

## НАНЕСЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Приведена технология нанесения износостойких покрытий на сменные многогранные пластины (СМП) и применяемое оборудование.

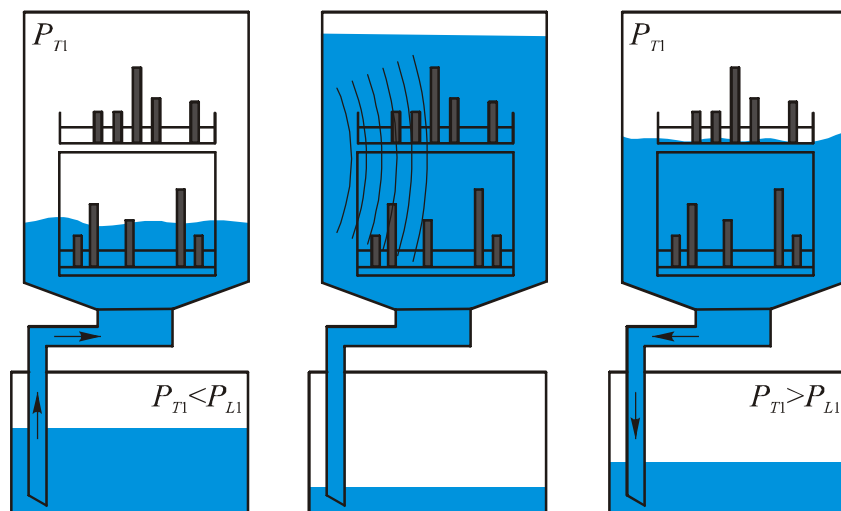
Нанесение износостойких покрытий на сменные многогранные пластины (СМП) – один из самых распространенных способов повышения работоспособности режущих инструментов. Функциональные характеристики покрытия и, прежде всего, его адгезионная связь с основой очень сильно зависят от качества подготовки поверхностей пластин перед нанесением покрытия [1, 2]. Поэтому пластины после мойки в автоматической ультразвуковой моечной машине фирмы *Finn Sonic* (Финляндия) подвергают дополнительной мойке в автоматической моечной машине с вакуумной сушкой, например, фирмы *Platit* (Швейцария) (рис. 1).



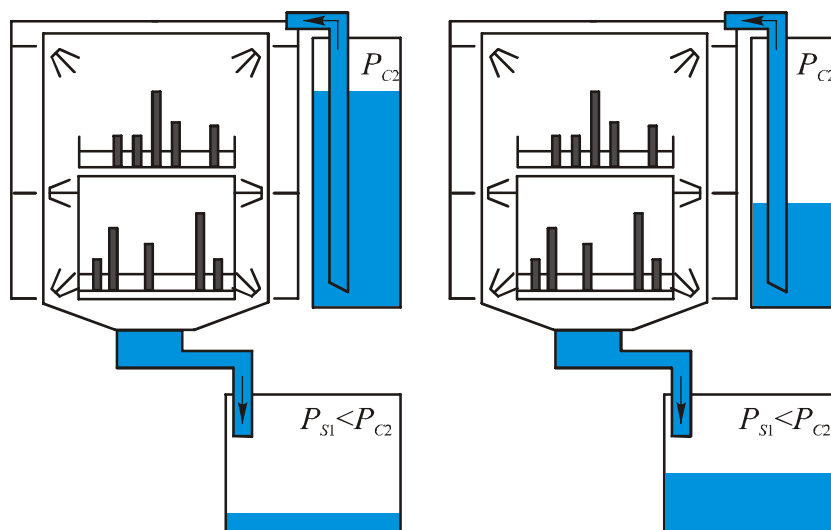
Рис. 1. Общий вид автоматической моечной машины с вакуумной сушкой модели V300 фирмы *Platit* (Швейцария)

Здесь мойка пластин осуществляется в следующей последовательности (время цикла 45 мин):

