



УДК 539.235.669.71

**Д.А. Анисов, Г.Д. Бицоев**

ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

**Ю.А. Ухов**

ТОО «КазМетизПром», г. Усть-Каменогорск

**ЗАВИСИМОСТЬ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НАПЫЛЕНИЯ ПЛЕНОК ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ  
ОТ РАССТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «КАТОД-ПОДЛОЖКА» НА УСТАНОВКЕ 01НИ-7-006 «ОРАТОРИЯ-5»**

Нанесение металлических покрытий на керамические изделия является одной из основных операций технологического процесса изготовления керамических деталей микроЭлектронных устройств, например корпусов СВЧ-транзисторов, оснований, держателей и т.п. В качестве керамического материала широко применяется оксид бериллия, имеющий высокую теплопроводность, сравнимую с теплопроводностью металлов, при высоком удельном электросопротивлении. Основными требованиями, предъявляемыми к металлическому покрытию керамики, являются следующие: адгезионная прочность соединения металл-керамика, высокая теплопроводность, низкое удельное электросопротивление, возможность последующей пайки твердыми припоями.

Технологический процесс нанесения металлопокрытия в вакууме на керамические изделия из оксида бериллия основан на распылении химически чистого металла и осаждении материала с идеальной плотностью на изделия в виде тонких пленок.

Традиционно основным металлом, предназначенным для металлизации керамических материалов, является молибден. Молибден отличается высокой температурой рекристаллизации, что обуславливает устойчивость к термическим воздействиям после нанесения покрытия, например на операциях сборки корпуса полупроводникового прибора пайкой, посадке кристалла и т.п. Высокая теплопроводность, малое удельное электрическое сопротивление молибдена делают его перспективным для использования в качестве материала коммутационной разводки в корпусах полупроводниковых приборов, для формирования контактных площадок под пайку на деталях из керамических материалов.

Процесс нанесения тонких пленок осуществляется на установке 01НИ-7-006 (Оратория-5) (рис. 1).

На рис. 1 (справа) показана поэтапная обработка подложек на планетарном подложкодержателе (рис. 2), который последовательно переводится с позиции на позицию (всего 4 позиции) пошаговым поворотом карусели на 90° пневмоприводом.

В данной статье рассматривается зависимость нескольких технологических параметров напыления от расстояния системы «катод-подложка»: времени напыления пленок тугоплавких металлов (в данном случае металлов – ниобий и молибден). Ниобий наносится для обеспечения адгезии металла к керамике. Молибден имеет одинаковый коэффициент термического расширения с керамикой в диапазоне температур 20-1000 °C. Еще одним основным параметром является толщина напыленной пленки в микронах.

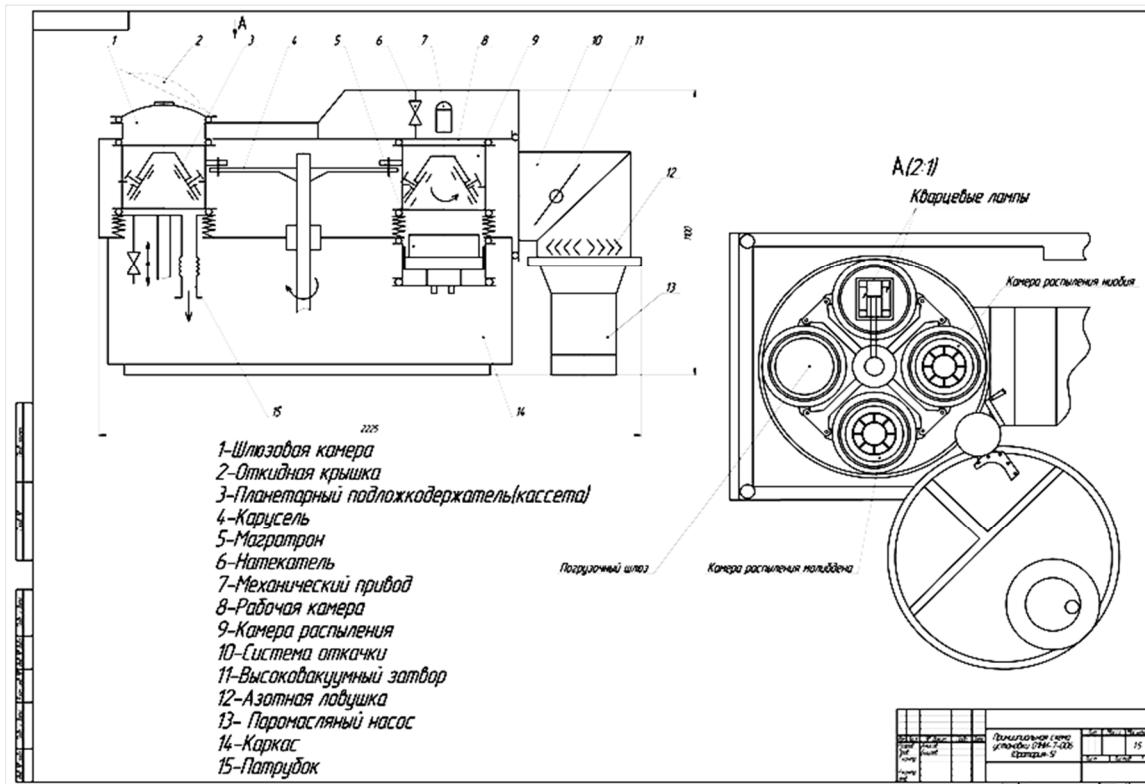


Рисунок 1 - Установка 01НИ-7-006 (Оратория-5)

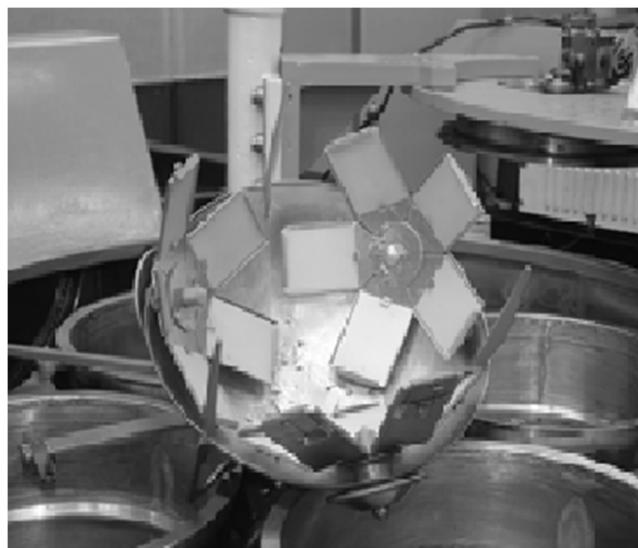


Рисунок 2 - Планетарный подложкодержатель с керамическими подложками

На рис. 3 показана схема кассеты в рабочей камере, где расстояние между нижней

точкой подложки 3 и катодом 2 составляет 110 мм.

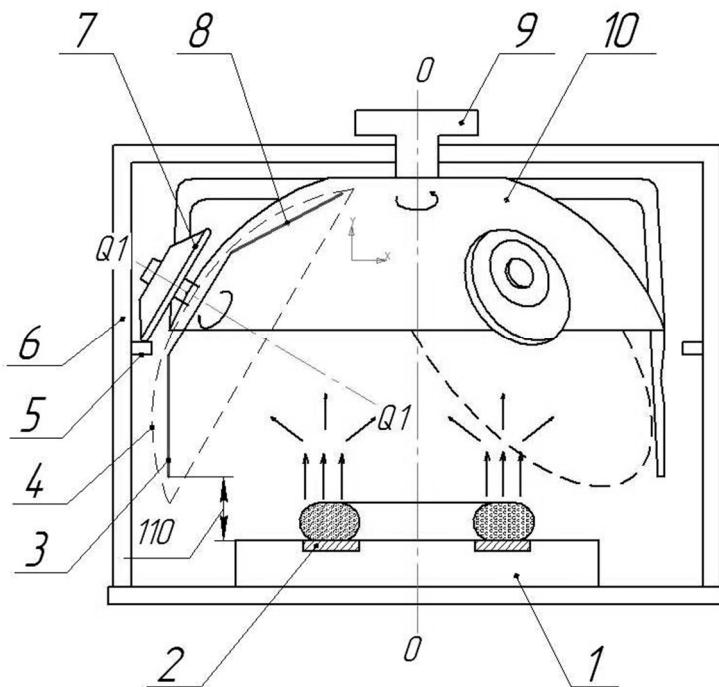


Рисунок 3 - Действующая модель кассеты и камеры напыления: 1 – магнетрон (магратрон); 2 – катод (испаритель); 3, 8 – подложки (3 лепестка по 5 штук); 4 - подложкодержатели (3 шт.); 5 – кольцевая направляющая; 6 – рабочая камера; 7 – ролики (3 шт.); 9 – приводная шестерня; 10 – кассета; О-О – центр симметрии магнетрона

При подаче напряжения между анодом (не показан на рис.) и катодом магнетрона в среде аргона при рабочем давлении около  $1 \cdot 10^{-2}$  Па возникает разряд, под действием которого происходит распыление материала катода магнетрона из твердой фазы и осаждение распыляемого материала на изделие (подложки). Корпус рабочей камеры находится под небольшим отрицательным потенциалом по отношению к аноду магнетрона, чтобы исключить попадание электронов с высокой энергией на подложки, вследствие чего могут возникнуть пробои полупроводниковых структур на керамике. Известно, что при поддерживаемом вакууме величина свободного пробега частицы - не менее 250 мм. Как показано на рис. 1, расстояние от нижней точки подложки до катода равно 110 мм. Время напыления ниобия на кассете этого типа составляет 15 минут (с толщиной пленки около 2-3 микрон), время напыления молибдена - 60 минут (с толщиной пленки около 12-15 микрон).

На рис. 4 показана схема кассеты и рабочей камеры, где кольцевая направляющая 5 смешена в рабочей камере вниз на 100 мм.

Как видно на рис. 4 поверхность подложек стала ближе к катодно-анодному узлу и расстояние между подложками и испарителем равно 10 мм, вследствие чего длина пробега частиц распыленного металла уменьшается и увеличивается скорость напыления. Время напыления ниобия составило 10 минут при толщине пленки 2-3 микрона, время напы-

ления молибдена составило 30 минут с толщиной пленки 16-18 микрон.

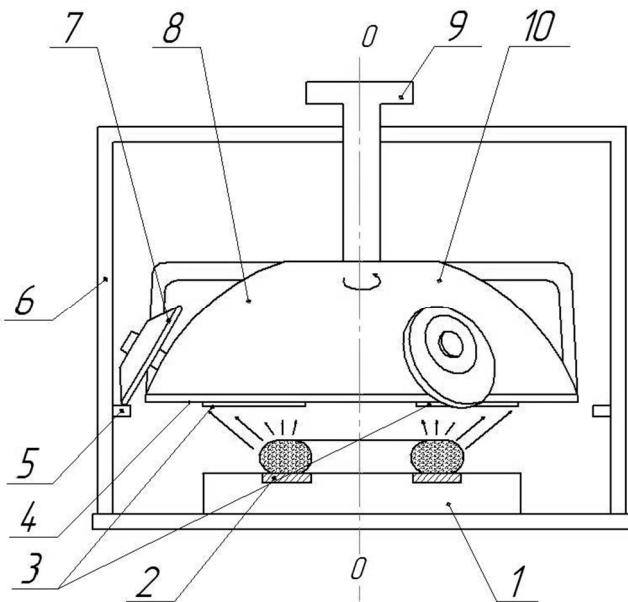


Рисунок 4 - Экспериментальная модель кассеты и камеры напыления

Изменение расстояния повлияло также на предварительный подогрев изделий. Время подогрева не сократилось (60 минут), но возросла температура подогрева изделий: от 400 до 600 °C. Это позволило улучшить адгезию ниобия с поверхностью керамики.

