поперечной подачи (ось Z) |
| 25 | Направляющие продольной подачи |
| 26 | Направляющие поперечной подачи |

В комплекте со станком поставляется система подготовки управляющих программ, реализованная на базе персонального компьютера. Она представляет собой *WINDOWS*-приложение, имеет дружелюбный интерфейс и работает независимо от станка.

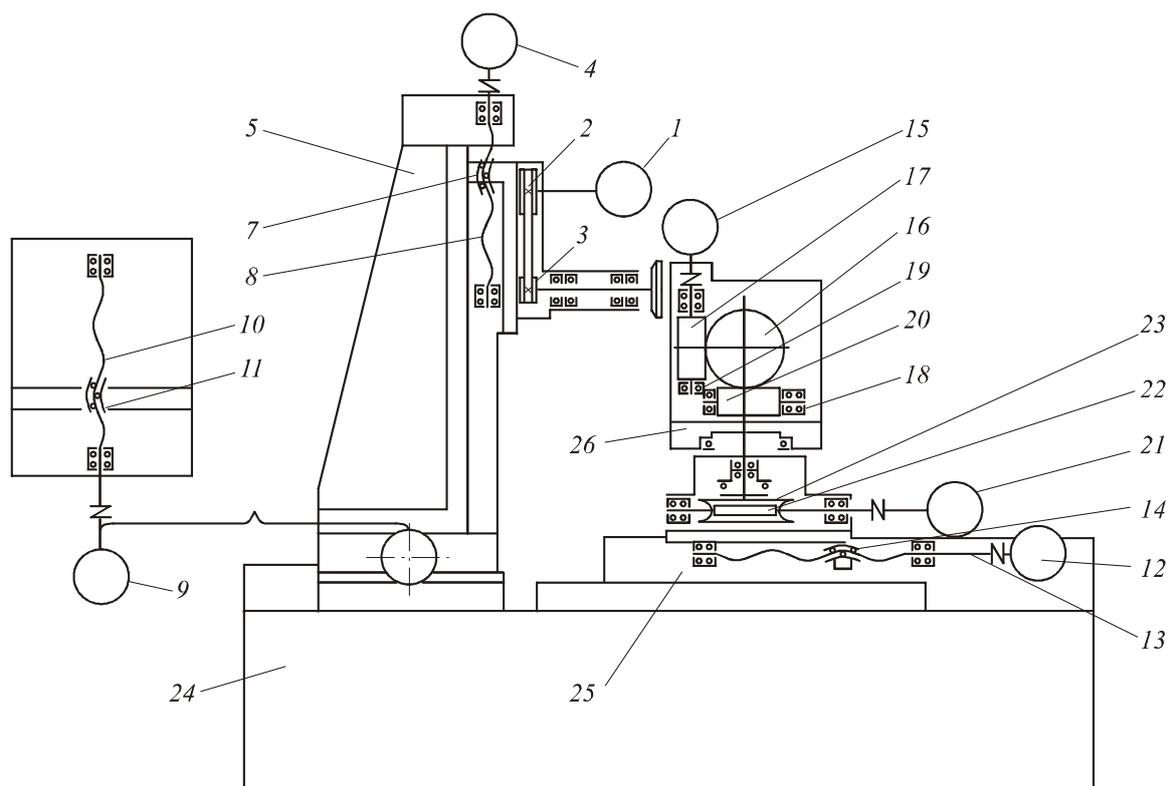


Рис. П. 2.3. Кинематическая схема станка модели ВЗ-454Ф4 ОАО Визас

Создание управляющей программы для изготовления (заточки) осевых режущих инструментов происходит автоматически и производится в следующей последовательности [19]:

- 1) Вводятся исходные данные исходя из чертежа инструмента и геометрических параметров набора алмазных кругов, которыми будет осуществляться изготовление (заточка) инструмента.
- 2) Производится математическое моделирование процесса шлифования стружечной канавки и его результаты выводятся на дисплей УЧПУ в виде радиального сечения инструмента.
- 3) Рассчитывается наладка и траектория движения алмазных кругов относительно заготовки таким образом, чтобы выдерживались все введенные параметры изготавливаемого (затачиваемого) инструмента (если моделируется процесс обработки нескольких поверхностей, то на экран можно выводить любую из этих поверхностей или их сечения).

- 4) Автоматически формируется управляющая программа изготовления (заточки) режущего инструмента и передается в УЧПУ станка. На станине предусмотрен режим моделирования, когда 3D-модель инструмента рассматривается под различными углами и в различных сечениях. Здесь же предусмотрена возможность измерения линейных и угловых параметров инструмента.

Разработанные для этого станка управляющие программы позволяют изготавливать (перетачивать) борфрезы, концевые цилиндрические и конические фрезы с прямыми и сферическими торцами, спиральные в т. ч. ступенчатые сверла, центровочные сверла, зенкеры и развертки и другие осевые режущие инструменты.

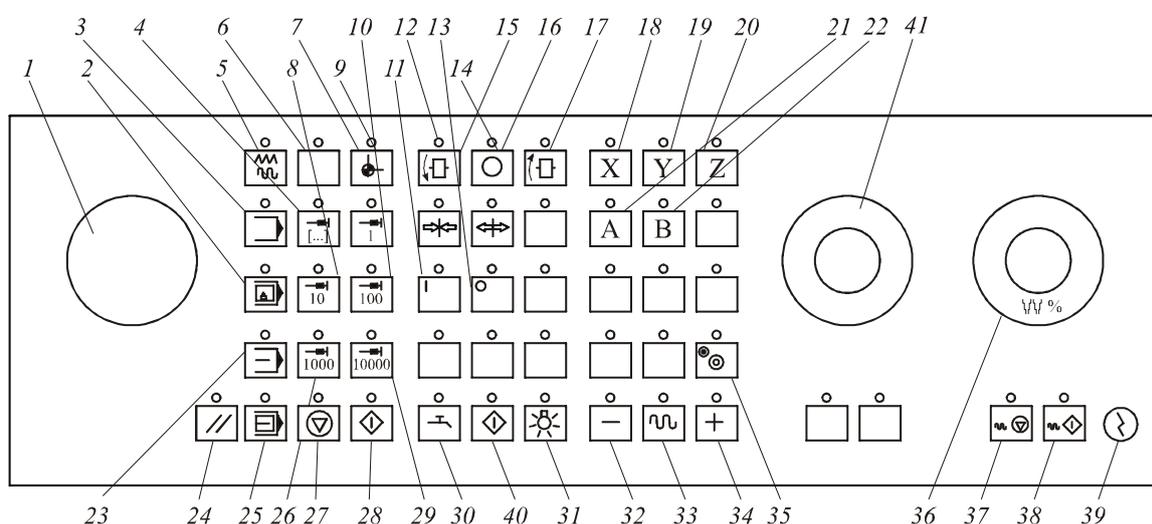


Рис. П. 2.4. Вид пульта управления шлифовально-заточного станка с ЧПУ модели ВЗ-454Ф4 ОАО Визас

В последнее время в России совместными усилиями ОАО НИПТИ «Микрон», ОАО «ВНИИинструмент» и МГТУ «Станкин» разработан шестикоординатный шлифовально-заточной станок с ЧПУ (рис. П. 2.5).

Станок состоит из ограниченного набора функциональных узлов, путем перекомпоновки которых в различных сочетаниях можно создавать значительное количество вариантов исполнения станка с различными технологическими возможностями.