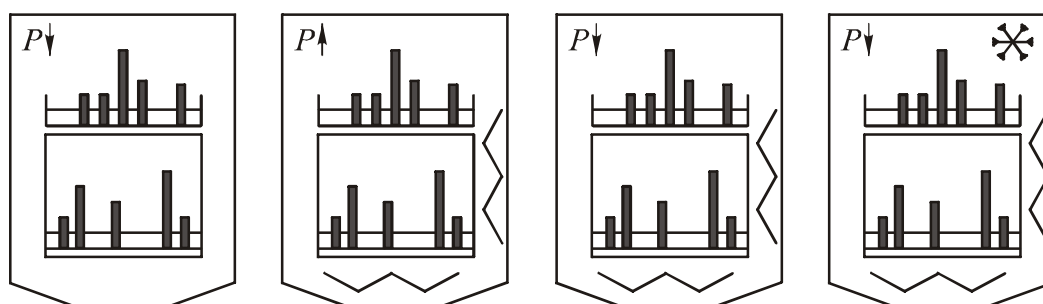
1. Ультразвуковая очистка (моющее средство *Deconex HT 1153* фирмы *Borer Chemie* (Швейцария).



2. Мойка (моющее средство *Deconex Spray Extra* фирмы *Borer Chemie* (Швейцария).



3. Вакуумная сушка (70...80 °C).



После такой обработки пластины готовы для нанесения покрытия.

Износостойкие покрытия на СМП наносят двумя методами [3]:

1. Химическое осаждение покрытий из газовой фазы – *Chemical Vapour Deposition (CVD)*.
  - а) высокотемпературный метод химического осаждения покрытий – *High-Temperature CVD (HT-CVD)*;
  - б) среднетемпературный метод химического осаждения покрытий – *Medium-Temperature CVD (MT-CVD)*;
  - в) метод химического осаждения с плазменным сопровождением – *Plasma Assisted CVD (PA-CVD)*.

#### 1. Основные характеристики некоторых химических соединений, получаемых методами химического осаждения

Соединение	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Температура плавления, °С	НV	E, МПа	$\alpha \cdot 10^{-6}$ , К <sup>-1</sup>
TiC	4,93	3067	28	470000	8,0...8,6
TiN	5,40	2950	21	590000	9,4
ZrC	6,63	3445	25,6	400000	7,0...7,4
ZrN	7,32	2982	16	510000	7,2
VC	5,41	2648	29	430000	7,3
VN	6,11	2177	15,6	460000	9,2
NbC	7,78	3613	18	580000	7,2
NbN	8,43	2204	14	480000	10,1
TaC	14,48	3985	15,5	560000	7,1
CrN	6,12	1050	13	400000	2,3
WC	15,72	2776	23,5	720000	3,8...3,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,98	2047	23	400000	8,4

Методами химического осаждения покрытий получают соединения на основе нитридов, карбидов, карбонитридов и боридов тугоплавких металлов – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiN, TiC, ZrN, TiCN и др. (табл. 1).

В общем случае процессы *CVD* основаны на протекании гетерогенных химических реакций в парогазовой среде, окружающей СМП, в результате которых образуется износостойкое покрытие (рис. 2).

Осаждение покрытий происходит в специальной печи в присутствии водорода в результате взаимодействия газообразных галогенидов ( $\text{TiCl}_4$ ,  $\text{AlCl}_3$ ) с составляющими смесей: а) азотом – при осаждении нитридов тугоплавких металлов; б) метаном – при осаждении карбонитридов; в) углекислым газом – при осаждении оксидов.

Температуры, при которых формируются покрытия *HT-CVD* и *MT-CVD*–методами, превышают  $750\text{ }^\circ\text{C}$ , а *PA-CVD*–методом –  $550\text{...}650\text{ }^\circ\text{C}$ . При этом обеспечивается высокая скорость ( $5\text{...}8\text{ мкм/ч}$ ) нанесения покрытий, в том числе и многослойных, общая толщина которых может достигать  $6\text{...}15\text{ мкм}$  и более.