#### Список литературы:

1. Берлин Е.В. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок / Е.В. Берлин, С.А. Двинин, Л.А. Сейдман. - Москва: Техносфера, 2007. - 176 с.
2. Данилин Б.С. Вакуумное нанесение тонких пленок. - М: «Энергия», 1967.- 312 с.

Получено 29.10.12

УДК 622.232.8.72

**Т.Е. Ермеков, М.И. Арпабеков**

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана

#### ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВЫХ ПОЛОЖЕНИЙ ВЫЕМОЧНОГО МАНИПУЛЯТОРА ВМФ-5

Установление основных параметров и области эффективного применения флангово-фронтальной технологии в Карагандинском бассейне не требует проведения комплекса экспериментальных и теоретических исследований ряда вопросов, направленных на создание и разработку новых высокоеффективных технологических схем без постоянного присутствия людей в очистном забое [1-2].

С учетом вышеизложенного научным направлением данной работы является разработка новых поточных технологических схем выемки кругонаклонных пластов за счет применения высокоманевренных стреловидных исполнительных органов на базе фронтальных агрегатов с горными автоматическими выемочными манипуляторами и робототехническими комплексами при среднесуточной добыче более 25 000 тонн и удельных энергозатратах 0,3-0,45 кВт·ч/т.

При расчете устойчивости ВМФ-5 [3, 4] необходимо учитывать, что телескопический исполнительный орган должен обеспечивать максимальные усилия резания на резцовой коронке при отбойке угля с учетом следующих конструктивно-технических параметров:

- число степеней подвижности - 5;
- максимальный вылет стрелы - до 5,0 м;
- вынимаемая мощность пласта - 2,5..7,0 м;
- величина захвата - 0,6...1,4м;
- угол падения пласта – 0...35 градусов.

Исходя из этих условий, при расчете устойчивости за расчетные усилия на резцовой коронке при максимальном вылете можно принимать максимальные усилия на резцах, соответствующие опрокидному моменту гидродвигателя исполнительного органа.

В этом случае, если домкраты поворота или подъема стрелы развивают на резцовой коронке усилия меньше, чем при опрокидывании гидродвигателя, то при расчете устойчивости нужно принимать максимальные усилия,ываемые домкратом.

Коэффициент грузовой устойчивости стреловидных исполнительных органов по методике [5, 6] составит:

$$K_y = \frac{M_{sec}}{M_{onp}} \geq 1,05 \div 1,1, \quad (1)$$

где  $M_{onp}$  - момент от внешних сил, действующих на ВМФ-1 с секции крепи относительно оси, по отношению к которой производится проверка устойчивости ВМФ-1;  $M_{sec}$  - момент от силы веса манипулятора с секции крепи относительно этой же оси.

Однако формула (1) для определения устойчивости является усилием, создаваемым в процессе рабочей подачи исполнительного органа в горизонтальном направлении. В этом случае устойчивость работы ВМФ-5 обеспечивается при условии, что горизонтальное усилие  $R_{2n}$  не превышает усилие от реакции распора стойки  $R_{pcm}$ .

В результате статистического анализа и обработки экспериментальных данных установлено, что величины  $R_{2n}$  и  $R_{pcm}$  удовлетворительно аппроксимируются нормальным законом распределения.

Статистические функции распределения имеют следующие разновидности:

а) для горизонтального усилия подачи:

$$F(R_{2n}) = \frac{1}{2,97 \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{R_{2n}} e^{-\frac{(R_{2n}-4,72)^2}{2 \cdot 2,97^2}} \cdot dR_{2n}, \quad (2)$$

где  $R_{2n}$  – случайная величина горизонтального усилия подачи, т; 2,97- среднеквадратическое отклонение величины  $R_{2n}$ , т; 4,72- среднее значение горизонтальных усилий подачи  $R_{pet}$ , т;

б) для усилия распора стойки:

$$F(R_{pcm}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot 5,43}} \int_{-\infty}^{R_{pcm}} e^{-\frac{(R_{pcm}-19,6)^2}{2 \cdot 5,43^2}} \cdot dR_{pcm}, \quad (3)$$

где  $R_{pcm}$  – случайная величина вертикального усилия подачи, т; 5,43 - среднеквадратическое отклонение величины  $R_{pcm}$ , т; 19,6 - среднее значение усилия распора  $R_{pet}$ , т;

Проверка по критерию « $X^2$ - Пирсона» позволила установить непротиворечивость при-

---

нятой гипотезы о нормальном распределении величин  $R_{2n}$  и  $R_{pcm}$ .

Надежность устойчивой работы ВМФ-5 можно количественно оценить как вероятность того, что за заданный базовый период времени в процессе выемки усилие подачи  $R_{2n}$  не превысит усилие распора  $R_{pcm}$ . Эта вероятность может быть определена из (2) и (3) как композиция нормальных законов распределения:

$$F(R_{2n} \leq R_{pcm}) = \frac{1}{\sqrt{(\sigma^2 \cdot R_{2n} + \sigma^2 \cdot R_{pcm}) \cdot 2\pi}} \int_{-\infty}^{\Delta R} e^{-\frac{((R_{pcm} - R_{ocm,sp})^2)}{2(\sigma^2 \cdot R_{2n} + \sigma^2 \cdot R_{pcm})}} \cdot dR_{pcm}, \quad (4)$$

где  $\Delta R$ - случайная величина разности усилия подачи и распора, т.

Согласно (4), при непрерывной работе экспериментального образца ВМФ-4 в течение смены, возможно разрушение устойчивого положения машины не более чем 2,8 раза. При увеличении среднего значения усилия распора несущей стойки  $R_{pcm}$  - надежность устойчивого положения манипулятора будет еще выше (рис. 1).

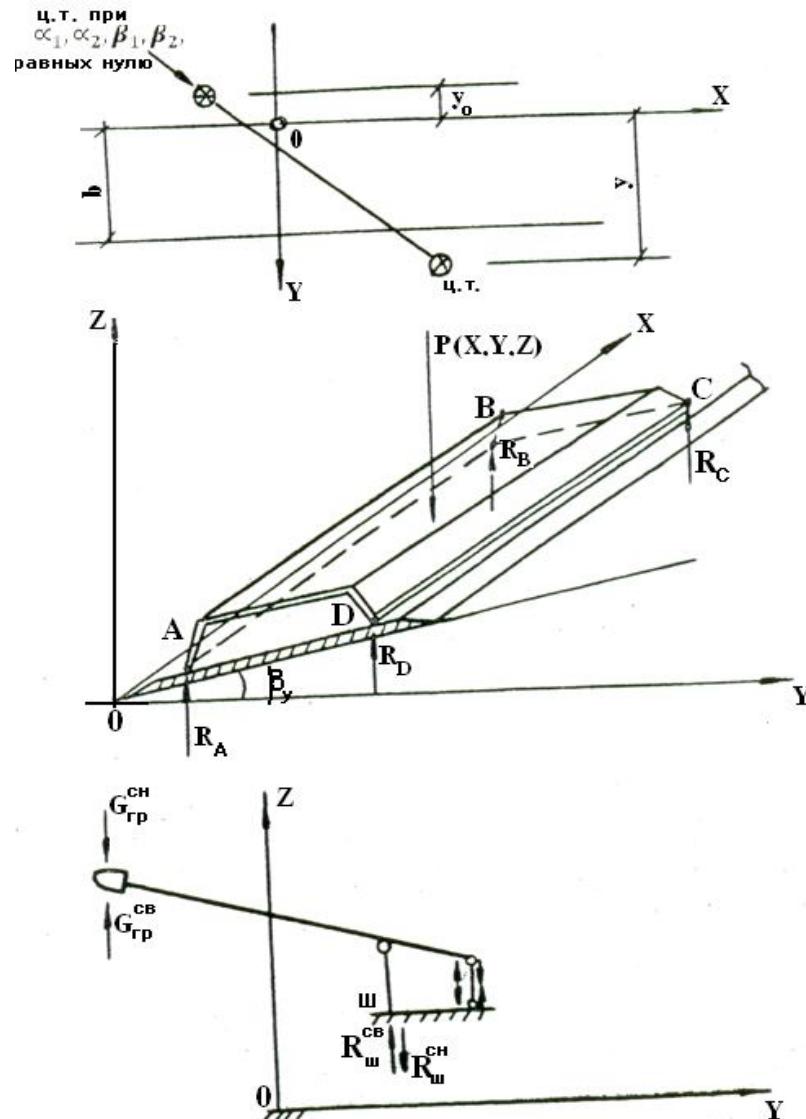


Рисунок 1 – Определение центра тяжести манипулятора

При конструктивных схемах ВМФ-2, ВМФ-3 и ВМФ-4, ВМФ-5 для устойчивой работы манипулятора в процессе отбойки угля характерны особенности, значительно отличающиеся от схемы работы ВМФ-5. Методика расчета устойчивости конструктивных схем для проходческих комбайнов типа ПК-3, ПК-9, ГПК разработана Н.А. Малевичем. Однако при расчете устойчивости [7-11] критерий устойчивости положения конструкции определяется некоторым, наперед заданным, значением коэффициента грузовой устойчивости. В свою очередь, эти коэффициенты в зависимости от тех или иных конструктивных схем задаются произвольно, и анализ устойчивого положения по этому критерию позволяет лишь качественно оценить устойчивость работы выемочного манипулятора в целом. В конструктивной схеме манипуляторов ВМФ-2, ВМФ-3, ВМФ-4, ВМФ-5 можно

рассматривать в отдельности продольную устойчивость и устойчивость в поперечном направлении.

Устойчивость ВМФ-2 и ВМФ-3 и ВМФ-4Н, ВМФ-4П, ВМФ-5 в поперечном направлении, как показали данные экспериментов, в значительной мере определяется динамическими нагрузками, создаваемыми на резцовой коронке исполнительного органа. В свою очередь эти нагрузки носят случайный характер, что обусловлено разнообразием и изменением физико-механических свойств и крепости угля по мощности пласта и по длине лавы. Соответственно усилия подачи и момент сил, создаваемые на резцовой коронке исполнительного органа, также являются случайными.

Вертикальные усилия подачи исполнительного органа  $R_{\text{en}}$ , как показали наблюдения, стремятся развернуть систему «ВМФ-5-несущий элемент» в горизонтальной плоскости. Частые отказы системы в этом случае связаны с отсутствием надежных конструктивных соединений на стыках направляющих балок.

Частота отказов из-за возможных опрокидываний системы «ВМФ-5 - несущий элемент» зависит от того, как часто момент сил, создаваемый на резцовой коронке вертикальными усилиями подачи, превысит уравновешивающий момент сил от веса всей конструкции.

Условие можно записать:

- при движении стрелы снизу вверх;
- устойчивость в поперечном направлении.

Экспериментальные исследования были проведены при расположении на конвейере выемочного манипулятора, передвигающегося с помощью распорных стоек.