Кнопки управления станком модели ВЗ-452Ф4 ОАО Визас

| Позиция | Кнопки управления и их назначение |
|---------|---|
| 1 | Кнопка аварийного отключения |
| 2 | Кнопка автоматического режима с ручным вводом данных (<i>MDA</i>) |
| 3 | Кнопка обучения (<i>TEACHIN</i>) |
| 4 | Кнопка изменяемой по величине дискретной подачи |
| 5 | Кнопка ручного режима (<i>JOG</i>) |
| 6 | Кнопка возврата на траекторию |
| 7 | Кнопка выхода в референтные точки полуавтомата |
| 8 | Кнопка дискретной подачи, равной 10 дискретам |
| 9 | Кнопка дискретной подачи, равной 1 дискрете |
| 10 | Кнопка дискретной подачи, равной 100 дискретам |
| 11 | Кнопка включения устройства правки алмазным роликом |
| 12 | Кнопка отключения устройства правки алмазным роликом |
| 13 | Кнопка «Зажим изделия» |
| 14 | Кнопка «Разжим изделия» |
| 15 | Кнопка «Пуск шлифовального круга влево» |
| 16 | Кнопка «Стоп шлифовального круга» |
| 17 | Кнопка «Пуск шлифовального круга вправо» |
| 18 | Кнопка ось <i>X</i> |
| 19 | Кнопка ось <i>Y</i> |
| 20 | Кнопка ось <i>Z</i> |
| 21 | Кнопка ось <i>A</i> |
| 22 | Кнопка ось <i>B</i> |
| 23 | Кнопка «Автомат» |
| 24 | Кнопка «Сброс» |
| 25 | Кнопка покадровой отработки программы |
| 26 | Кнопка дискретной подачи, равной 1000 дискретам |
| 27 | Кнопка «Стоп выполнения программы» |
| 28 | Кнопка «Пуск выполнения программы» |
| 29 | Кнопка дискретной подачи, равной 10 000 дискретам |
| 30 | Кнопка «Включение-отключение подачи СОЖ» |
| 31 | Кнопка «Включение-отключение освещения» |
| 32 | Кнопка перемещения по координатам в «-» |
| 33 | Кнопка ускоренного перемещения (при одновременном нажатии с кнопками 32 или 34) |
| 34 | Кнопка перемещения по координатам в «+» |
| 35 | Кнопка переключения систем координат «Деталь» и «Станок» |
| 36 | Переключатель регулирования контурной скорости |
| 37 | Кнопка «Стоп подачи» |
| 38 | Кнопка «Пуск подачи» |
| 39 | Гнездо ключевого переключателя (определяет степень доступа к станку) |
| 40 | Кнопка «Включение электроавтоматики» |
| 41 | Переключатель регулирования скорости вращения шлифовального круга |

Станина станка и перемещаемый по ней продольный суппорт, стойка, верхний, нижний суппорты имеют прецизионные предварительно натянутые роликовые линейные направляющие фирмы *Rexroth Bosch* (Германия).

Перемещение по линейным осям осуществляется линейными двигателями серии *1FN3* фирмы *Siemens* (Германия). Прямое измерение по осям производится оптическими линейками серии *LC483* фирмы *Heidenhain* (Германия) с разрешающей способностью 0,1 мкм и абсолютной шкалой.



Рис. П. 2.5. Шестикоординатный шлифовально-заточной станок модели С-300В ОАО НИПТИ «Микрон» (Россия)

На верхнем суппорте установлена бабка изделия. Вращательное движение заготовки при круглом шлифовании и координатное движение с интерполирующей осью B' реализуется от встроенного синхронного двигателя *1FE1082* фирмы *Siemens*. Переход от одного режима к другому осуществляется по М-функциям устройства числового программного управления (УЧПУ).

В станке имеются система жидкостного охлаждения статора электродвигателя и обдув конуса шпинделя при смене заготовки. На шпинделе бабки изделия закреплен правящий диск для автоматического профилирования и правки шлифовальных кругов.

Нижний суппорт, являясь исполнительным органом для перемещения заднего центра и/или люнета при обработке длинномерных заготовок. Усилие поджима заготовок задним центром задается параметрами в технологической программе УЧПУ.

В передней части станины установлено устройство поворота двухстороннего шлифовального мотор-шпинделя. Возможность поворота последнего позволяет производить пятикоординатную обработку детали. При этом поворот шпинделя осуществляется встроенным высокомоментным тороидальным двигателем 1FW6130 фирмы *Siemens* с водяным охлаждением. Поворотное устройство снабжено электромеханическим тормозом BFK458 фирмы *Lenze* (Германия) и датчиком обратной связи *Sigum* фирмы *Renishaw* (Германия).

Высокоточный двухсторонний шлифовальный мотор-шпиндель с встроенным синхронным двигателем 1FE1061 фирмы *Siemens* с водяным охлаждением оснащается двумя многоместными оправками под шлифовальные круги. Частота вращения шлифовального мотор-шпинделя находится в пределах 1400...9000 мин⁻¹.

Станок снабжен загрузочным устройством с двумя многоместными палетами. Смена заготовки производится координатным перемещением бабки изделия.

На станке применена контактная система измерения изготавливаемого/затачиваемого режущего инструмента MP250 фирмы *Renishaw*. Датчик этой системы установлен на корпусе шлифовального шпинделя и снабжен цилиндрическим или плоским измерительными щупами для определения размеров и углового положения режущих кромок изготавливаемого/затачиваемого инструмента.

Вторая контактная система измерения установлена на бабке изделия, снабжена измерительным щупом с рубиновым шариком и служит для контроля геометрических параметров шлифовальных кругов.

Система подачи СОЖ с рабочим давлением 0,55 МПа и расходом 80 л/мин снабжена ленточным фильтром фирмы *Astos* (Германия), обеспечивающим тонкость фильтрации жидкости 50 мкм. Для охлаждения СОЖ используется погружная система фирмы *Rittal* (Германия), мощностью теплосъема 4,6 кВт.

Охлаждение двигателей приводов главного движения и подач осуществляется от системы охлаждения той же фирмы с расходом жидкости 50 л/мин и мощностью теплосъема 12 кВт.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.

Нанесение износостойких покрытий на рабочие поверхности режущих инструментов вакуумно-плазменным (PVD) методом на установке ИСЭ СО РАН

В основе метода лежит процесс генерации металлической плазмы в вакууме сильноточным низковольтным разрядом (дугой), горящим в парах материала электрода. Испаряется этот материал, чаще всего, катодными пятнами вакуумной дуги в рабочее пространство вакуумной камеры с одновременной подачей реакционноспособных газов и последующей конденсации паров металлов либо их соединений с газами на рабочих поверхностях инструментов в условиях ионной бомбардировки последних.

Все процессы испарения, плазмохимических реакций, ионной бомбардировки и конденсации покрытия происходят в водоохлаждаемой вакуумной камере 1, металлический корпус которой служит анодом (рис. П. 3.1). Откачка из объема камеры осуществляется турбомолекулярным насосом. Электродуговой испаритель 2 выполнен в виде криволинейного плазмоведа и расположен на боковом фланце камеры. В результате продукты эрозии катода, разлетаясь изотропно, основной своей массой направлены перпендикулярно поверхности конденсации. Благодаря этому избавляются от появления капельной фракции на покрытии.

В зависимости от поставленной задачи сменные катоды испарителя могут быть выполнены практически из любого металла, в том числе и многокомпонентных сплавов (композиционные порошковые катоды), но обязательно должны быть электропроводящими. Газовое снабжение в рабочее пространство вакуумной камеры производится прецизионно с помощью двухканальной автоматической системы напуска рабочего газа в полость генератора газоразрядной плазмы 3, который размещен на верхнем фланце рабочей камеры. Для работы используются в основном два вида газа: аргон и азот. Для регулирования величины кинетической энергии ионов, извлекаемых из объемной плазмы дуговых разрядов, на образцы подается стационарное напряжение отрицательного смещения относительно анода в диапазоне значений от 20 до 1000 В. Высоковольтный источник питания, включающий в себя тиристорный преобразователь напряжения, трансформатор и выпрямитель, обеспечивает плавную регулировку напряжения смещения подложки. Для предотвращения длительного действия

возникающих спонтанно на обрабатываемых поверхностях режущих инструментов микродуг в источнике питания предусмотрена система дугогашения.