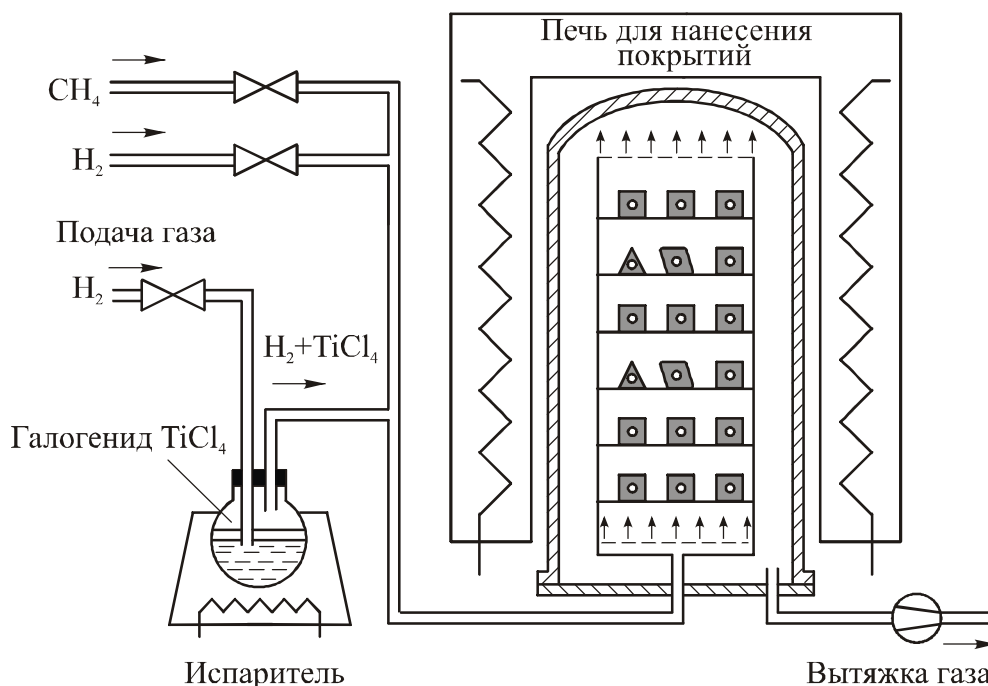
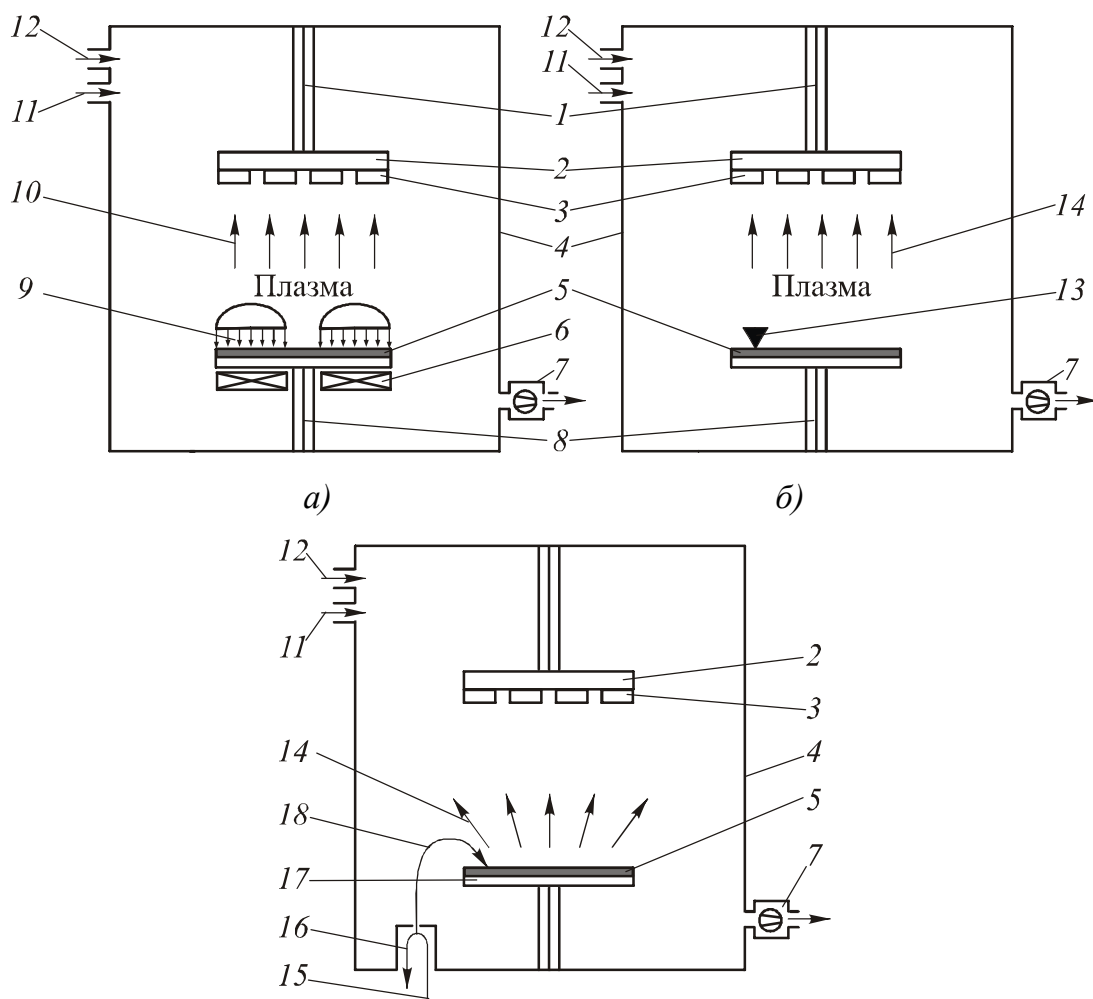