Это условие можно записать:

- при движении стрелы снизу вверх:

$$R_{\text{en},\text{don}} \cdot l_{u,o} \leq \left[ (\sigma_m - \sigma_{u,o}) \cdot \frac{b}{2} - \sigma_{u,o} \cdot l_{u,m,u,o} \right], \quad (5)$$

где  $R_{\text{en},\text{don}}$  - предельно допустимое вертикальное усилие подачи;  $l_{u,o}$  - расстояние от точки приложения резцовой коронки до передней части опоры, см.;  $\sigma_m$ ,  $\sigma_{u,o}$  - соответственно вес машины и исполнительного органа;  $b$  - расстояние между точками опоры выемочного манипулятора;  $l_{u,m,u,o}$  - расстояние между центром тяжести исполнительного органа и передней части опоры, см;

- при движении стрелы сверху вниз:

$$R_{\text{en},\text{don}} \cdot (l_{u,o} + b) \leq \left[ (\sigma_m - \sigma_{u,o}) \cdot \frac{b}{2} - \sigma_{u,o} \cdot (b + l_{u,m,u,o}) \right]. \quad (6)$$

Для вертикальных усилий подачи  $R_{\text{en}}$ , как показали экспериментальные исследования и замеры, характерна значительная неравномерность. Проведенным статистическим анализом экспериментальных данных усилий  $R_{\text{en}}$  установлено их эмпирическое распределение в виде нормального закона:

$$F(R_{\text{en}}) = \frac{1}{1,89\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{R_{\text{en}}} e^{-\frac{(R_{\text{en}}-3,16)^2}{2 \cdot 1,89^2}} \cdot dR_{\text{en}},$$

где 3,16 - среднее значение вертикального усилия подачи, т; 1,89 - среднеквадратичное отклонение величины  $R_{\text{en}}$ , т.

Проверка по критерию « $\chi^2$ -Пирсона» позволила установить непротиворечивость принятой гипотезы с нормальным распределением величины  $R_{\text{en}}$ .

Можно записать:

$$F(R_{\text{en}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma^2 \cdot R_{\text{en}}}} \int_{-\infty}^{R_{\text{en},\text{don}}} e^{-\frac{(R_{\text{en},\text{don}}-R_{\text{en},\text{cp}})^2}{2 \cdot \sigma^2 \cdot R_{\text{en}}^2}} \cdot dR_{\text{en},\text{don}},$$

где  $R_{\text{ср.ср}}$ - среднее значение  $R_{\text{ср.}}$ , т.

Значение  $R_{\text{сп.спон}}$  зависит от направления движения стрелы исполнительного органа и определяется из условий:

а) при движении стрелы снизу вверх:

$$R_{\text{сп.спон}} \leq \frac{(\sigma_m - \sigma_{u.o}) \cdot \frac{b}{2} \cdot c_{u.o} \cdot l_{u.m.u.o}}{l_{u.o}};$$

б) при движении стрелы сверху вниз:

$$R_{\text{сп.спон}} \leq \frac{(\sigma_m - \sigma_{u.o}) \cdot 2 \cdot c_{u.o} \cdot (b + l_{u.m.u.o})}{l_{u.o} + b}.$$

Координатами центров тяжести узлов выемочного манипулятора принято положение, при котором данный элемент находился в равновесии при его расположении на опоре, обеспечивающей наименьшее сопротивление к повороту относительно этой точки. Затем измерялись расстояния от полученной физической точки равновесия до характерных узлов соединения элемента при сборке, с помощью которых несложно произвести привязку к общей схеме выемочного манипулятора ВМФ-5 [12].

Исходными данными для ВМФ-5 были взяты:

- вес, координаты центра тяжести из табл.;
- реакция  $G_{\text{гр}}$  при разработке угольного пласта: от 1 до 3 т;
- угол  $\beta_x$ : от 0 до  $60^\circ$  с шагом  $5^\circ$ ;
- угол  $\beta_y$ : от 0 до  $20^\circ$  с шагом  $5^\circ$ ;
- вертикальный угол исполнительного органа  $\alpha_2$  изменялся от  $-40^\circ$  до  $+40^\circ$  с шагом  $10^\circ$ ;
- горизонтальный угол  $\alpha_1$ : от 0 до  $360^\circ$  до обнаружения зоны неустойчивых положений с последующим их уточнением.

*Аналитические и экспериментальные определения веса и координат центров тяжести узлов ВМФ-5*

№ п/п	Наименование узла ВМФ-5	Веса, кг		Координаты центра тяжести, см		
		теоретический	эксперимен- тальный	$x_i$	$y_i$	$z_i$
1	Исполнительный орган	1900	2500			
2	Поворотное устройство (без домкрата подъема)	1075	1080			100
3	Домкрат подъема	125	40	0	30	20
4	Рама	610	230	0	20	34
5	Маслостанция	200	150	-100	45	60
6	Опора 1	140	105	130	30	20

*Окончание таблицы*

№ п/п	Наименование узла ВМФ-5	Веса, кг		Координаты центра тяжести, см		
		теоретический	эксперимен- тальный	$x_i$	$y_i$	$z_i$
7	Опора 2	140	105	-110	30	20
8	Захват	110	80	20	50	0
9	Блок электрооборудования	500	60	130	20	60
10	Домкрат подачи	30	60	-70	50	10

11	Домкрат подачи	30	30	70	50	10
12	Бак масляный	350	193	110	50	10
	Всего	5210	5400			

На рис. 2 приведена траектория движения точки расположения общего центра тяжести манипулятора ВМФ-5 в зависимости от различных значений угловых параметров. При этом приведены зоны неустойчивых положений манипулятора при заданной ширине колеи конвейерной линии: в сторону разработки - 43 см; в сторону завала - 45 см.

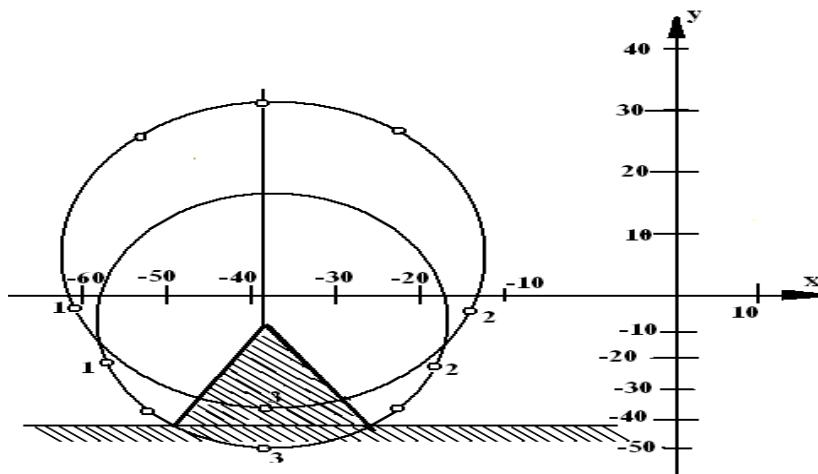


Рисунок 2 - Зоны устойчивости работы ВМФ-5

На основе приведенного графика можно сделать следующие выводы. Выемочный манипулятор в нерабочем режиме при всех положениях исполнительного органа и сложностях горно-геологических условий находится в устойчивом положении, что полностью обеспечивает монтаж, пробное маневрирование и проверку функционирования всех рабочих узлов. В рабочем режиме при движении коронки исполнительного органа снизу вверх при всех реальных диапазонах изменения углов  $\beta_x$ ,  $\beta_y$  и  $\alpha_2$  устойчивость ВМФ-5 обеспечена при значениях угла  $\alpha_1$  от 0 до  $55^\circ$  и от  $125^\circ$  до  $180^\circ$ . Предельный угол крена колеи конвейерной линии около  $10^\circ$ .

#### Список литературы

- Сагинов А.С. Применение средств микропроцессорной техники при создании роботизированного фронтального агрегата / А.С. Сагинов, Т.Е. Ермеков В.А. Лагай // Материалы Всесоюзной науч.-техн. конф. «Конструирование и технология микропроцессорных устройств». - Рига, 1986. - С. 9-16.
- Ермеков Т.Е. Горные машины: Учеб. / Т.Е. Ермеков, М.И. Арпабеков // По рекомендации Министерства образования и науки Республики Казахстан для организаций начального и среднего профессионального образования. - Астана: Фолиант, 2009. - 372 с.
- Ермеков Т.Е. Научные основы решения, а также обоснование параметров горных и строительных робототехнологических комплексов / Т.Е. Ермеков, К.С. Шоланов, М.И. Арпабеков. - Алматы: Эверо, 2009. - 272 с.
- Ермеков Т.Е. Разработка роботизированного комплекса для выемки угля / Т.Е. Ермеков, М.И. Арпабеков // Горный журнал. - 2011. - № 11. - М., 2011. - С. 77-78.
- Ермеков Т.Е. Определение зоны резания для различных режимов работы манипулятора / Т.Е. Ермеков, М.И. Арпабеков // Журнал «Вестник Казахской академии транспорта и коммуникации им. М. Тынышбаева». - 2009. - № 4 (59). - Алматы: КазАТК, 2009. - С. 118-123.

6. Ермеков Т.Е. Разработка роботизированного комплекса для выемки угля / Т.Е. Ермеков, М.И. Арпабеков // Горный журнал. - 2011. - № 11. - М., 2011. - С. 77-78.
7. Ермеков Т.Е. Задачи технической диагностики для селективной выемки роботизированного комплекса КРС / Т.Е. Ермеков, И.И. Тазабеков, М.И. Арпабеков // Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы горно-металлургического комплекса Казахстана» (Сагиновские чтения 1) / Караганда, 2009. - Ч. 1. - С. 192-195.
8. Ермеков Т.Е. Методика расчета определения эксплуатационных параметров транспортирующего става в составе роботизированного комплекса КРС / Т.Е. Ермеков, К.С. Шоланов, И.И. Тазабеков, М.И. Арпабеков // Вестник Кыргызского аграрного университета. - Бишкек, 2009. - № 1 (12). - С. 98-103.
9. Арпабеков М.И. Исследование и создание горных робототехнологических комплексов с адаптивно-программным управлением: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.05. - Алматы: ИММаш им. Акад. У.А. Джолдасбекова МОН РК и КазНТУ, 2010. - 327 с.
10. Ермеков Т.Е. Технологиялық машиналар динамикасы / Т.Е. Ермеков, М.У. Исмагамбетов, М.И. Арпабеков: оқу куралы / ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. - Астана, 2007. - 128 с.
11. Ермеков Т.Е. Технологические схемы роботизированного комплекса для безотходной экологически чистой селективной выемки / Т.Е. Ермеков, К.С. Шоланов, М.И. Арпабеков // Научно-технический и производственный Горный журнал Казахстана. - Алматы, 2010. - № 2. - С. 30-33.
12. Ермеков Т.Е. Комплекс роботизированный селективный / Т.Е. Ермеков, К.С. Шоланов, М.И. Арпабеков // Заявка № 2010 /0307.1 от 17.03.2010 № 26096; Опубл. 14.09.2012. бюллетень № 9.

Получено 26.11.12

УДК 622.271:622.831

**Т.М. Кумыкова, В.Х. Кумыков**  
ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

#### ВЛИЯНИЕ ГИДРОПНЕВМОАККУМУЛЯТОРА СЖАТОГО ВОЗДУХА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ПНЕВМОЭНЕРГОКОМПЛЕКСА

Объектом исследований является технология выработки, аккумулирования и распределения пневматической энергии с применением гидропневматического аккумулятора (ГПА) сжатого воздуха в пневмоэнергокомплексе подземного рудника.