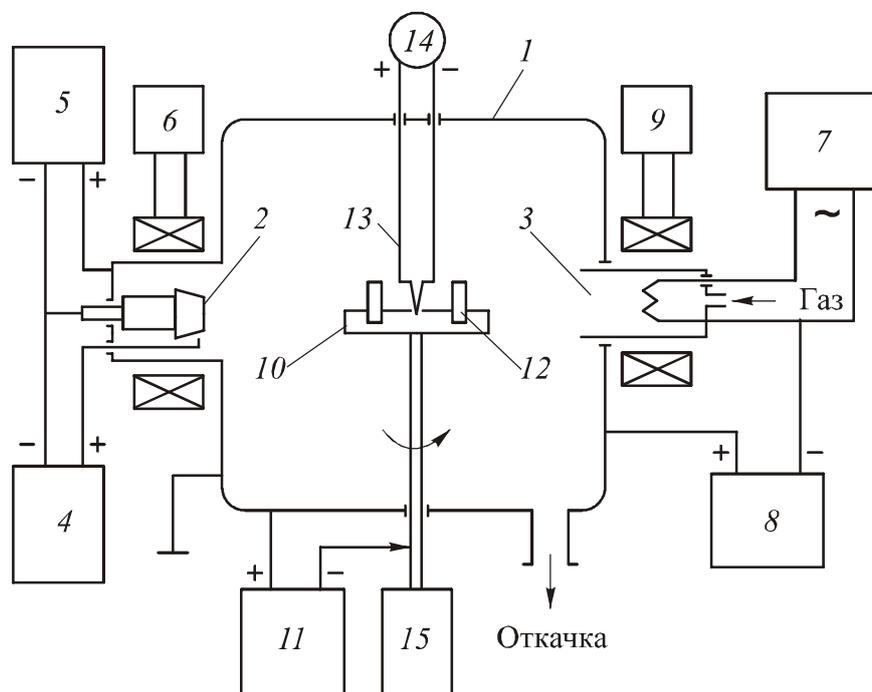


Рис. П. 3.1. Блок-схема установки ИСЭ СО РАН для нанесения износостойких покрытий: 1 – корпус вакуумной камеры; 2 – дуговой испаритель металла; 3 – плазмогенератор «ПИНК», источник низкотемпературной газовой плазмы; 4 – источник питания поджига дугового разряда испарителя; 5 – источник питания дугового разряда испарителя; 6 – источник питания катушек продольного магнитного поля; 7 – источник питания нити накала вольфрамового катода плазмогенератора «ПИНК»; 8 – источник питания дугового разряда плазмогенератора «ПИНК»; 9 – источник питания катушек продольного магнитного поля плазмогенератора «ПИНК»; 10 – вращающийся рабочий стол; 11 – источник напряжения смещения рабочего стола; 12 – образец; 13 – термопара; 14 – блок регистрации температуры образцов; 15 – электропривод вращения рабочего стола

Принцип действия плазмогенератора состоит в следующем. Эмитируемые накалившимся катодом электроны движутся вдоль силовых линий магнитного поля в направлении анода, роль которого выполняют заземленные стенки вакуумной камеры. Так как напуск рабочего газа производится в катодную полость, то вблизи накалившегося катода создается область повышенного давления. Наличие потока ускоренных

электронов, траектории которых удлиняются за счет магнитного поля, и области с повышенной концентрацией молекул рабочего газа облегчают зажигание и горение самостоятельного дугового разряда при низких давлениях. Разряд существует между катодом, которым являются как накаливаемая катодная нить, так и соединенная с ней катодная полость, и полым анодом с площадью, равной площади внутренней поверхности вакуумной камеры. Плазма, генерируемая таким разрядом, заполняет анодную полость, являясь рабочей средой для обработки поверхностей помещенных в нее режущих инструментов.

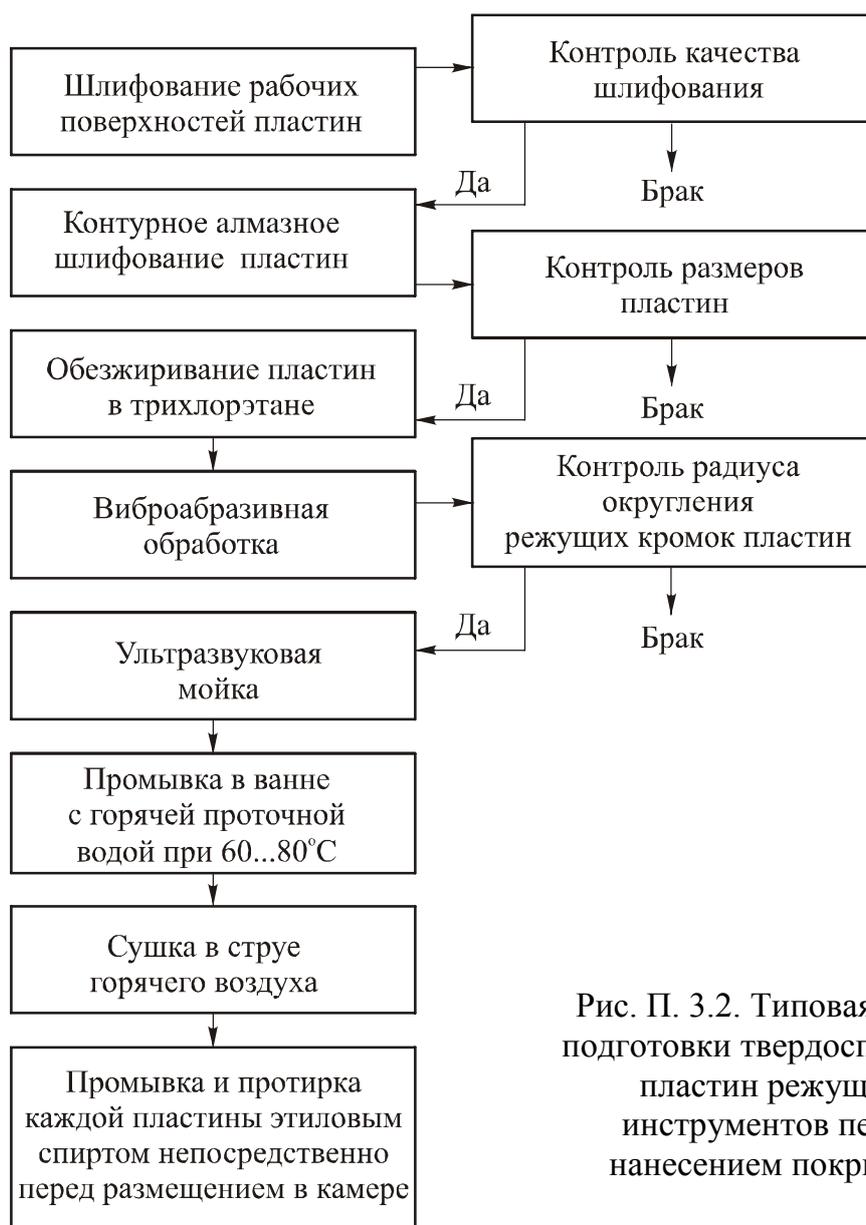


Рис. П. 3.2. Типовая схема подготовки твердосплавных пластин режущих инструментов перед нанесением покрытия

Важным фактором, оказывающим решающее влияние на работоспособность инструмента с покрытием, является качество подготовки образцов перед нанесением покрытия. От состояния поверхности зависит качество осаждённого покрытия и его функциональные характеристики. В большей мере это влияет на адгезионную связь (адгезию) между инструментальным материалом и самим покрытием. Поэтому необходимо тщательно соблюдать технологию подготовки поверхностей перед нанесением покрытий, удалять имеющиеся загрязнения, окислы, адсорбционные плёнки и др. (рис. П. 3.2) [20].

Типовой технологический процесс осаждения покрытий вакуумно-плазменным (*PVD*) методом представлен в табл. П. 3 [20].

Таблица П. 3

Типовой технологический процесс осаждения покрытий вакуумно-плазменным методом

| № п/п | Наименование операции (перехода) | Содержание операции |
|-------|---|--|
| 1. | Загрузка инструмента, прогрев и откачка вакуумной камеры | <p>1.1. Загрузка оснастки с инструментами, подготовленными соответствующим образом, в вакуумную камеру установки.</p> <p>1.2. Откачка вакуумной камеры механическим, а затем диффузионным насосами (переключение с механического на диффузионный насос проводить при давлении 10^{-1} Па).</p> <p>1.3. Прогрев камеры горячей водой.</p> |
| 2. | Очистка поверхности инструмента ионным травлением в газовом разряде | <p>2.1. Откачка камеры до давления $2,6 \dots 6,5 \cdot 10^{-3}$ Па.</p> <p>2.2. Отключение прогрева камеры при давлении $2,6 \cdot 10^{-5}$ Па и включение системы охлаждения.</p> <p>2.3. Подача на инструмент напряжения смещения (≥ 1000 В).</p> <p>2.4. Плавный напуск аргона до слабого свечения или возникновения единичных искровых разрядов.</p> <p>2.5. Выдержка инструментов ≥ 1 мин.</p> <p>2.6. Повышение давления аргона до появления слабых искровых разрядов.</p> <p>2.7. Уменьшение давления аргона до исчезновения разрядов.</p> <p>2.8. Выдержка инструментов ≥ 1 мин.</p> <p>2.9. Повышение давления до 1 Па, пока не исчезнут разряды.</p> <p>2.10. Выдержка инструментов ≥ 5 мин.</p> <p>2.11. Откачка камеры до давления $2,6 \dots 6,5 \cdot 10^{-3}$ Па.</p> |