Рис. 2. Принципиальная схема процесса химического осаждения покрытий из газовой фазы на твердосплавные СМП

## 2. Физическое осаждение покрытий в вакууме – *Physical Vapour Deposition (PVD)*.

- а) метод вакуумно-дугового испарения;
- б) метод магнетронного распыления;
- в) метод электронно-лучевого испарения.

В основе *PVD*–методов, как правило, лежит испарение (распыление) вещества в вакуумной камере, с последующей ионизацией частиц, ускорением в электрическом (магнитном) поле в направлении к покрываемой поверхности и их конденсацией на этой поверхности в присутствии реакционного газа. При этом перевод твердого вещества в металлический пар может осуществляться катодным пятном вакуумной дуги (вакуумно-дуговое испарение, рис. 3, а); ионным пучком (магнетронное распыление, рис. 3, б); электронным пучком (электронно-лучевое испарение, рис. 3, в) при температуре 500...600 °С.



в)

Рис. 3. Принципиальные схемы нанесения покрытий на режущий инструмент PVD-методами: *а* – магнетронным распылением; *б* – вакуумно-дуговым испарением; *в* – электронно-лучевым испарением; 1 – подача напряжения смещения; 2 – держатель инструментов; 3 – инструмент; 4 – вакуумная камера; 5 – осаждаемый материал; 6 – магнитная система для магнетронного распыления; 7 – вакуумный насос; 8 – подача разрядного напряжения; 9 – ионный пучок; 10 – распыленный материал; 11 – реакционный газ; 12 – инертный газ; 13 – катодное пятно; 14 – испаренный материал; 15 – подача ускоряющего напряжения; 16 – термокатод; 17 – тигель; 18 – электронный луч

В качестве испаряемого (распыляемого) вещества обычно используют тугоплавкие металлы (Ti, Cr, Mo, Zr, Al и др.), а реакционных газов – азот, метан, кислород и получают соответственно покрытия в виде нитридов, карбидов, карбонитридов или оксикарбидов тугоплавких металлов (табл. 2).

## 2. Характеристики покрытий, получаемых PVD–методом

Покрытие	Цвет	HV*	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.