Работа основной массы технологического оборудования (буровых станков, кареток, погрузочных машин и т.д.) по своему характеру является вероятностной, в то время как наиболее естественным режимом работы компрессорных агрегатов является непрерывный режим, что связано с трудностями пуска и остановок мощных энергетических установок. Эти обстоятельства на практике приводят к непрерывным колебаниям основных параметров сжатого воздуха (его расхода и давления) практически во всех элементах пневматической сети. При этом в наиболее невыгодном с энергетической точки зрения положении находятся элементы пневмосети, из которых происходит непосредственный забор сжатого воздуха. В то же время параметры сжатого воздуха у технологического оборудования оказывают непосредственное влияние на производительность этого оборудования. Так, при возрастании давления сжатого воздуха на 0,1 МПа производительность бурения увеличивается в среднем более чем на 20 % при одновременном снижении удельного расхода сжатого воздуха более чем в 1,5 раза. В то же время снижение давления в забоях ниже номинального приводит к резкому ухудшению показателей работы пневмомеханизмов.

Некоторое сглаживающее воздействие на параметры сжатого воздуха оказывают демпферные свойства трубопровода и характеристика компрессорной станции. С этой

точки зрения более целесообразным на подземных рудниках является использование центробежных компрессоров, имеющих характеристику  $P_{kc} = f(Q_{kc})$  положе, чем у поршневых компрессоров [1]. Однако и это обстоятельство не позволяет поддерживать стабильное давление у оборудования в течение всей рабочей смены.

Проведенное обследование пневмоэнергокомплекса Тишинского рудника (г. Риддер), который содержит в своем составе центробежные компрессоры, показало, что перепад давления сжатого воздуха у технологического оборудования в течение рабочей смены составляет более 0,2 МПа: от 0,65 МПа в начале и конце смены до 0,45÷ 0,4 МПа в ее наиболее напряженные часы.

Одним из путей в устранении приведенных недостатков работы пневмоэнергокомплекса является автоматизация пневматического хозяйства шахт и рудников. Принципиально возможно построение автоматизированной системы на основе одного из следующих вариантов:

- управление характеристикой компрессорной станции  $P_{kc} = f(Q_{kc})$ ;
- управление характеристикой пневмосети  $P_{nc} = f(Q_{nc})$ ;
- комбинирование двух предыдущих способов.

Из всех вариантов менее трудоемкой является разработка автоматизированной системы регулирования по первому из приведенных вариантов. Известные системы регулирования производительности компрессорных станций построены именно на этом принципе. Регулирование характеристики  $P_{kc} = f(Q_{kc})$  в них осуществляется путем дросселирования воздуха, перепуском части воздуха с выхода компрессора на его вход, изменением частоты вращения приводного двигателя и т.д.

При этом надо учесть, что в основе работы пневмоэнергокомплекса, оснащенного подобными системами, по-прежнему остается проблема согласования выходных характеристик компрессорной станции и пневмосети  $P_{nc} = f(Q_{nc})$ . Внедрение автоматизированных систем регулирования производительности компрессорной станции позволяет в некоторой степени снизить колебания давления сжатого воздуха в шахтной пневмосети. Но стабилизация давления в ней полностью не обеспечивается, так как расход воздуха в часы с максимальным количеством работающих потребителей может превысить технические возможности компрессорной станции. Требуется стабилизировать работу пневмосети как в часы минимального, так и максимального потребления сжатого воздуха пневмоприемниками.

Одним из положительных эффектов включения ГПА в состав пневмоэнергокомплекса рудника является то, что его наличие позволяет замкнуть в отдельности характеристики компрессорной станции и пневмосети на характеристику ГПА. В первом приближении характеристика ГПА представляет собой горизонтальную линию  $P_{GPA} = \text{const}$ . Но этот режим действует только во время активной работы ГПА.

Включение ГПА в состав шахтного пневмоэнергокомплекса позволяет управлять работой компрессоров вне зависимости от потребляемого шахтной пневмосетью в каждый момент времени количества сжатого воздуха. Это дает возможность аккумулировать избытки сжатого воздуха, имеющиеся при работе компрессорной станции в междусменные перерывы, с последующим использованием их для восполнения дефицита сжатого воздуха в рабочую смену.

Помимо этого, наличие ГПА в системе пневмоэнергокомплекса дает возможность управлять работой пневмосистемы не только за счет регулирования производительности компрессорной станции, но и за счет управления режимами накопления сжатого воздуха в ГПА и согласования его работы с работой компрессорной станции во времени.

Анализ пневмоэнергокомплекса Белоусовского рудника (п. Белоусовка, Восточно-Казахстанская область) показал, что при общей производительности компрессорных станций  $12 \text{ м}^3/\text{с}$  сжатого воздуха в действующих забоях составляет  $0,4 \text{ МПа}$ , дефицит сжатого воздуха в пиковые нагрузки составляет  $3,33 \text{ м}^3/\text{с}$ . Среднее давление снижает производительность пневмоприемников на 20-30 %. Продолжительность пиковых нагрузок составляет 2,1 ч в течение смены. Колебания давления в шахтной пневматической сети в течение смены находятся в пределах  $0,08\text{--}0,3 \text{ МПа}$ . Для решения этой проблемы требуется ввести в шахтный пневмоэнергокомплекс ГПА сжатого воздуха, который позволил бы вывести его работу на принципиально новый режим.

С целью повышения эффективности эксплуатации пневмоэнергокомплекса Белоусовского рудника был построен ГПА сжатого воздуха. Проведены экспериментальные исследования ГПА как в режиме компенсации, так и в режиме постоянной эксплуатации. По результатам испытания определены эффективность и наиболее рациональный режим эксплуатации ГПА в системе пневмоэнергокомплекса подземного рудника.

Для определения параметров сжатого воздуха использовались датчики давления и температуры, установленные на выходе из компрессорной станции, входе в шахтную пневмосеть, в пневмокамере ГПА и в точках массового забора воздуха на магистрали от компрессорной станции до ГПА.

При работе ГПА контролируется:

- уровень воды в гидрокамере;
- давление воздуха в ГПА;
- давление воздуха в пневмосети 5 горизонта (примерно равное давлению в компрессорной, так как вышеуказанные горизонты отработаны).

Регистрация давления осуществлялась манометрами МПГ-270, смонтированными на 5 горизонте с записью показаний на диаграммах.

При обработке результатов замеров сжатого воздуха в пневмоэнергокомплексе без ГПА установлено следующее.

Давление сжатого воздуха в забое при неработающих пневматических приемниках (перфораторы, буровые станки и т.д.) колеблется в пределах  $0,5\text{--}0,7 \text{ МПа}$ . Давление сжатого воздуха в действующих забоях при работающих пневматических приемниках изменяется в пределах  $0,35\text{--}0,5 \text{ МПа}$ , причем преобладающим является давление сжатого воздуха, равное  $0,4\text{--}0,48 \text{ МПа}$ . Продолжительность пиковых нагрузок в течение смены достигает  $1,7\text{--}3,4 \text{ ч}$ , а преобладающим является пиковый период продолжительностью 2,1 часа в смену.

Давление сжатого воздуха на компрессорной станции в период замеров колеблется в пределах  $0,58\text{--}0,8 \text{ МПа}$ . Преобладающим является давление, равное  $0,6\text{--}0,7 \text{ МПа}$ . Колебание давления сжатого воздуха равняется  $0,22 \text{ МПа}$ , преобладающим –  $0,15 \text{ МПа}$ . В работе находится в среднем 4-5 компрессоров. Колебание давления сжатого воздуха в течение смены составляет  $0,1\text{--}0,3 \text{ МПа}$ .

Обработка полученных данных при работающем ГПА показала, что наиболее рациональный режим эксплуатации ГПА позволяет в течение суток работать на 3-х компрессорах, а с 8 часов до 9 часов и с 17 часов до 18 часов - на 4-х компрессорах. При таком режиме эксплуатации компрессорной станции давление сжатого воздуха в действующих забоях равнялось  $0,56\text{--}0,62 \text{ МПа}$ , с преобладающим давлением  $0,6 \text{ МПа}$ . Колебание давления сжатого воздуха составило  $0,04\text{--}0,06 \text{ МПа}$ , с преобладающим –  $0,05 \text{ МПа}$ .

Давление сжатого воздуха в компрессорной станции шахты «Капитальная» равнялось  $0,66\text{--}0,74 \text{ МПа}$ , преобладающим является  $0,68 \text{ МПа}$ . Колебание давления сжатого воздуха

составило 0,08 МПа. В гидрокамере с 0 часов 20 минут и с 2 часов 26 минут до 3 часов 23 минут потребление сжатого воздуха из ГПА не происходит (закрыты задвижки на подающем и отводящем трубопроводах после зарядки ГПА), кроме того, ГПА не в работе с 10 часов 15 минут до 12 часов 30 минут, так как полностью разряжен.

Анализ диаграмм показывает, что ГПА не работает в среднем 3,2 часа в сутки, что приводит в течение года к значительному увеличению расхода электрической энергии.

Кроме того, эксплуатация ГПА показала, что объем жидкости в камерах уменьшается в течение 3-х месяцев на 350-400 м<sup>3</sup>, который приходится добавлять.

Опыт эксплуатации ГПА показал, что для работы пневмоэнергокомплекса Белоусовского рудника в оптимальном режиме необходимо разработать схему управления ГПА в автоматическом режиме, поэтому был разработан проект автоматического управления ГПА. Первый вариант проекта автоматического управления ГПА является упрощенной схемой без использования ЭВМ.

Система автоматизации ГПА предусматривает стабилизацию давления в пределах 0,76-0,63 МПа дросселированием сечений входного и выходного воздухопроводов с помощью задвижки, а также ступенчатым изменением производительности от 0 до 120 % одного из четырех работающих компрессоров при среднем расходе сжатого воздуха 5,75 м<sup>3</sup>/с. Работа регулируемого компрессора осуществляется по заданной программе, исключающей его работу в часы прохождения максимума нагрузки с 9 до 11 и с 18 до 22 часов. В качестве регулируемого компрессора принят компрессор 4М10-100/8 Пензенского компрессорного завода, оборудованный системой автоматического регулирования давления (САРД). Работа ГПА в пневмоэнергокомплексе Белоусовского рудника в автоматическом режиме позволила увеличить давление сжатого воздуха в действующих забоях в течение смены с 0,4 до 0,58 МПа и за 21 месяц получить экономию электрической энергии в размере 6215 тыс. кВт·ч.

Таким образом, результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод, что наличие в системе шахтного пневмоэнергокомплекса гидропневматического аккумулятора выводит работу пневмосистемы на принципиально новый режим работы, при котором характеристики компрессорной станции и шахтной пневмосети замыкаются каждая в отдельности на характеристику ГПА. Ввод гидропневмоаккумулятора сжатого воздуха в состав пневмоэнергокомплекса позволяет реализовать систему автоматического регулирования его работы на качественно новых принципах: за счет управления режимами накопления сжатого воздуха в ГПА и согласования работы компрессорной станции и ГПА во времени. Применение в пневмоэнергокомплексах рудников подземных хранилищ сжатого воздуха обеспечивает стабилизацию и повышение давления сжатого воздуха в действующих забоях вне зависимости от количества работающих пневмоприемников, а также существенно экономит электрическую энергию при выработке сжатого воздуха и выравнивает график суточного энергопотребления.