| № п/п | Наименование операции (перехода) | Содержание операции |
|-------|--|---|
| | | <p>2.12. Увеличение напряжения смещения до значения, на 20 % превышающего подачу на инструмент напряжения смещения.</p> <p>2.13. Повторение пп. 2.4–2.10.</p> <p>2.14. Прекращение подачи аргона и выключение напряжения смещения.</p> <p>2.15. Откачка камеры до давления $2,6 \cdot 10^{-3}$ Па.</p> <p>Примечание. Температура нагрева инструмента не должна превышать температуру отпуска инструментального материала.</p> |
| 3. | Очистка поверхности инструмента бомбардировкой ионами металла и нагрев до рабочих температур | <p>3.1. Подача на инструмент напряжения смещения $\sim 1000 \dots 1400$ В.</p> <p>3.2. Включение испарителя и установка минимально допустимого значения тока дуги.</p> <p>3.3. Ионная бомбардировка поверхности инструментов путем периодического включения и отключения тока дуги (время горения дуги на начальной стадии бомбардировки ≤ 2 с, перерыв $20 \dots 60$ с).</p> <p>3.4. Восстановление вакуума в камере $\geq 1,1 \cdot 10^{-2}$ Па.</p> <p>3.5. Повторение пп. 3.3 и 3.4 до полного исчезновения микродуг на поверхности обрабатываемых инструментов (общее время ионной бомбардировки ≥ 2 мин).</p> <p>3.6. Предварительный прогрев инструмента при непрерывном горении дуги и давлении вакуума $6,7 \cdot 10^{-3}$ Па.</p> <p>3.7. Подача реакционного газа (азота, если осаждается покрытие на основе нитрида) и создание давления $\sim 6,7 \cdot 10^{-2}$ Па.</p> <p>3.8. Окончательный прогрев инструмента ионами реакционного газа и металла (азота и титана, если осаждается покрытие из нитрида титана).</p> <p>3.9. Контроль температуры нагрева с помощью различных приборов.</p> <p>Примечание. Предварительный прогрев осуществляется до температуры, при которой в инструментальном материале растворяется основная составляющая газа-реагента (например, при осаждении нитрида титана инструмент из быстрорежущей стали прогревают до 200 °С). Температура окончательного прогрева инструмента выбирается с учетом температуры отпуска инструментального материала (например, инструмент из быстрорежущей стали прогревают до $500 \dots 520$ °С).</p> |

| № п/п | Наименование операции (перехода) | Содержание операции |
|-------|---|--|
| 4. | Нанесение покрытия | <p>4.1. Выключение испарителей.</p> <p>4.2. Отключение высокого напряжения и подача на инструмент напряжения в пределах 40...350 В (устанавливается в зависимости от конкретного вида инструмента и его размеров).</p> <p>4.3. Включение испарителей.</p> <p>4.4. Подача реакционного газа и установка его рабочего давления $\sim 1,1 \cdot 10^{-1}$ Па.</p> <p>4.5. Установка тока дугового испарителя в пределах 70...150 А (на каждом испарителе устанавливается индивидуально в зависимости от материала катода, конкретного вида инструмента и его размеров).</p> <p>4.6. Включение механизма вращения оснастки с обрабатываемым инструментом (частота вращения 5...8 об/мин).</p> <p>4.7. Конденсация покрытия в течение времени, устанавливаемого в зависимости от требуемой толщины покрытия.</p> <p>Примечание. При нанесении покрытий из чистых металлов необходимо выполнить все указанные операции, за исключением п. 4.4.</p> |
| 5. | Охлаждение и выгрузка инструмента | <p>5.1. Выключение испарителей.</p> <p>5.2. Выдержка инструментов в течение 1 мин при рабочих опорном напряжении и давлении газа.</p> <p>5.3. Выключение напряжения, прекращение подачи газа в камеру, выключение механизма вращения.</p> <p>5.4. Охлаждение инструментов в вакуумной камере до температуры < 20 °С.</p> <p>5.5. Выгрузка инструмента с покрытием.</p> |
| 6. | Контроль качества инструмента с покрытием | <p>6.1. Визуальный осмотр инструмента с покрытием. Не допускаются наличие на рабочих поверхностях инструмента участков без покрытия, отслаивание и шелушение покрытия.</p> <p>6.2. Скрайбирование покрытия по поверхности, перпендикулярной к потоку.</p> |

ПРИЛОЖЕНИЕ 4.

Контроль качества покрытий, наносимых на рабочие поверхности режущих инструментов

Применение тонких износостойких покрытий требует контроля их физических, механических и трибологических свойств на субмикронном и нанометровом уровне (толщина, твердость, модуль Юнга (упругости), адгезионная прочность, износостойкость и др.), от которых зависит работоспособность покрытия.

а) контроль толщины покрытий

Наиболее просто он осуществляется путем «протираания» сферических лунок с заглаблением в подложку малоизнашиваемого криволинейного контртела, обычно шара, с участием абразива. Последующее измерение хорды лунок позволяет рассчитать толщину покрытия исходя, например, из расчетной схемы «шар-плоскость» (рис. П. 4.1).

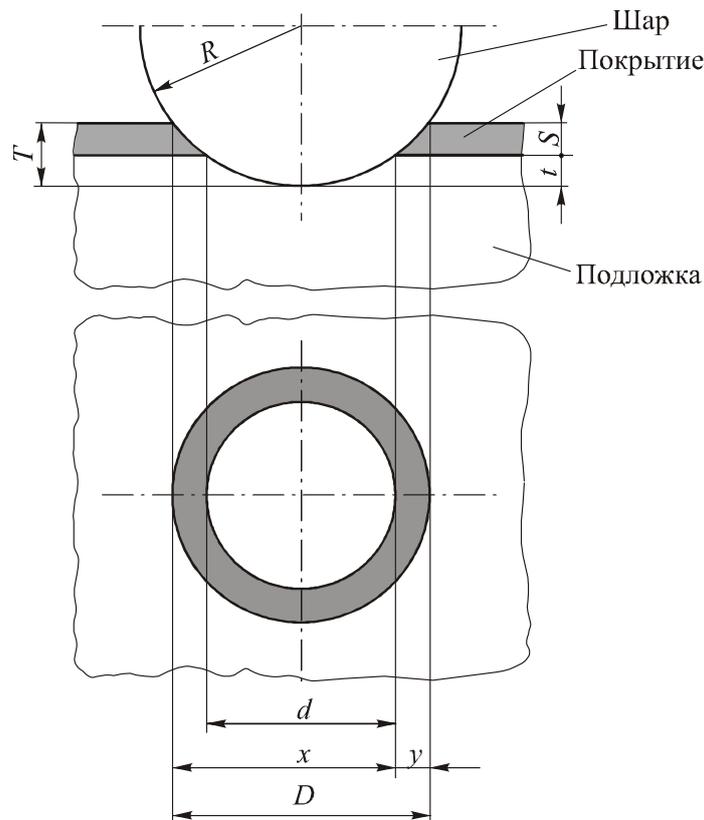


Рис. П. 4.1. Расчетная схема для определения толщины покрытия (модель «шар-плоскость»)

Здесь толщина покрытия

$$S = T - t,$$

где T – общая глубина сферической лунки; t – глубина лунки в подложке.

Общая глубина лунки

$$T = R - \left(\frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - D^2} \right),$$

а глубина лунки в подложке

$$t = R - \left(\frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - D^2} \right).$$

Тогда толщина покрытия

$$S = \frac{1}{2} \left(\sqrt{4R^2 - d^2} - \sqrt{4R^2 - D^2} \right).$$

У тонких покрытий, когда $T \ll R$ последнее уравнение принимает вид:

$$S = \frac{D^2 - d^2}{8R},$$

или заменив $D = x + y$ и $d = x - y$

$$S = \frac{xy}{2R}.$$

Для контроля толщины покрытий рассмотренным методом обычно используют прибор *Calotest* фирмы *GSM Instruments* (Швейцария). Он позволяет измерять одно- и многослойные покрытия толщиной 0,1...50 мкм в течение нескольких минут. Для этого прибор оснащен микроскопом, цветной видеокамерой и программным обеспечением для анализа изображения.

б) контроль твердости и модуля упругости покрытия

Для этой цели используют, например, нанотвердомер *Nano-Hardness Tester* фирмы *GSM Instruments* (Швейцария) (рис. П. 4.2) [21]. Прибор состоит из прецизионного твердомера, оптического микроскопа и предметного столика с механическим приводом. Образец с плоско-параллельными поверхностями – опорной и изучаемой, размером не менее 6 мм помещают на предметный столик и с помощью оптического микроскопа выбирают место для индентирования.

Перемещения предметного столика в горизонтальной плоскости (позиционирование) и индентора в вертикальной плоскости (измерения) управляются персональным компьютером с использованием

программного обеспечения фирмы *GSM* с очень высокой точностью (табл. П. 4.1).