*CVD*–покрытия требуют применения дорогостоящих высокочистых химических реагентов ( $TiCl_4$ ,  $NH_3$ , др.), прецизионных дозаторов химических прекурсоров, точного контроля продуктов химических реакций в рабочей камере и т. д.

Нанесение *PVD*–покрытий при помощи дугового или тлеющего разряда (магнетрона) обеспечивает бóльшую производительность и не столь чувствительно к незначительным отклонениям технологических параметров. Поэтому *PVD*–метод находит все бóльшее применение.

Типовой технологический процесс нанесения покрытий *PVD*–методом состоит из следующих основных операций [2]:

1. Загрузка пластин, прогрев и откачка вакуумной камеры.
2. Очистка поверхностей пластин ионным травлением в газовом разряде.
3. Очистка поверхностей пластин бомбардировкой ионами металла и нагрев до рабочих температур.
4. Нанесение покрытия.
5. Охлаждение и выгрузка пластин.
6. Контроль качества нанесенного покрытия.

Для реализации *PVD*–метода применяется оборудование фирм *Hauser* (Нидерланды), *Oerlikon Balzers* (Швейцария), *Platit* (Швейцария), *Multi Arc Vacuum System* (США), а *CVD*–метода – *Ricter Precision* (США), *Rübig* (Германия), *Ion Bond* (Швейцария) и др.

На рис. 4 представлен общий вид установки для нанесения покрытий *PVD*–методом модели  $\pi$ -300 фирмы *Platit*, ее технические характеристики в табл. 3, а виды наносимых покрытий – в табл. 4.



Рис. 4. Общий вид установки для нанесения износостойких покрытий модели π-300 фирмы *Plaitit*

### 3. Основные технические характеристики установки для нанесения износостойких покрытий модели π-300 фирмы *Plaitit* (Швейцария)

Число испарителей (катодов), шт.:	
боковые вращающиеся катоды (LARC <sup>®</sup> )	3
центральные вращающиеся катоды(CERC <sup>®</sup> )	1
Температура нанесения покрытия, °С:	
инструментальные стали	230
быстрорежущие стали	350-500
твердые сплавы	350-600
Производительность, шт., при обработке:	
осевого инструмента ø 10 x 70 мм (2 мкм)	504 (цикл 4,5 ч)
твердосплавных пластин ø 20 x 6 мм (2 мкм)	1890 (цикл 4 ч)
червячных фрез ø 80 x 180 мм (4 мкм)	14 (цикл 6 ч)
Наносимые покрытия	TiN, (Ti,Al)N, nACo <sup>®</sup> , TiCN-MP, (Ti,Al)CN, CrN, nACRo <sup>®</sup> , GRADVIC <sup>®</sup> , CROMVIC <sup>®</sup> , однослойные, многослойные,



	нанослойные, наноградиентные, нанокompозитные и их сочетания
Габаритные размеры рабочей камеры: длина×ширина×высота, мм	580×580×540
Материал камеры	коррозионно-стойкая сталь по DIN 1.4301
Максимальные размеры покрываемой детали: диаметр, мм высота, мм	490 450
Максимальная масса одной покрываемой детали, кг	30
Максимальная загрузка, кг	150...200
Габаритные размеры установки: длина×ширина×высота, мм	1660×2350×2300
Электропитание, В/А/Гц	3×400/160А/50-60
Потребляемая мощность: типичная/максимальная, кВт/кВт	50/82
Масса установки, кг	1511
Система управления	персональный компьютер с операционной системой Windows 2000

#### 4. Виды износостойких покрытий, наносимых на установке модели π-300 фирмы *Platit* (Швейцария)

Тип покрытия Структура Цвет	Хим. состав (Общая толщина пластины, мкм)	Последовательность слоев	Толщина слоев, мкм	Области применения
TiN монослой (золотой)	$Ti_{1,0}N_{1,0}$ (1-7)	TiN	5,0	Покрытие широкого назначения
TiAlN монослой (черный)	$Ti_{0,5}Al_{0,5}N$ (1-5)	AlTiN	0,2	Универсальное покрытие (сверление, фрезерование, рассверливание, точение),