#### Список литературы

1. Цейтлин Ю.А. Влияние емкости шахтной пневматической сети на колебания давления сжатого воздуха у потребителей // Горная электромеханика и автоматика. - 1974. - Вып. 25. - С. 105-110.
2. Дудин В.И. К вопросу о зависимости расхода сжатого воздуха в шахтной сети от давления / В.И. Дудин, Ю.А. Цейтлин // Горная электромеханика и автоматика. - 1973. - Вып. 22. - С. 142-146.
3. Исследовать состояние рудничного пневматического хозяйства на Зыряновском, Лениногорском, Иртышском комбинатах и выдать данные по его реконструкции, обеспечивающие снижение энергетических затрат на выработку сжатого воздуха на 10-15 % // Инф. кар-

- та / ВНИИцветмет: Руководитель темы Павлов В.Д. – Усть-Каменогорск, 1984. – 58 с.
4. Лисовский Г.Д. Методика стабилизации режима работы шахтной пневмосети / Г.Д. Лисовский, Т.М. Кумыкова // Наука и образование – ведущий фактор стратегии «Казахстан-2030»: Тр. IV Междунар. науч. конф. – Караганда: Каргту, 2001. – С. 279-281.
5. Кумыкова Т.М. Энергосбережение на подземных рудниках / Т.М. Кумыкова, В.Х. Кумыков // Бъдешето проблемите на световната наука: Материалы за 4-а международна научна практична конференция, 17-25 декабря. – Т. 23. – Технологии: БялГРАД-БГ ООД. – София, 2008. – С. 26-28.
6. Предвар. пат. РК № 19314. Гидропневмоаккумулятор сжатого воздуха / Т.М. Кумыкова, В.Х. Кумыков; Опубл. 15.04.2008, Бюл. № 4.

Получено 7.11.12

---

УДК 622.23.05

**М.К. Скаков, Б.К. Рахадилов**  
ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

**ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЦЕМЕНТАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ОПОРЫ  
СКОЛЬЖЕНИЯ БУРОВОГО ДОЛОТА**

Опоры скольжения шарошечного бурового долота, как известно, испытывают высокие циклические нагрузки и требуют наличия высокой твердости и износостойкости опорной поверхности. Данных свойств можно добиться, применяя лишь поверхностную химико-термическую обработку металлов, и наиболее приемлемым и обеспечивающим данные требования процессом является процесс цементации [1, 2]. Наиболее значимым недостатком этого процесса при его традиционном исполнении, является большая продолжительность обработки (часы и десятки часов). Поэтому одной из основных задач в области химико-термической обработки является существенная интенсификация процессов диффузионного насыщения методами обработки концентрированными потоками энергий [3, 4]. Наиболее перспективным энергосберегающим методом среди них является метод электролитно-плазменной обработки (ЭПО) [5]. Было обнаружено, что скорость диффузии элементов в поверхностном слое при обработке в электролитной плазме значительно выше, чем при обычных процессах [6].

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является исследование влияния электролитно-плазменной цементации на фазово-структурное состояние и механические свойства поверхности опоры скольжения бурового долота из стали 18ХН3МА-Ш.

При изготовлении трехшарошечного долота III-244,5 на АО «Востокмашзавод» в качестве материала для шарошек применяется цементируемая легированная теплостойкая сталь 18ХН3МА-Ш, которая в данной работе выбрана в качестве объекта исследования в соответствии с заключенным договором между ВКГТУ им. Д. Серикбаева и АО «Востокмашзавод».

ЭПО буровых долот проводили на разработанной нами и изготовленной на средства АО «Фонд науки» РК опытно-промышленной установке (рис. 1) [7].

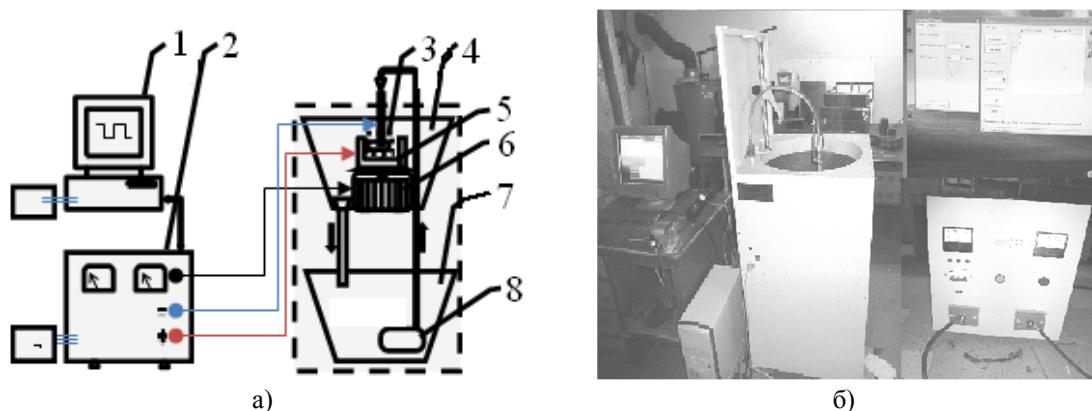


Рисунок 1 – Принципиальная схема (а) и общий вид (б) опытно-промышленной установки: 1 – персональный компьютер; 2 – источник питания; 3 – сопло для электролитно-плазменной обработки (плазмотрон); 4 – рабочая ванна 5 – механизм зажима и установки детали или образца; 6 – шаговый двигатель; 7 – резервуар для электролита; 8 – насос

Установка представляет собой: источник постоянного тока (1), персональный компьютер (2), обрабатываемый буровой инструмент из стали устанавливали и закрепляли на механизме зажима (5), сопло для электролитно-плазменной обработки (плазмотрон) (3) с вставленным катодом из нержавеющей стали, шаговый двигатель (6), рабочая ванна (4), изготовленная из диэлектрического оргстекла, объемом 15 литров. Также использовался насос (8) с регулируемой подачей электролита, работающей в агрессивных средах, и диэлектрический резервуар (7) объемом 15 литров. Источником питания (2) служил мощный выпрямитель, дающий на выходе максимально 360В/60А. Управление технологическим процессом обработки осуществляли с помощью персонального компьютера. Компьютерное управление позволяет плавно и достаточно точно регулировать основные энергетические параметры плазменной струи и динамику перемещения обрабатываемой детали. Зажим (5) позволяет регулировать необходимую глубину погружения образца или детали в электролит. Электролит из резервуара (7) подается насосом (6) на сопло (4) конусной формы, в которое вставлен катод из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Обеспечивается охлаждение до необходимой (поддерживалась на уровне  $25\pm1^{\circ}\text{C}$ ) температуры. Из рабочей ванны (5) использованный электролит подается обратно в резервуар (7). Измерение температуры проводили двумя хромель-копелевыми термопарами (рис. 2).

Упрочнение стали 18ХН3МА-Ш осуществляли в следующих режимах: при нагреве - напряжение  $U=320\text{ В}$ , сила тока  $I=35\text{-}40\text{ А}$ , при выдержке в течение 1-5 минут - напряжение  $U=160\text{-}180\text{ В}$ , сила тока  $I=20\text{-}25\text{ А}$ . Температура нагрева при цементации  $850\text{-}860^{\circ}\text{C}$ . После нагрева до заданной температуры проводили выдержку в течение 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 5; 7 минут [8]. Последующую закалку осуществляли в потоке охлажденного электролита.

Нами была проведена серия экспериментов с электролитами:

1. 15 % водный раствор кальцинированной соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .
2. 15 % водный раствор кальцинированной соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  + 10 % глицерин  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ .
3. 10 % водный раствор кальцинированной соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  + 20 % глицерин  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ .

Исследования фазового состава и кристаллической структуры образцов стали осуществляли методами рентгеноструктурного анализа на дифрактометре X'Pert Pro в  $\text{CuK}_{\alpha}$ -излучении. Морфологию поверхности стали изучали на оптическом микроскопе «ALTAMI-MET-1М» НИИ «Нанотехнология и новые материалы».



Рисунок 2 – Плазматрон в процессе ЭПО бурового долота

Микротвердость поверхностных слоев образцов до и после обработки измеряли методом вдавливания алмазного индентора на приборе ПМТ-3М НИИ «Нанотехнология и новые материалы» при нагрузке 100 г и выдержке под нагрузкой 10 с в соответствии с ГОСТ 9450–76 [9].

Рентгеноструктурный анализ образцов стали 18ХН3МА-Ш в исходном состоянии (рис. 3, а) и после электролитно-плазменной обработки в электролите из 15 % водного раствора  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (3,5 мин) (рис. 3, б) выявил наличие линий  $\alpha$ -фазы на основе Fe, а после цементации в модифицированном слое появились линии фаз  $\alpha$ -Fe,  $\gamma$ -Fe,  $\text{Fe}_3\text{C}$  и  $\text{FeO}$ .

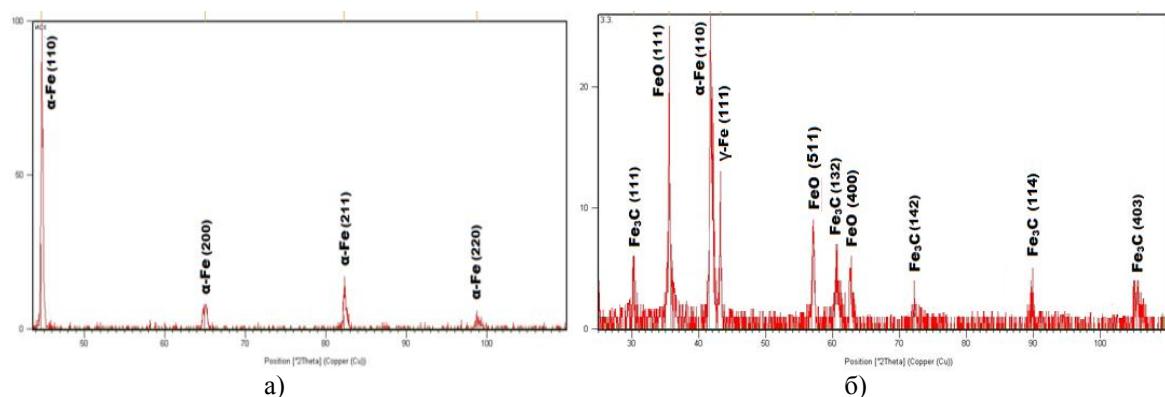


Рисунок 3 – Рентгеновские дифрактограммы стали 18ХН3МА-Ш: а) в исходном состоянии; б) после ЭПО в электролите 15 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (3,5 мин)

Электролитно-плазменная обработка стали 18ХН3МА-Ш в электролите из 15 % водного раствора  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  с глицерином привела к образованию на поверхности стали цементита  $\text{Fe}_3\text{C}$  и оксида  $\text{Fe}_2\text{O}$  (рис. 4). При этом необходимо отметить, что увеличение продолжительности обработки до 7 мин приводит к образованию на поверхности остаточного аустенита  $\gamma$ -Fe (рис. 4, б).

Исследовали влияние параметров режима электролитно-плазменной обработки на микротвердость поверхности стали 18ХН3МА-Ш. Микротвердость стали в исходном состоянии составляет 2700 МПа. После электролитно-плазменной цементации в 15 %

водном растворе кальцинированной соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  с выдержкой в течение 1,5 мин микротвердость увеличивается до 5500 МПа (рис. 5,а).