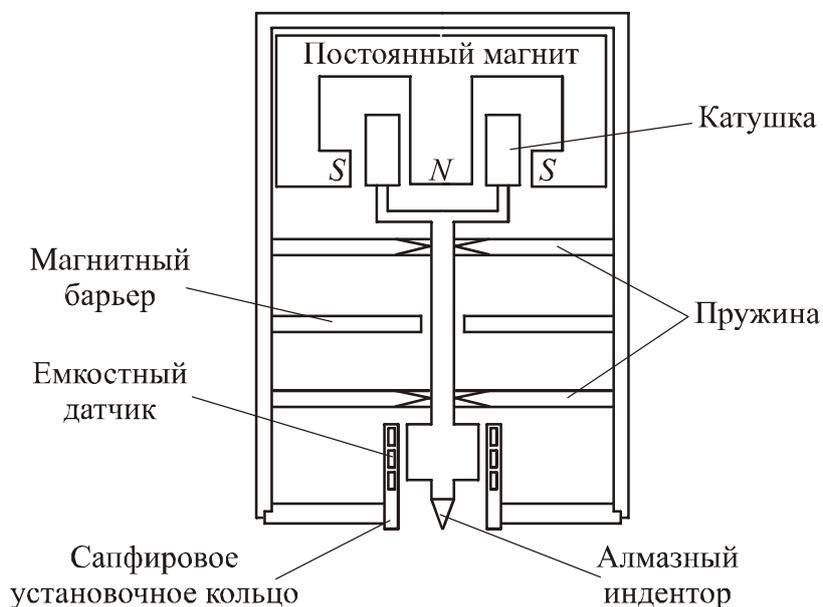


Рис. П. 4.2. Схема измерительной головки нанотвердомера *Nano-Hardness Tester* фирмы *GSM Instruments* (Швейцария)

Таблица П. 4.1

Основные технические характеристики нанотвердомера *Nano-Hardness Tester* фирмы *GSM Instruments* (Швейцария)

| Технические характеристики | Значения |
|---|-------------|
| Нагрузка, МН | 0,1...300,0 |
| Глубина проникновения, мкм | 0,03...500 |
| Погрешность вертикального позиционирования индентора, мкм | 0,0003 |
| Шаг горизонтального позиционирования предметного столика, мкм | 1,0 |

В процессе измерения на поверхность образца опускается сапфировое кольцо внутренним диаметром 5 мм, а затем вдавливается индентор (рис. П. 4.2). Такая схема позволяет термостатировать область измерения, устранить возможный изгиб тонких образцов при

нагрузении, а по моменту касания кольца оценить расстояние от базового наложения индентора до поверхности образца.

Из схемы измерительной головки видно, что нормальная нагрузка передается индентору через вертикальный стержень, являющийся сердечником прецизионного электромагнита, закрепленного мембранными пружинами. Перемещение стержня относительно сапфирового кольца измеряется высокочувствительным емкостным датчиком, который связан с персональным компьютером. Инденторами являются алмазные четырех- или трехгранные пирамиды соответственно Виккерса или Берковича (рис. П. 4.3).

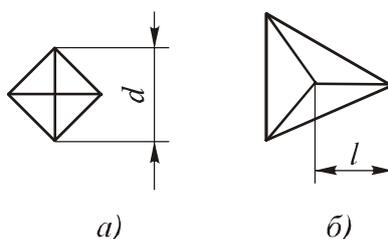


Рис. П. 4.3. Отпечатки инденторов Виккерса (а) и Берковича (б):
 d – размер отпечатка по диагонали; l – длина горизонтальной проекции отпечатка

Перед началом серии испытаний проводят калибровку нанотвердомера по эталонному образцу с известным модулем упругости (например, плавленый кварц, $E=72$ ГПа, $H=9,5$ ГПа), а измерения производят при нагрузке 10 мН и скорости нагружения 0,33 мН/с.

Затем задают параметры испытания: нагрузка, скорость нагружения, время выдержки под нагрузкой и скорость разгрузки. При этом управляющая программа позволяет сохранить на жестком диске персонального компьютера для каждого испытания 1000 точек с координатами «время–нагрузка–глубина вдавливания».

Типичная кривая непрерывного индентирования в виде зависимости глубины проникновения индентора от нагрузки представлена на рис. П. 4.4 [22]. Здесь верхняя кривая соответствует нагружению и отражает сопротивление материала внедрению индентора, а нижняя – описывает возврат деформации после снятия внешней нагрузки и характеризует упругие свойства материала.

При внедрении индентора вблизи области контакта создается сложное напряженное состояние, близкое к всестороннему сжатию, а деформация, распространяющаяся вглубь материала, имеет как пластическую (необратимую), так и упругую (обратимую)

составляющие. Благодаря этому при непрерывном indentировании оказывается возможным рассчитать:

а) твердость (отношение максимальной нагрузки к площади проекции невосстановленного отпечатка)

$$HV = 1,854P / d^2 \text{ (пирамида Виккерса);}$$

$$H\Delta = 1,570P / l^2 \text{ (пирамида Берковича);}$$

б) приведенный модуль упругости Юнга

$$E_r = \frac{(\sqrt{\pi} \cdot S)}{2\beta\sqrt{A}}; \frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu^2)}{E} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i},$$

где S – контактная жесткость, $S = \frac{dP}{dh}$; β – коэффициент, $\beta = 1,012$ (пирамида Виккерса), $\beta = 1,034$ (пирамида Берковича); A – площадь проекции восстановленного отпечатка; ν , ν_i – коэффициенты Пуассона соответственно для стали ($\nu = 0,25$) и алмаза ($\nu_i = 0,07$); E_i – модуль упругости алмаза, $E_i = 1140$ ГПа;

в) упругое восстановление (доля упругой составляющей в общей деформации)

$$R = (h_m - h_f) / h_m,$$

где h_m – наибольшая глубина погружения индентора; h_f – глубина отпечатка после снятия нагрузки.

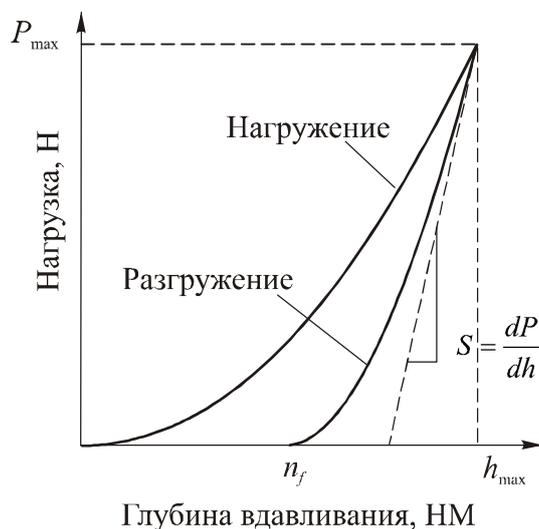


Рис. П. 4.4. Типовая диаграмма вдавливания индентора

Таким образом, в методе наноидентирования твердость определяется исходя из площади невосстановленного отпечатка, т. к.

определение твердости по площади восстановленного отпечатка в случае использования материалов, у которых упругое восстановление $R > 10 \dots 20 \%$ дает завышенные значения твердости.

в) адгезионная прочность связи покрытия с подложкой

- *метод вдавливания (отслаивания).*

В поверхность плоского образца с нанесенным покрытием на приборе Роквелла (шкала С) вдавливают алмазный индентор под определенной нагрузкой, приводящей к появлению повреждений в покрытии (рис. П. 4.5). После снятия нагрузки делают микрофотографии зоны вдавливания. Качественную оценку прочности адгезионной связи осуществляют путем сравнения полученных микрофотографий с эталонными (рис. П. 4.6), а количественную – по отношению площади отпечатка к площади скола покрытия, образующегося в результате вдавливания индентора;

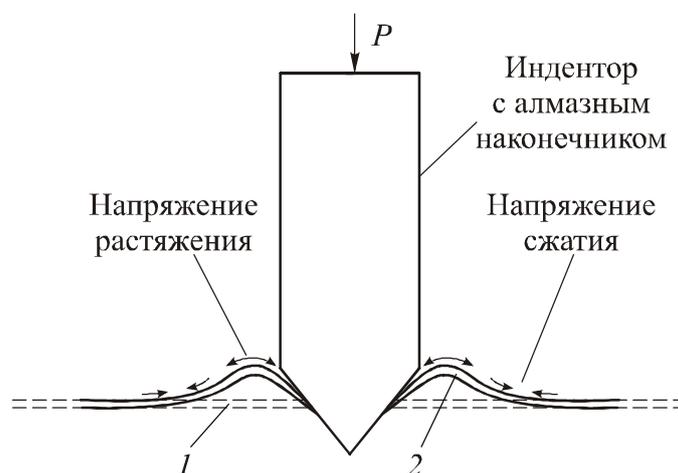


Рис. П. 4.5. Схема определения адгезионной прочности покрытия методом вдавливания с помощью прибора Роквелла:

- 1 – первоначальное состояние поверхности образца с покрытием;
2 – деформированная поверхность покрытия после приложения нагрузки

- *склерометрический метод (скретч-тест).*

На поверхность покрытия алмазным индентором наносится царапина при постоянной, постепенно нарастающей или пошаговой нагрузке (рис. П. 4.7) [20]. При определенной критической нагрузке $L_c(H)$ покрытие начинает разрушаться. При этом данные критической нагрузки фиксируются с высокой точностью с помощью акустического датчика, а также с помощью встроенного оптического микроскопа. Значение критической нагрузки используют для расчета адгезионной силы в системе «покрытие–подложка». Кроме акустической эмиссии

измеряют прилагаемую нормальную нагрузку P , силу трения и глубину проникновения индентора. В совокупности эти параметры определяют уникальный «почерк» каждого покрытия.

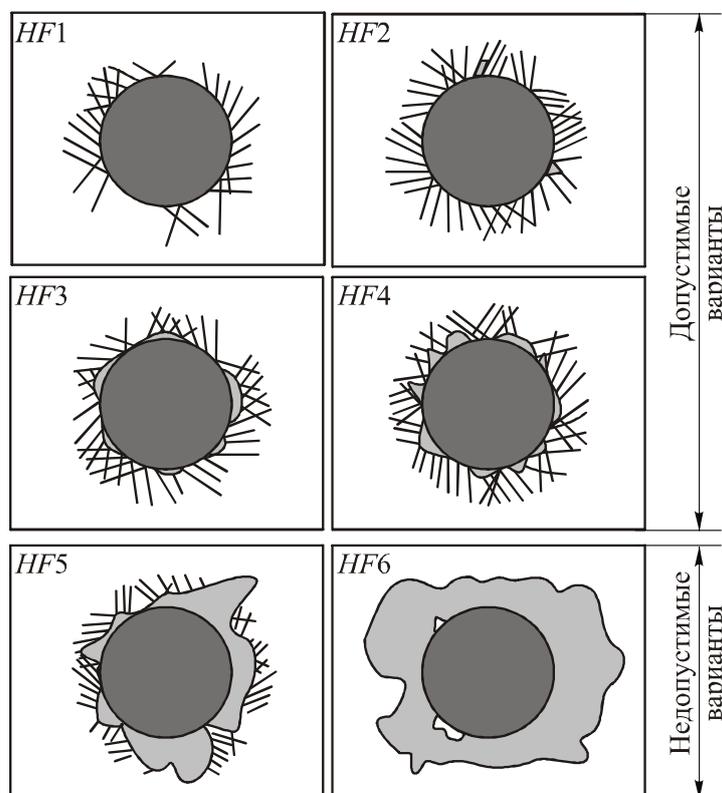


Рис. П. 4.6. Варианты разрушения покрытий ($HF1-HF6$) на образце в результате вдавливания индентора на приборе Роквелла ($VDI 3198$)

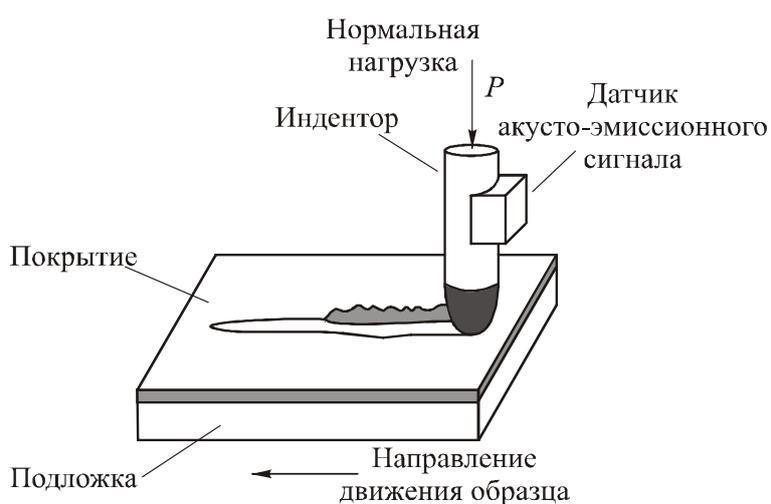


Рис. П. 4.7. Схема контроля адгезионной прочности покрытия методом скретч-тестирования (царапания)

В настоящее время для контроля прочности покрытия широко применяют скретч-тестеры фирмы *GSM Instruments* (Швейцария) (табл. П. 4.2).

Таблица П. 4.2

Основные технические характеристики скретч-тестеров
фирмы *GSM Instruments* (Швейцария)

| Технические характеристики | Тип прибора | | |
|-------------------------------------|----------------------|------------|-------------|
| | Нанотест | Микротест | Макротест |
| Нормальная нагрузка, Н | 0,01...1,0 | 0,3...30,0 | 0,5...200,0 |
| Максимальная сила трения, Н | 1 | 30 | 200 |
| Максимальная длина царапины, мм | 120 | 120 | 70 |
| Скорость нанесения царапины, мм/мин | 0,4...600 | 0,4...600 | 0,4...600 |
| Максимальная глубина царапины, мм | 2 | 1 | 1 |
| Увеличение видеомикроскопа | ×200, ×800, ×4000 | ×200, ×800 | ×200, ×800 |

г) износостойкость покрытий

Оценивают на машинах трения в соответствии с международными стандартами *DIN* (стандарт Германии) и *ASTM* (стандарт Американского общества испытания материалов). Это, например, автоматизированная машина трения *Tribometer* фирмы *GSM Instruments* (Швейцария). Она позволяет осуществлять комплексное трибологическое исследование, которое включает [21]:

- непрерывную запись коэффициента трения по схеме «шарик–вращающийся диск» (рис. П. 4.8);

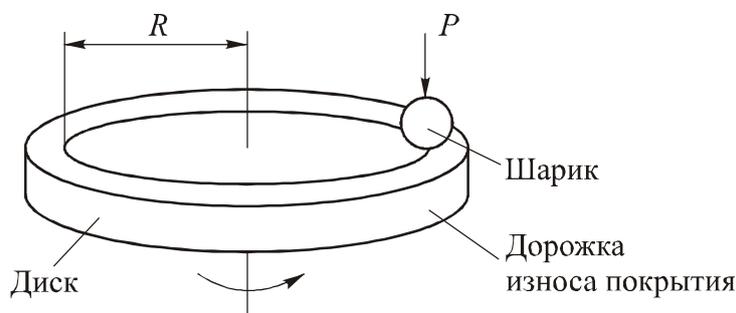


Рис. П. 4.8. Схема испытания износостойкости покрытий на машине трения *Tribometer* фирмы *GSM Instruments* (Швейцария)

- фрактологическое исследование дорожки износа покрытия и площадки износа шарика.

Размеры дорожек и площадок износа измеряют оптическим микроскопом *Axiovert CA25* фирмы *Karl Zeiss* (Германия) и стереомикроскопом МВС. Затем рассчитывают объемы шарика $V_{ш}$ и покрытия $V_{п}$, удаленные в процессе их износа по формулам

$$V_{ш} = \pi \cdot h^2(r - 1/3h),$$

где h – высота сегмента, $h = r - \left[r^2 - (d'/r)^2 \right]^{1/2}$; r – радиус шарика; d' – диаметр площадки износа шарика.

$$V_{п} = S \cdot l,$$

где S – площадь поперечного сечения дорожки износа покрытия; l – длина дорожки износа, $l = 2\pi R$; R – радиус дорожки износа.

На основе данных об объемах изношенных материалов с помощью компьютерной программы *InstrumX for Trihometer GSM Instruments* рассчитывают скорости износа покрытия и контртела (шарика), а, соответственно, судят об износостойкости изучаемого покрытия.

ПРИЛОЖЕНИЕ 5.

Регенерация отходов твердых сплавов

Дефицит вольфрама и кобальта, высокие цены на них вызывают потребность в повторном использовании (регенерации) отходов изношенных твердосплавных режущих инструментов. Для решения этой задачи предложено большое количество способов [2]. Однако в промышленности практическое применение получили лишь некоторые из них.