		TiAlN	3,9	подходит для «сухой», финишной и черновой обработки в стабильных условиях. Особенно рекомендуется для обработки чугунного литья и закаленных сталей
		TiN	0,2	
TiAlN монослой (золотой)	Ti <sub>0,5</sub> Al <sub>0,5</sub> N (1-5)	TiN	0,2	Универсальное покрытие с широкой областью применения. Особенно рекомендуется для обработки незакаленных мягких сталей
		TiAlN	3,9	
		TiN	0,2	
TiAlN мультислои (темно-фиолетовый)	Ti <sub>0,6</sub> Al <sub>0,4</sub> N (1-4)	TiAlN (верх)	1,0	Для прерывистого резания. Для обработки с тяжелыми нагрузками
		TiAlN <sub>2</sub>	0,3	
		TiAlN <sub>1</sub>	0,3	
		TiN	0,1	
AlTiN монослой (черный)	Al <sub>0,35</sub> Ti <sub>0,65</sub> N (1-4)	AlTiN	2,0	Для «сухой» и высокоскоростной обработки. Для обработки труднообрабатываемых материалов. Для стабильной чистовой и черновой обработки. Высокая теплостойкость покрытия
		TiAlN	0,9	
		AlSiTiN	0,3	
		TiAlSiN	0,3	
		TiN	0,1	
AlTiN мультислои (черный)	Al <sub>0,4</sub> Ti <sub>0,6</sub> N (1-4)	AlTiN (верх)	1,0	Для прерывистого резания и обработки в нестабильных условиях или с высокими нагрузками
		AlTiN	0,3	
		TiAlN	0,3	
		TiN	0,1	
nAlCo <sup>®</sup> градиентный (синий)	Ti <sub>0,45</sub> Si <sub>0,05</sub> Al <sub>0,5</sub> N (1-4)	TiAlSiN	3,8	Нанокompозитное покрытие на основе TiN, предельно высокие нанотвердость и теплостойкость покрытия.
		TiN	0,1	

nACo <sup>®</sup> мультислои (синий)	Ti <sub>0,48</sub> Si <sub>0,04</sub> Al <sub>0,48</sub> N (1-4)	AlSiTiN (верх)	1,0	Для высокопроизводительной обработки («сухая» высокоскоростная) и для нормальных условий механической обработки. Покрытие хрупкое, но хорошо работает в «сухих» условиях (чем выше скорость и температура в зоне резания, тем выше производительность).
		AlSiTiN	0,3	
		TiAlSiN	0,3	
		TiN	0,1	

Установка для нанесения покрытий PVD-методом модели *Bernex VPXpro 530 L – T* фирмы *IonBond* показана на рис. 5, ее технические характеристики в табл. 5, а виды наносимых покрытий – в табл. 6.



Рис. 5. Общий вид установки модели *Bernex VPXpro 530 L – T* фирмы *IonBond*

#### 5. Основные технические характеристики установки модели *Bernex VPXpro 530 L – T* фирмы *IonBond*

Внешний диаметр реактора, мм	530
------------------------------	-----

Длина реактора, мм	1600
Высота реактора, мм	1250
Количество загружаемых поддонов, шт.	41
Максимальная масса загрузки, кг	400
Рабочий объем реактора, л	110
Количество реакторов, шт.	2
Диапазоны рабочих температур, °С	
HT-CVD:	900-1050
MT-CVD:	700-900
Рабочий диапазон давления, Па	$(5-90) \cdot 10^3$
Наносимые покрытия	однослойные: TiN, TiC, CrC, HT-Ti (C <sub>x</sub> N <sub>y</sub> ), CMT-Ti (C <sub>x</sub> N <sub>y</sub> ), αAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> или KAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , многослойные из вышеуказанных (например, TiN/MT-Ti(CN)/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiN), HfN, ZrN, ZrC, TaC, Zr(CN), TiZr(CN) Ti(CBN), TiB <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub>
Масса установки, кг	90
Габаритные размеры установки, мм длина×ширина×высота	10000 5100×8100×7000
Потребляемая мощность (максимальная), кВт:	90