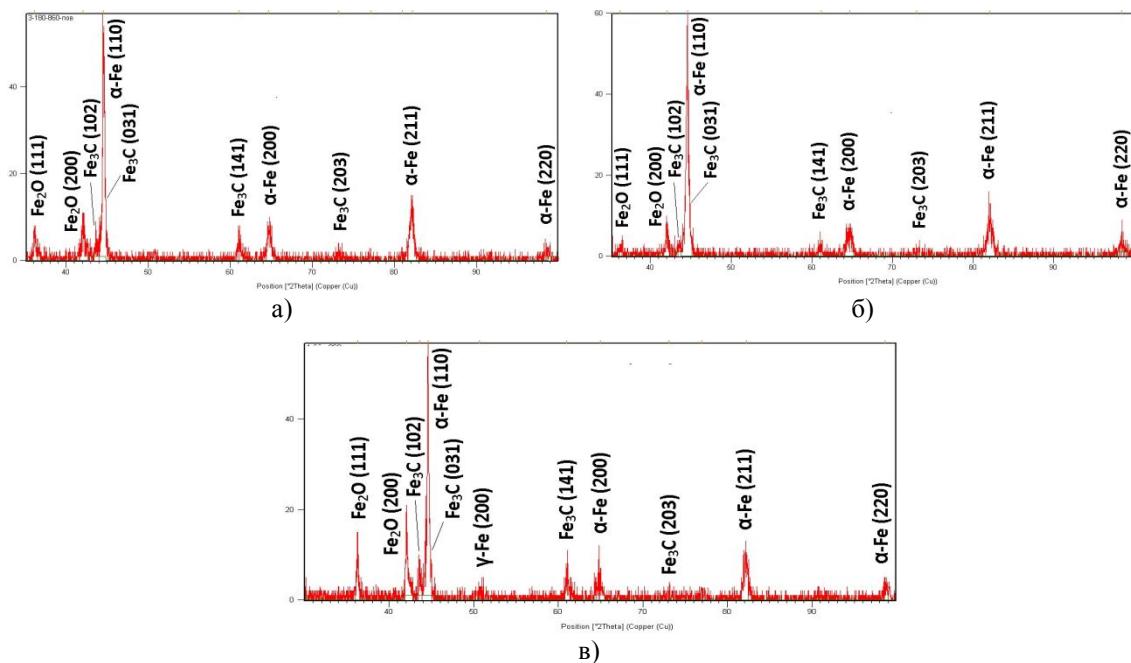


Рисунок 4 – Рентгеновские дифрактограммы стали 18ХН3МА-Ш после ЭПО:

- а) в электролите 10 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  + 20 %  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$  (3 мин); б) 10 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  + 20 %  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$  (5 мин);  
в) 10 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  + 20 %  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$  (7 мин)

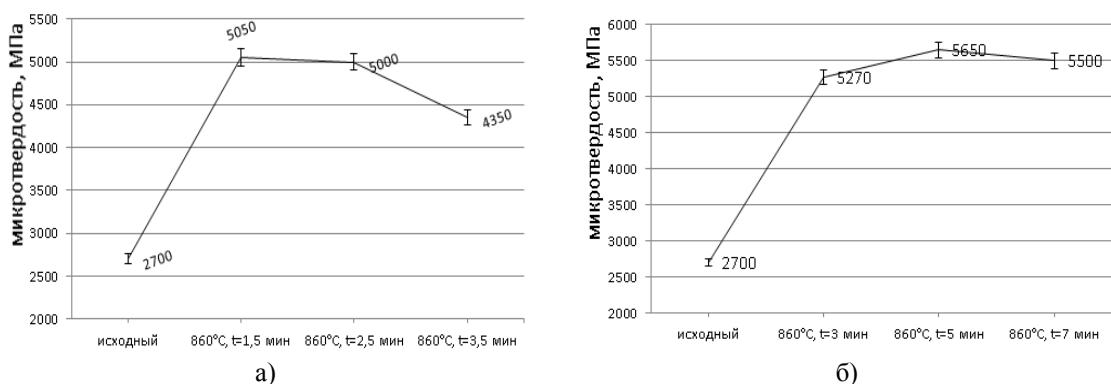


Рисунок 5 - Зависимость микротвердости цементованного слоя стали 18ХН3МА-Ш от времени выдержки: а) 15 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; б) 10 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  + 20 %  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$

На рис. 5,б показана зависимость микротвёрдости цементованного слоя стали 18ХН3МА-Ш в 10 % водном растворе кальцинированной соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  с глицерином от времени выдержки. Видно, что цементация в 10 % водном растворе кальцинированной соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  с глицерином приводит к возрастанию микротвердости до 5650 МПа (рис. 5,б).

Видно также, что увеличение времени выдержки до 7 мин приводит к уменьшению микротвердости стали. Снижение твердости при увеличении времени выдержки до 7 мин связано с образованием в структуре стали остаточного аустенита (рис. 4). При этом установлено, что самым оптимальным режимом электролитно-плазменной цементации является цементация в 10 % водном растворе кальцинированной соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  с глицерином с выдержкой 5 мин при температуре 860 °C.

Максимальную твердость (5,6 ГПа) стали 18ХН3МА-Ш достигли после насыщения при 860 °C в течение 5 мин.

Распределение микротвердости по толщине цементованного слоя стали 18ХН3МА-Ш после электролитно-плазменной обработки представлено на рис. 6. Здесь использовали водный раствор, содержащий 10 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  + 20 %  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$ . Из рисунка видно, что микротвердость верхних слоев поверхности обработанных образцов меньше, чем микротвердость на глубине 50-100 мкм. Снижение микротвердости на самой поверхности образца объясняется, по-видимому, наличием остаточного аустенита и оксидного слоя. Таким образом, электролитно-плазменная обработка позволяет получить упрочненный слой толщиной 100-200 мкм (рис. 6).

Результаты измерения микротвердости поверхности обработанных образцов свидетельствуют о ее повышении относительно основы и равномерном распределении по обработанной поверхности.

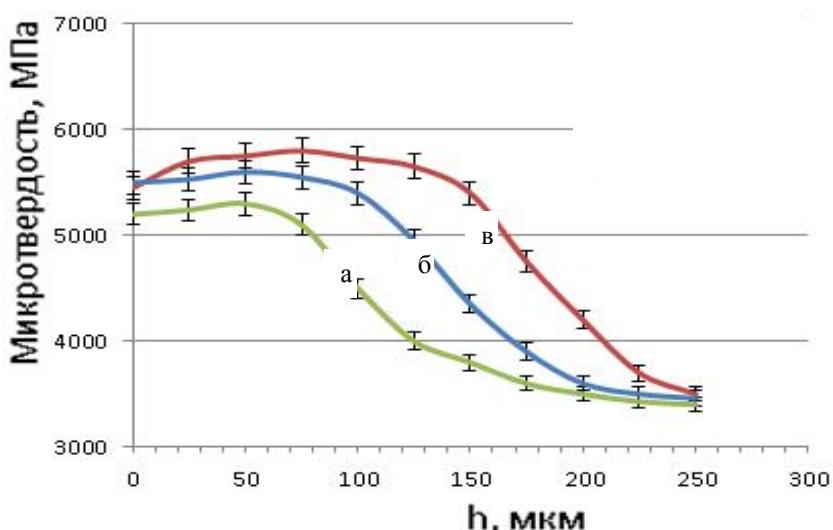


Рисунок 6 – Зависимость микротвердости от глубины поперечного разреза образцов стали 18ХН3МА-Ш после цементации при температуре 860 °C в течение: а – 3 мин; б – 5 мин; в – 7 мин

Увеличение микротвердости в 2 раза относительно исходного значения свидетельствует о повышении прочности после электролитно-плазменной обработки. Увеличение микротвердости обусловлено, главным образом, образованием частиц упрочняющих фаз. Микротвердость и износостойкость всех модифицированных слоев стали в электролитной плазме достаточно высока. Модифицированный слой состоит из мартенсита, цементита и дисперсных карбидов, а также карбидов легирующих компонентов. Однако последние не обнаруживаются методами рентгеноструктурного анализа, возможно из-за их дисперсности и малого количества при выбранных режимах ЭПО [10, 11].

Анализируя полученные в работе результаты, можно сделать следующие выводы:

1. Разработан способ электролитно-плазменной цементации поверхности опоры скольжения бурового долота в катодном режиме, который позволяет проводить модификацию поверхности низкоуглеродистых сталей в общем и обеспечить высокую кинетическую эффективность процесса диффузационного насыщения.

2. Установлено, что в плазменном слое электрического газового разряда при протекании электрического тока из водного раствора кальцинированной соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  образуются ионы углерода, которые науглероживают поверхность образцов стали 18ХН3МА-Ш и приводят к образованию карбидных фаз. Добавление глицерина в водный раствор кальцинированной соды  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  способствует повышению концентрации углерода в растворе, соответственно увеличению толщины диффузационного слоя и твердости поверхности бурового долота из стали 18ХН3МА-Ш.

3. На рентгеновских дифрактограммах образцов стали 18ХН3МА-Ш в исходном состоянии присутствуют линии  $\alpha$ -Fe. После электролитно-плазменной обработки в структуре стали, кроме линий  $\alpha$ -Fe, появляются линии цементита  $\text{Fe}_3\text{C}$ , который сильно повышает поверхностную прочность и твердость исследуемой стали.

4. Разработан технологический процесс электролитно-плазменной обработки буровых инструментов из низкоуглеродистых сталей, позволяющий увеличить их ресурс, повысить микротвердость до  $5,6 \pm 0,3$  ГПа. Определены состав электролита (водный раствор, состоящий из 10 % кальцинированной соды и 20 % глицерина) и режим оптимальной обработки (нагрев до температуры 860 °C при 320 В, выдержка 5 мин при 180 В и закалка в том же электролите). На разработанную технологию установлен приоритет от 10.05.2012 г.

Применение на практике разработанного нами способа электролитно-плазменной обработки позволяет достигать высокую твердость и износостойкость поверхностей опоры скольжения буровых долот при наличии прочного и пластичного основания.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке АО «Фонд науки» Республики Казахстан на 2010-2012 гг.

#### Список литературы:

1. Мурошенко В.А. и др. Буровые машины и механизмы. – М.: Машиностроение, 2002. – Т. 1. – С. 279.
2. Сараев Ю.Н. Модификация покрытий тугоплавкими соединениями с целью повышения эксплуатационной надежности изделий / Ю.Н. Сараев, М.К. Скаков, А.А. Штерцер и др. // Сварочное производство. – 2011. – № 7. – С. 24-30.
3. Соснин Н.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение / Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский. – М.: Машиностроение, 2008. – 406 с.
4. Skakov M.K. Investigating the influence of electrolytic-plasma processing on structure and wear resistance of the chisel tool steel. 3-th European conference on Tribology «ECOTRIB 2011», Vien, Austria, June 7-10, 2011. – P. 257-260.
5. Суминов И.В. Мир материалов и технологий: В 2-х т. / И.В. Суминов, П.Н. Белкин и др. – М.: Изд. Техносфера, 2011. – Т. 1. – 464 с.
6. Gupta P. Electrolytic plasma technology: Science and engineering - an overview / P. Gupta, G. Tenhundfeld, E.O. Daigle, D.Ryabkov // Surf. & Coat. Technol. In 2007. – V. 25. – P. 37-46.
7. Skakov M.K. Investigating the influence of electrolytic-plasma processing on structure and wear resistance of the chisel tool steel. 3-th European conference on Tribology «ECOTRIB 2011», Vien, Austria, June 7-10. – 2011. – P. 257-260.
8. Skakov M.K. Research of surface hardening influence on the microstructure, microhardness and wear resistance 18CrNi3MoA-Sh steel / M.K. Skakov, L. Bayatanova, M. Shefler, // Tribology, 2012. – № 5. – P. 147-153.