Традиционная схема переработки вольфрамсодержащего сырья состоит в сплавлении кусковых отходов твердых сплавов с селитрой при температуре 800...900 °С, происходящем в течение одного часа [23]. Расплав измельчают и выщелачивают водой, отделяя фильтрацией раствор вольфрамата натрия от осадка, который содержит окись кобальта. Затем из раствора, очищенного от кремния, осаждают искусственный шеелит, из которого получают паравольфрамат аммония. Последний подвергают термическому разложению, в результате чего получается чистая окись вольфрама. Ее восстанавливают в водороде до чистого вольфрама. Затем порошок вольфрама смешивают с сажей и в специальных термических печах при температуре 1700...1800 °С подвергают карбидизации. Полученный карбид вольфрама размалывают, смешивают в необходимом количестве с кобальтом и вновь размалывают. После этого смесь готова к использованию.

Применяют и несколько иную схему регенерации твердых сплавов, используя для выделения из раствора соединений вольфрама осаждение так называемой «двойной» соли (рис. П. 5.1) [23].

Цинковый метод основан на разрушении твердого сплава в результате разрушения кобальтовой связки при его контакте с расплавленным цинком [24]. После отгонки цинка остаются хрупкий карбид и кобальт, которые легко измельчаются в порошок, пригодный для производства твердосплавных изделий. Особенность регенерированной смеси – более совершенная структура карбида вольфрама, перекристаллизованного в результате жидкофазного спекания в процессе получения твердого сплава. При выдержке твердого сплава под слоем жидкого цинка последний взаимодействует с кобальтовой связкой, а карбид вольфрама сохраняет структуру, приобретенную в результате жидкофазного спекания.

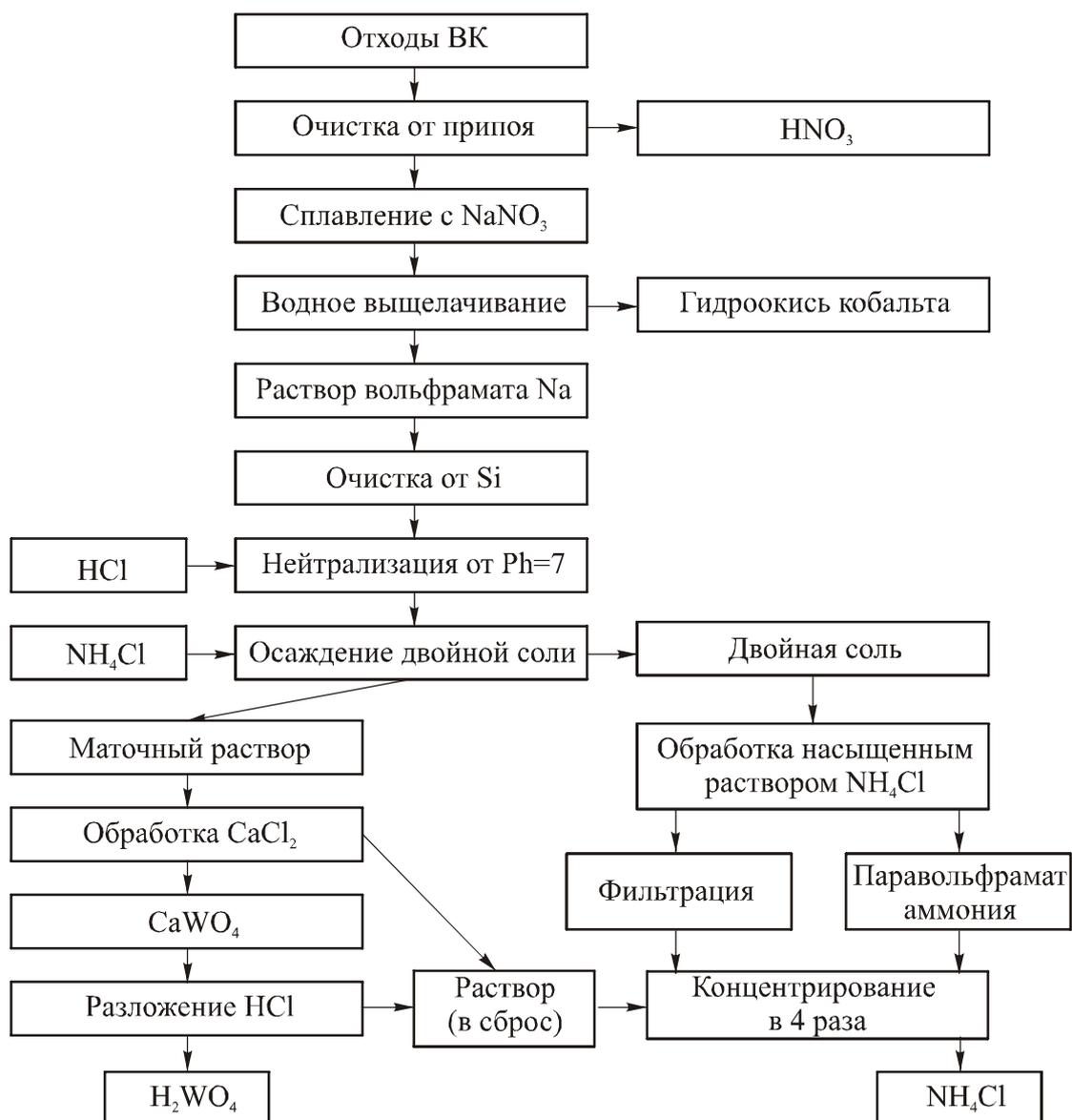


Рис. П. 5.1. Схема переработки отходов твердого сплава сплавлением с селитрой

Способ окисления твердых сплавов в воздушной среде с последующей обработкой щелочью в автоклаве (США) [23]. Раствор вольфрамата натрия отделяют от осадка, который содержит тяжелые металлы (Co, Fe и др.) и перерабатывают по стандартной технологии. Отходы карбида вольфрама отжигают на воздухе. Затем прокаленный и окисленный материал измельчают и разлагают раствором щелочи.

Способ хлорирования отходов твердых сплавов (фирмы *Axel Johnson* (США)) [23]. Осуществляется при температуре 900...1000 °С (рис. П. 5.2).

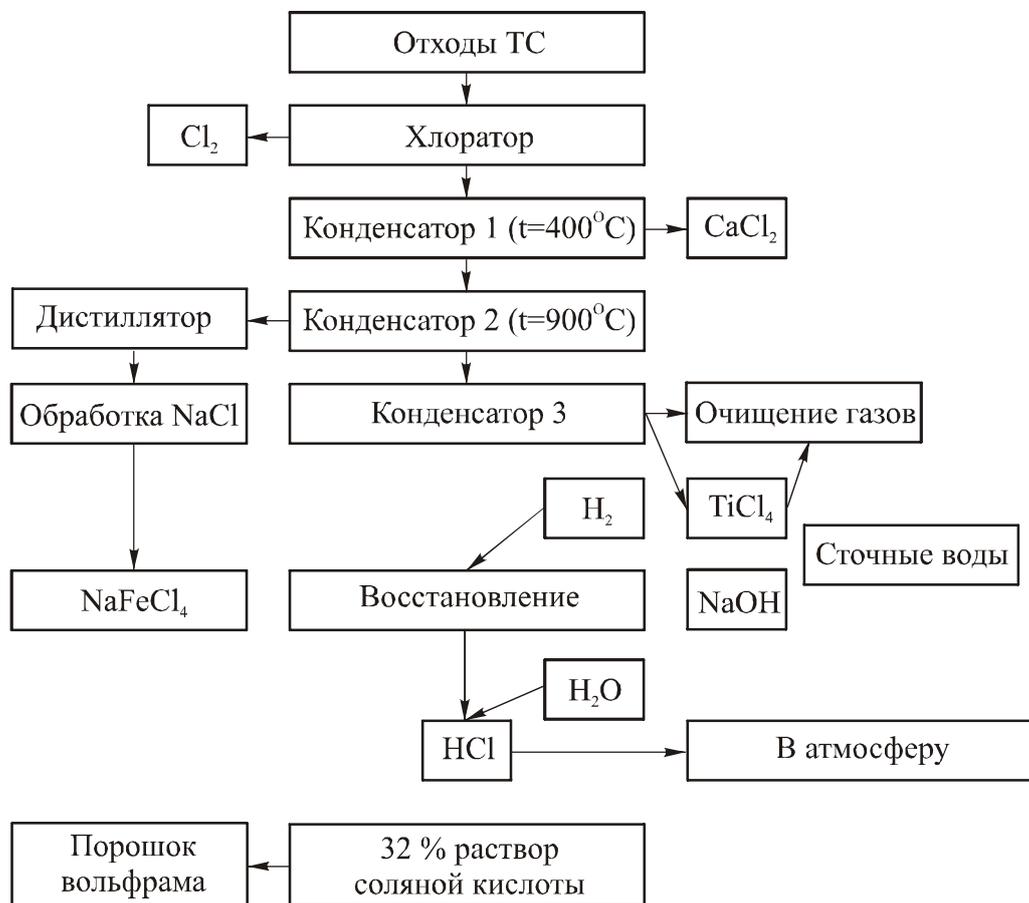


Рис. П. 5.2. Схема получения порошка вольфрама из отходов твердого сплава по способу фирмы *Axel Johnson* (США)

В системе конденсации хлориды разделяются: в первом конденсаторе осаждается CaCl_2 , во втором конденсаторе осаждаются все другие хлориды, за исключением TiCl_4 , который осаждается в третьем конденсаторе.