6. Виды покрытий, наносимых на установке модели *Bernex VPXpro 530 L – T* фирмы *IonBond*

Обозначение	Тип покрытия цвет структура	Состав толщина слоев, мкм	Области применения			
<i>Bernex D</i> (точение)	MT TiCN, золотой, мультислой	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>TiN– 1</td> </tr> <tr> <td>MTTiCN– 9</td> </tr> <tr> <td>TiN– 1</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">средняя толщина – 12</p>	TiN– 1	MTTiCN– 9	TiN– 1	Точение углеродистой, легированной, коррозионно-стойкой стали, стального и чугунного литья. Средняя скорость резания
TiN– 1						
MTTiCN– 9						
TiN– 1						

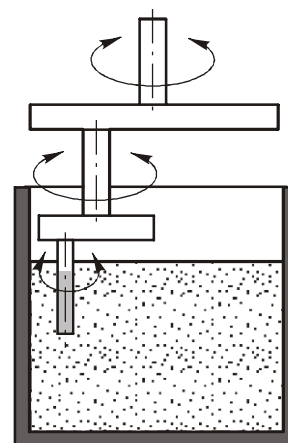
<i>Bernex F</i>	MT TiCN, Золотой, мультислои	<table border="1"> <tr><td>TiN- 1</td></tr> <tr><td>MTTiCN- 4</td></tr> <tr><td>TiN- 1</td></tr> </table> <p>средняя толщина – 4...6</p>	TiN- 1	MTTiCN- 4	TiN- 1	Фрезерование легированных сталей. Средняя скорость резания	
TiN- 1							
MTTiCN- 4							
TiN- 1							
<i>HSA</i> (скоростное резание)	Alpha Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> черный мультислои	<table border="1"> <tr><td>αAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- 6</td></tr> <tr><td>HTTiCN- 5</td></tr> <tr><td>TiN- 1</td></tr> </table> <p>средняя толщина – 12</p>	αAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 6	HTTiCN- 5	TiN- 1	Высокоскоростное резание. Черновая обработка заготовок из прутка. Абразивная обработка. Обработка отливок из чугуна	
αAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 6							
HTTiCN- 5							
TiN- 1							
<i>HSM</i> (черновое фрезерование)	Карра Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> золотой мультислои	<table border="1"> <tr><td>TiN - 1</td></tr> <tr><td>κAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 3</td></tr> <tr><td>MTTiCN - 2</td></tr> <tr><td>TiN - 1</td></tr> </table> <p>средняя толщина – 4...6</p>	TiN - 1	κAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 3	MTTiCN - 2	TiN - 1	Фрезерование кованных, литых и коррозионно-стойких сталей
TiN - 1							
κAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 3							
MTTiCN - 2							
TiN - 1							
<i>Speed Mill</i> (скоростное фрезерование)	Fine alpha Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> черный мультислои	<table border="1"> <tr><td>αAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 3</td></tr> <tr><td>MT TiCN- 3</td></tr> <tr><td>TiN- 1</td></tr> </table> <p>средняя толщина – 4...6</p>	αAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 3	MT TiCN- 3	TiN- 1	Фрезерование углеродистых, легированных и коррозионно-стойких сталей. Обработка отливок из чугуна	
αAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 3							
MT TiCN- 3							
TiN- 1							
<i>Speed Turn</i> (скоростное точение)	Карра Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> золотой мультислои	<table border="1"> <tr><td>TiN - 1</td></tr> <tr><td>κAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 6</td></tr> <tr><td>MTTiCN - 5</td></tr> <tr><td>TiN - 1</td></tr> </table> <p>средняя толщина – 10...18</p>	TiN - 1	κAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 6	MTTiCN - 5	TiN - 1	Скоростное точение отливок из стали и чугуна при тяжелых условиях резания
TiN - 1							
κAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 6							
MTTiCN - 5							
TiN - 1							
<i>HST</i>	Alpha Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> черный мультислои	<table border="1"> <tr><td>αAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 6</td></tr> <tr><td>MTTiCN - 5</td></tr> <tr><td>TiN - 1</td></tr> </table> <p>средняя толщина – 10...18</p>	αAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 6	MTTiCN - 5	TiN - 1	Универсальное покрытие для точения, отрезки, фрезерования кованных сталей при высоких скоростях	
αAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - 6							
MTTiCN - 5							
TiN - 1							