9. Григоревич В.К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
10. Skakov M.K. The drilling tool electrolyte-plasma material hardening technology planning and research / M.K. Skakov, L. Bayatanova, M. Sheffler / VOLUME II The 7th International Forum on Strategic Technology «IFOST2012», Tomsk, September 17-21, 2012. – P. 198-201.
11. Сараев Ю.Н. Комплексный подход к повышению эксплуатационной надежности деталей и изделий / Ю.Н. Сараев, А.А. Штерцер, М.К. Скаков и др. // Технология машиностроения. – 2011. – № 8. – С. 39-42.

Получено 25.10.12

---

УДК 621.2.082.18

**М.К. Скаков, Б.К. Рахадилов**  
ВКГТУ им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5,  
УПРОЧНЕННОЙ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

Модифицирование высокоенергетическим воздействием является эффективным средством повышения физико-механических и эксплуатационных свойств поверхности быстрорежущих сталей [1-3]. Повышение эксплуатационных свойств режущего инструмента в значительной мере определяется технологией упрочнения. Широко известные технологии упрочнения (ионно-плазменное азотирование, напыление нитридных, карбонитридных слоев, нитрида титана, карбидов хрома) требуют применения специального дорогостоящего оборудования, создания специальных участков обработки и экономически целесообразны при массовом, крупносерийном производстве [4, 5].

Практически такие ограничения не имеют места при упрочнении рабочих поверхностей инструмента электролитно-плазменным методом [6]. Технология электролитно-плазменного упрочнения может быть осуществлена в условиях малого термического участка единичного и мелкосерийного производства, опытных и ремонтных предприятиях при минимальных затратах на оборудование, вспомогательные материалы и электроэнергию, при простоте ее осуществления и максимальной эффективности обработки [7].

Несмотря на практическое применение этого метода, изменение трибологических свойств модифицированных слоев, сформированных при электролитно-плазменной обработке, еще недостаточно изучены.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы является исследование изменений структуры и износстойкости поверхностного слоя быстрорежущей стали Р6М5 при нитроцементации в электролитной плазме.

В соответствии с поставленными задачами в качестве объекта исследования была выбрана быстрорежущая вольфрамомолибденовая сталь Р6М5 (0,80 – 0,88 С; 3,8 – 4,4 Сr; 5,5–6,5 W; 1,7–2,1 V; 5,0–5,5 Mo). Выбор материала исследования обоснован тем, что сталь Р6М5 является наиболее распространенной в металлообработке, типичной быстрорежущей сталью умеренной теплостойкости.

Заготовки образцов для исследований в виде параллелепипедов с размерами  $10 \times 30 \times 30$  мм<sup>3</sup> вырезали из прутков стали Р6М5 в состоянии поставки. Перед электролитно-плазменной обработкой заготовки подвергали обычной для этой стали термообработке: закалке от 1230 °C в масле и последующему трехкратному отпуску при 560 °C (длительность каждого отпуска 1 ч, охлаждение в воздухе) [8]. Далее заготовки со всех сторон пришлифовывались на глубину 1 мм. Перед обработкой поверхности образцов стали тщательно обез-

жиривали.

В соответствии с [9, 10] электролитно-плазменную обработку осуществляли нитроцементацией в катодном режиме в электролите из водного раствора, содержащего 15 % карбамида, 10 % карбоната натрия и 5 % глицерина, на установке в НИИ «Нанотехнология и новые материалы» ВКГТУ. Источником питания служил мощный выпрямитель, дающий на выходе максимально 360В/60А в форме постоянного тока. Обработку образцов производили нагревом до температуры 550 °C, выдержка достигалась при этих температурах за счет электрического потенциала в слое плазмы, создаваемого между жидким электродом (электролитом) и поверхностью катода (образцом). Условия обработки представлены в табл. 1.

Таблица 1  
*Технические параметры электролитно-плазменной обработки*

Состав электролита (%), массовый)	Температура выдержки T, °C	U, В	I, А	t, мин
Карбамид (15)+ карбонат натрия (10)+ глицерин (5)+ вода	550, 650, 750	175	30	5

Исследование структуры поверхности стали проводили на оптическом микроскопе «ALTAMI-MET-1М» в НИИ «Нанотехнология и новые материалы» ВКГТУ. Трибологические испытания образцов стали Р6М5 проводили в условиях сухого трения скольжения на трибометре (машине трения) CETR UMT-3 в Институте материаловедения и соединительных технологий университета имени Отто-von-Гуерике (г. Магдебург, Германия) во время прохождения научной стажировки. Трибометр (рис. 1) предназначен для определения коэффициентов трения образцов плоской и цилиндрической формы при варьировании уровня контактной нагрузки, траектории относительного движения образцов, температуры и среды.

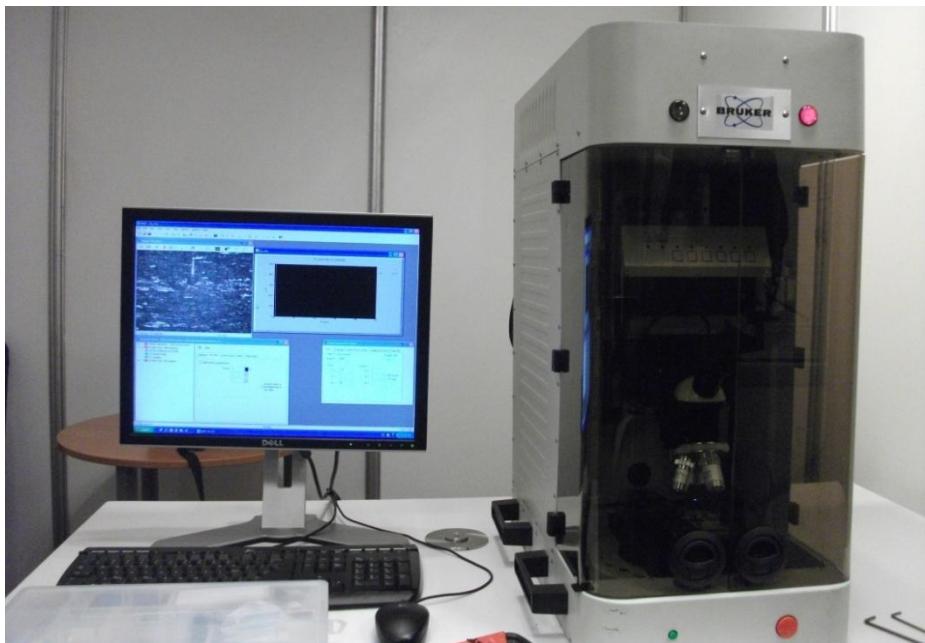


Рисунок 1 - Общий вид трибометра UMT-3M

Трибометр позволяет проводить испытания образцов на трение в диапазоне контактных нагрузок от 1 до 100 Н со скоростью продольного перемещения образцов от 0,001 до 1 мм/с при температуре до 350 °C. Испытывались плоские образцы из быстрорежущей стали Р6М5. Испытания проводились при поступательном движении образцов вдоль оси X со скоростью 0,2 мм/с при равномерном увеличении контактной нагрузки от 0 до 32 Н.

Длина пути трения по оси X составляла 8 мм.

Испытания образцов на абразивное изнашивание проводили на установке НИИ «Нанотехнология и новые материалы» ВКГТУ для испытаний на абразивное изнашивание при трении о нежестко закрепленные частицы абразива. Износстойкость испытуемого материала оценивалась путем сравнения его износа с износом эталонного образца (сталь 45) согласно ГОСТ 23.208-79. Относительную износстойкость стали определяли по формуле

$$K_H = \frac{g_{\vartheta} \rho_H N_{\vartheta}}{g_H \rho_{\vartheta} N_H},$$

где  $g_{\vartheta}$ ,  $g_H$  – значения потерь массы при испытаниях эталонного образца и образцов исследуемого материала, соответственно, г;  $\rho_{\vartheta}$ ,  $\rho_H$  – плотность эталонного и исследуемого материала, г/см<sup>3</sup>;  $N_{\vartheta}$ ,  $N_H$  – количество оборотов ролика при испытаниях эталонного и исследуемого материалов.

При исследовании структуры приповерхностных слоев образцов стали Р6М5, подвергнутых нитроцементации в электролитной плазме, обнаружены структурные изменения. На рис. 2 показаны микроструктуры поверхностного слоя стали до и после нитроцементации. Микроструктура стали Р6М5 в исходном состоянии, то есть после закалки и трехкратного отпуска, состоит из отпущеного мартенсита и твердых карбидов (рис. 2, а). После нитроцементации наблюдается рост дисперсных карбидов, появление каплеобразных нитридных частиц. Таким образом, микроструктура упрочненной поверхности образца стали представляет собой мелкозернистую мартенситную структуру с дисперсными включениями нерастворимых нитридов и карбидов.

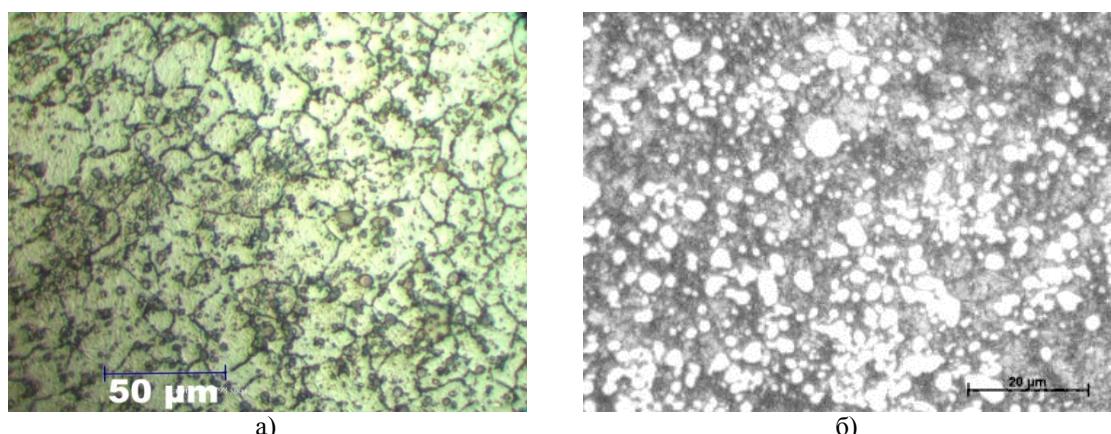


Рисунок 2 - Микроструктура поверхности стали Р6М5: а) до (исходный) и б) после нитроцементации при температуре 550 °C

Микроструктура диффузионного слоя стали Р6М5 показана на рис. 3. Видно, что на

поверхности образцов стали Р6М5 формируется нитридная зона глубиной ~25 мкм. Слой распределен по всей нагреваемой поверхности стали равномерно.