Газы, содержащие, в основном, хлор и закись углерода, орошают раствором щелочи, после чего удаляют в атмосферу. Хлориды, собранные в другом конденсаторе, разделяют в дистилляционной колонке. В кубическом остатке получают WC_{16} . Восстановление гексахлорида вольфрама водородом проводят в газовой фазе. Контроль

и управление процессом осуществляется с помощью персонального компьютера.

NR-процесс – экологически чистая технология переработки вольфрамсодержащих отходов. Суть процесса состоит в следующем [25].

Кусковые отходы твердого сплава после очистки от СОЖ и масла подвергают окислению в атмосфере воздуха в обычных термических печах. В результате образуется смесь оксидов вольфрама WO_3 и комплексного вольфрамокобальтового оксида $CoWO_4$. Соотношение этих оксидов определяется маркой исходного материала.

Дробление цельного куска происходит из-за значительного увеличения объема металла (примерно в 3 раза) в процессе окисления. Полученный порошок после небольшого размола (усреднения) в мельнице или атриторе и просева в вибросите, для получения определенного фракционного состава помещают в муфель шахтной термической печи, где выдерживают и перемешивают при температуре не более $950\text{ }^\circ\text{C}$ в атмосфере эндогаза или диссоциированного аммиака с добавками природного газа. В результате в едином технологическом цикле происходит восстановление оксидов до чистых металлов и образование карбида вольфрама. После охлаждения этот порошок извлекают и вновь кратковременно размалывают для усреднения размера. Далее он готов к употреблению в производстве твердосплавных изделий.

Следует отметить, что конструкция специализированной печи для осуществления операции восстановления – карбидизации – разработана фирмой *Kremer* (Германия). В ней процесс протекает при постоянном перемешивании порошковых продуктов и подаче газовой смеси непосредственно в реакционную зону. Производительность печи – до 8...10 тонн карбидизированного продукта в год.

Удельные расходы энергоресурсов составляют примерно:

- технологический газ – $10\text{ Нм}^3/\text{кг}$;
- природный газ – $0,7...1,0\text{ Нм}^3/\text{кг}$;
- электроэнергия – $25\text{ кВт}/\text{кг}$;
- обратная вода – $1,0...1,2\text{ м}^3/\text{кг}$.

Режущие инструменты, полученные из этого порошка, по своим эксплуатационным характеристикам не уступают инструментам, полученным из стандартного порошка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов. –М.: Машиностроение, 2007. –304 с.
2. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделия из них / Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А. –М.: «МИСИС», 2004. –463 с.
3. Фальковский В.А., Боровский В.Г. Твердые сплавы на основе карбида вольфрама с нанозернистой и ультратонкой структурой // Цветные металлы. –2010. –№ 5. –С. 106-112.
4. Гусев А., Курлов А. Твердые сплавы сегодня и завтра // Металлы Евразии. –2005. –№ 2. –С. 42-45.
5. Фальковский В.А., Клячко Л.Н. Твердые сплавы. –М.: Издательский дом «Руда и металлы». –2005. –416 с.
6. Фальковский В.А. Инновации в технологии твердых сплавов: нано- и ультрадисперсные структуры. Учебное пособие. –М.: ИПЦ МГАТХТ. –2008. –69 с.
7. Фальковский В.А., Фальковский Ф.И., Панов В.С. Нано- и ультрадисперсные твердые сплавы // Цветные металлы. –2007. –№ 10. –С. 85-91.
8. Злобин Г.П. Формование изделий из порошков твердых сплавов. –М.: Metallurgy. –1980. –224 с.
9. Герман Рендал М. Порошковая металлургия от А до Я. –М.: Интеллект. –2009. –336 с.
10. Кривонос Г.А., Зверев А.Д., Максимов Л.Ю. Процессы и оборудование для газостатической обработки. –М.: Metallurgy. –1994. –301 с.
11. Бондаренко В.П., Аронин И.Я., Мендельсон В.С. Проектирование пресс-форм для изделий из твердых сплавов. – Киев: Наукова думка. –1983. –184 с.
12. Технология изготовления режущего инструмента / А.И. Барсов, А.В. Иванов, К.И. Кладова и др. –М.: Машиностроение. –1979. –136 с.
13. Соколовский И.А. Режущий инструмент для приборостроения. –М.: Машиностроение. –1982. –208 с.
14. Куприянов В.А. Мелкогабаритный инструмент для резания труднообрабатываемых материалов. –М.: Машиностроение. –1989. –136 с.

15. Металлообрабатывающий твердосплавный инструмент: справочник / В.С. Самойлов, Э.Ф. Эйхманс, В.А. Фальковский и др. –М.: Машиностроение. –1988. –368 с.
16. Боровский Г.В., Григорьев С.Н., Маслов А.Р. Справочник инструментальщика / Под общ. ред. А.Р. Маслова. –М.: Машиностроение. –2005. –464 с.
17. Беляев В.С. Алмазоподобные покрытия на Российском рынке // ИТО. –2009. –№ 4. –С. 46-47.
18. Lu F.X., Tang W.Z., Tong Y.M., Miao J.Q., Li C.M., Chen G.C. Novel pretreatment of hard metal substrate for better performance of diamond coated cutting tools // Diamond and Related Materials. –2006. 15. –N 11-12. –p. 2039-3045.
19. Протасьев В.Б., Истоцкий В.В. Проектирование фасонных инструментов, изготавливаемых с использованием шлифовально-заточных станков с ЧПУ. –М.: Инфра-М. –2011. –128 с.
20. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. –М.: Машиностроение. –2011. – 368 с.
21. Петржик М.И., Штанский Д.В., Левашов Е.А. Современные методы оценки механических и трибологических свойств функциональных поверхностей // X Международная научно-техническая конференция «Высокие технологии в промышленности России». –М.: ОАО ЦНИТИ «Техномаш». – 2004. –С. 311–318 с.
22. Булычев С.И. Методики кинетического нано-, микро- и макроиндентирования: практическое пособие по определению физико-технических свойств материалов. –М.: МГИУ. –2009. – 80 с.
23. Борисов А.А., Боровский Г.В. и др. Производство и эксплуатация режущего инструмента. –М.: ИТО. –2011. –104 с.
24. Зеликман А.Н., Каспарова Т.В., Биндер С.И. Получение твердых сплавов из регенерированных смесей WC-Co, полученных из кусковых отходов цинковым методом // Цветные металлы. –1993. –№ 1. –С. 47-49.
25. Борд Н.Ю., Королевич С.В., Хоняк К.В. Новая технология переработки твердых и тяжелых сплавов // Инструмент. –1997. –№ 6. –С. 10.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 2 |
| 1. СОВРЕМЕННЫЕ ОДНОКАРБИДНЫЕ ТВЕРДЫЕ СПЛАВЫ..... | 3 |
| 2. ПОЛУЧЕНИЕ ИСХОДНЫХ ПОРОШКОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ МАРОК ОДНОКАРБИДНЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ | 10 |
| 3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ СТЕРЖНЕЙ..... | 15 |
| 4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЦЕЛЬНЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ОСЕВЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ..... | 26 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Некоторые современные направления совершенствования обработки материалов резанием..... | 46 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Шлифовально-заточные станки с ЧПУ, выпускаемые в странах Союза независимых государств (СНГ) | 52 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Нанесение износостойких покрытий на рабочие поверхности режущих инструментов вакуумно-плазменным (<i>PVD</i>) методом на установке ИСЭ СО РАН | 62 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Контроль качества покрытий, наносимых на рабочие поверхности режущих инструментов | 68 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Регенерация отходов твердых сплавов..... | 77 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 81 |