После нанесения покрытий шероховатость поверхностей пластин увеличивается [4], поэтому для уменьшения шероховатости и обеспечения округления режущих кромок пластины подвергают «сухому» полированию, например, на установках фирмы *Otec* (Германия), *Multi-Finich* (Германия) и др.

Общий вид установки «сухого» полирования модели *DF-35* фирмы *Otec* показан на рис. 6, *а*. В процессе работы установки пластины, закрепленные в быстросменных держателях, совершают разнонаправленные круговые движения в неподвижной абразивной среде, помещенной в рабочую емкость (рис. 6, *б*). Бесконтактное вращение пластин с изменяемой скоростью и глубиной погружения в специально подобранную абразивную среду позволяет добиться равномерности обработки и хорошей воспроизводимости результатов.



*а)*



*б)*

Рис. 6. Установка для «сухого» полирования модели *DF-35* фирмы *Otec*:

*а* – общий вид; *б* – схема работы

В качестве абразивной среды здесь используют, например, гранулы оксида алюминия – корракса (рис. 7) или смесь, рекомендуемую фирмой *Multi-Finich* и состоящую из 70 % карбида кремния зернистостью 1,4 мм ( $\sigma=0,24$  мм) и 30 % гранул грецкого ореха зернистостью 1,6 мм ( $\sigma=2,4$  мм) [4].

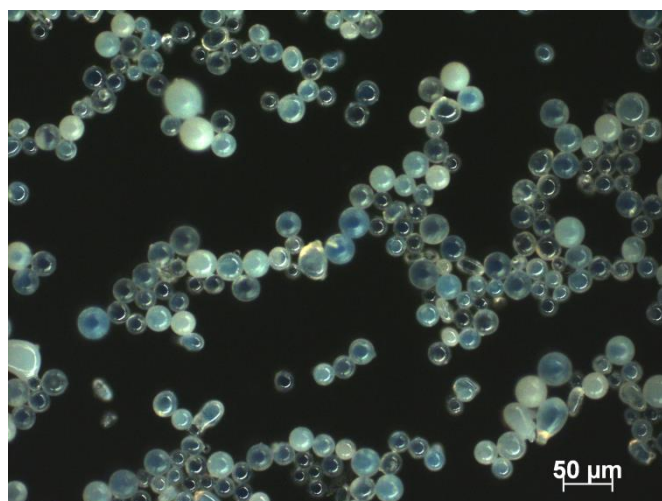


Рис. 7. Гранулы оксида алюминия – корракса ( $\times 500$ )

После полирования пластин осуществляется выборочный контроль качества износостойкого покрытия (толщина, адгезионная прочность покрытия и др.) [3]. Для этого в каждой садке берут по 3 шт. СМП в верхней, средней и нижней частях камеры установки для нанесения покрытия.

#### Библиографический список

1. Грачев С.И. Повышение адгезионной связи износостойких покрытий с твердосплавным инструментом за счет оптимизации процесса подготовки поверхностей: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. –М.:МГТУ «Станкин», 2003. –156 с.
2. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента. –М.:Машиностроение, 2011. –368 с.
3. Справочник конструктора-инструментальщика / Под общ. ред. В.А. Гречишникова и С.В. Кирсанова. –М.:Машиностроение, 2006. –512 с.
4. Кирсанов С.В., Гончаренко И.М., Бабаев А.С. Влияние «сухого» полирования твердосплавных образцов на характеристики износостойкого покрытия // Справочник. Инженерный журнал, 2013. № 4. С. 12–15.