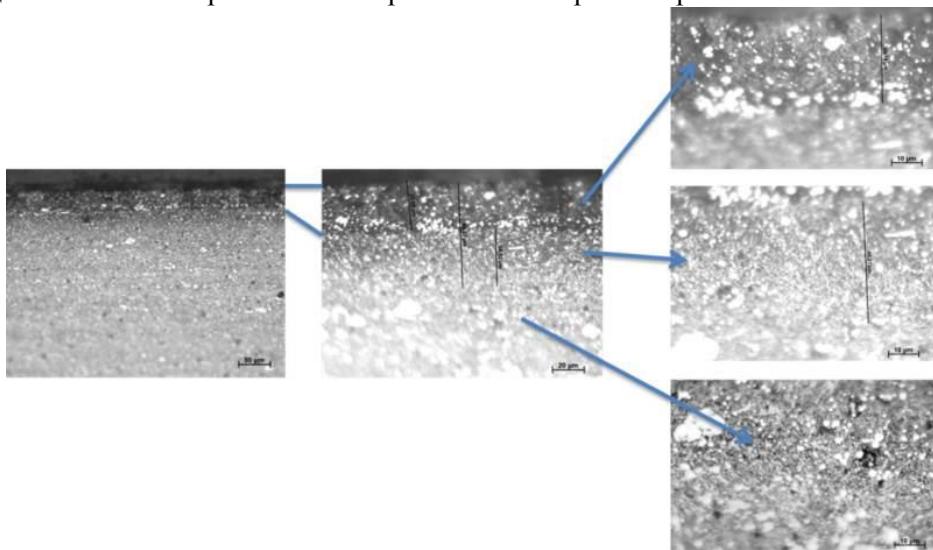


Рисунок 3 - Микроструктура диффузационного слоя стали Р6М5 после нитроцементации при температуре 550 °C

Испытания образцов на трение проводили при поступательном движении образцов вдоль оси X со скоростью 0,2 мм/с и длиной хода 8 мм. Типичные графики изменения коэффициента трения, глубины изнашивания и контактной нагрузки от времени (трения) поступательного движения образцов в исходном состоянии и после нитроцементации показаны на рис. 4.

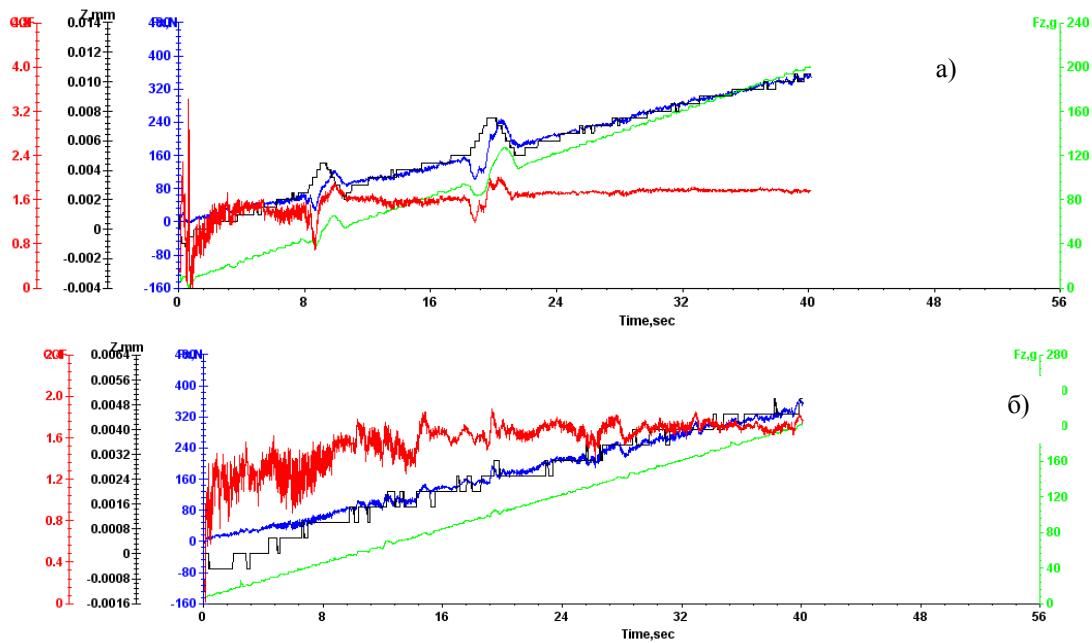


Рисунок 4 – График зависимости коэффициента трения, глубины шрама и нагрузки от времени трения: а) до, б) после нитроцементации

В исходном состоянии коэффициент трения равен 1,7. После нитроцементации коэффициент трения уменьшается до 1,5 (рис. 4). Уменьшение коэффициента трения объясняется повышением износостойкости и твердости поверхности образца с образованием карбонитридных фаз легирующих элементов [11].

Из графика видно, что максимальная глубина шрама поверхности образца стали Р6М5, образовавшегося при трении, составляет до обработки 9,4 мкм, а после - 4,4 мкм, что показывает повышение твердости после нитроцементации. Фотоснимки зоны контакта образцов приведены на рис. 5.

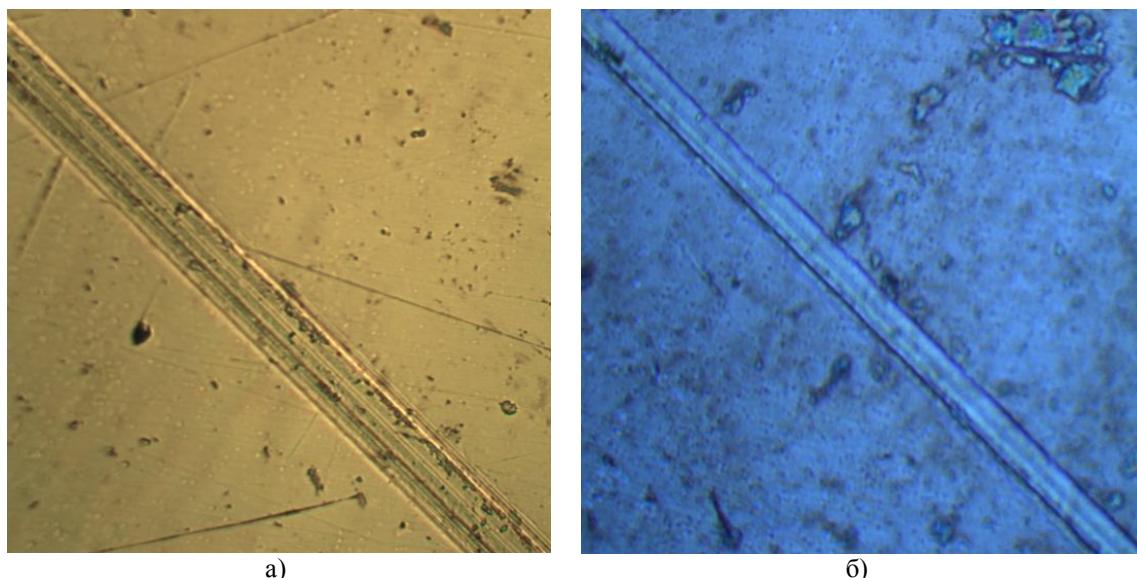


Рисунок 5 – График зависимости коэффициента трения, глубины шрама и нагрузки от времени трения: а) до, б) после нитроцементации

В табл. 2 приведены результаты испытания на абразивное изнашивание. Видно, что абразивная износостойкость после нитроцементации возрастает.

Таблица 2  
*Результаты испытания на абразивное изнашивание*

Состояние	Относительная износостойкость
Исходное	1,0
После нитроцементации при 550 °C	1,25±0,02

Увеличение износостойкости после нитроцементации обусловлено, главным образом, образованием мелкодисперсных частиц карбонитридных фаз. Как было опубликовано в [12], модифицированный слой состоит из мартенсита, цементита и дисперсных карбидов, а также нитридов легирующих компонентов.

Анализируя полученные в работе результаты, можно сделать следующие выводы:

- Разработан способ электролитно-плазменной нитроцементации поверхности режу-

шего инструмента в катодном режиме, который позволяет проводить модификацию поверхности быстрорежущих сталей и обеспечить высокую кинетическую эффективность процесса диффузационного насыщения.

– Экспериментально установлено, что на поверхности образца стали Р6М5 после нитроцементации в электролитной плазме формируется сплошной модифицированный слой толщиной около 25 мкм.

– Определено, что после нитроцементации коэффициент трения поверхности образца стали снижается с 1,7 до 1,5. При этом выявлено, что максимальная глубина шрама после нитроцементации уменьшается с 9,4 до 4,4 мкм при одинаковых условиях контактной нагрузки, что указывает значительное повышение износостойкости и твердости поверхностного слоя стали Р6М5.

– Установлено, что в результате нитроцементации в электролитной плазме абразивная износостойкость поверхностных слоев стали Р6М5 увеличивается на 25%.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке комитета науки МОН РК на 2012-2014 гг. по программе «Грантовое финансирование научных исследований».

#### Список литературы

1. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
2. Маслов А.Р. Перспективные высокие технологии: Справочник // Инженерный журнал. – 2008. – № 1. – С. 10-24.
3. Сараев Ю.Н. Модифицирование покрытий тугоплавкими соединениями с целью повышения эксплуатационной надежности изделий / Ю.Н. Сараев, М.К. Скаков, А.А. Штерцер и др. // Сварочное производство. – 2011. – № 7. – С. 24-30.
4. Соснин Н.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение / Н.А. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский. – М.: Машиностроение, 2008. – 406 с.
5. Сараев Ю.Н. Комплексный подход к повышению эксплуатационной надежности деталей и изделий / Ю.Н. Сараев, А.А. Штерцер, М.К. Скаков и др. // Технология машиностроения. – 2011. – № 8. – С.39-42.
6. Суминов И.В. Мир материалов и технологий: В 2-х т. / И.В. Суминов, П.Н. Белкин и др. – М.: Изд-во Техносфера, 2011. – Т. 1. – 464 с.
7. Рахадилов Б.К. Технология и оборудование для электролитно-плазменного упрочнения рабочих поверхностей режущего инструмента // Сб. трудов IX Междунар. конф. «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», 27-28 июня, Астраханский государственный университет. – г. Астрахань, 2012 – С. 47-50.
8. Позняк Л.А. Инstrumentальные стали: Справочник / Л.А. Позняк, С.И. Тишаев, Ю.М. Скрынченко. – М.: Металлургия, 1977. – 167 с.
9. Rakhadilov B.K. Changing of Structure and Mechanical Properties of P6M5 Steel for Nitriding and Carbonitriding in Electrolyte Plasma / B.K. Rakhadilov, M.K. Skakov, M. Sheffler / VOLUME II The 7th International Forum on Strategic Technology «IFOST2012», Tomsk, September 17-21, 2012. – P. 202-206.
10. Skakov M.K. Investigating the influence of electrolytic-plasma processing on structure and wear resistance of the chisel tool steel. 3-th European conference on Tribology «ECOTRIB 2011», Vien, Austria, June 7-10, 2011. – P. 257-260.
11. Рахадилов Б.К. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру, фазовый состав и микротвердость стали Р6М5 / Б.К. Рахадилов, М.К. Скаков // Вестник КазНТУ. 2012. – № 3 (91). – Алматы, 2012. – С.81-87.
12. Skakov M.K. Change of structure and wear resistance of P6M5 steel for processing in electrolyte plasma / M.K. Skakov, B.K. Rakhadilov, M. Sheffler // Tribology, 2012. – № 5. – P. 164-171.

Получено 25.10.12

---

---

