

Г. В. Кирик, д-р техн. наук, президент (концерн «Укрросметалл», г. Сумы, Украина),
Г.Г. Ткаченко, главный инженер проекта (ООО "Международный институт компрессорного и энергетического машиностроения")

Разработка методов и способов повышения надежности и долговечности компрессорных установок горных машин с применением высокотемпературной вакуумной пайки

Установлены закономерности изменения долговечности деталей и узлов шахтных компрессоров при применении высокотемпературной вакуумной пайки и разработаны на этой основе методы и способы повышения надежности деталей и узлов шахтных компрессоров, что имеет важное научно-производственное значение для добывающей отрасли страны.

Ключевые слова: компрессорные установки горных машин, методы, способы, надежность, долговечность, высокотемпературная вакуумная пайка

Встановлено закономірності зміни довговічності деталей і вузлів шахтних компресорів при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки та розроблені на цій основі методи й способи підвищення надійності деталей і вузлів шахтних компресорів, що має важливе науково-виробниче значення для добувної галузі країни.

Ключові слова: компресорні установки гірських машин, методи, способи, надійність, довговічність, високотемпературна вакуумна пайка

The regularities of changes in the longevity of parts and assemblies mine compressors when applying high-temperature vacuum brazing and developed on this basis, methods and ways of improving the reliability of parts and components mining compressor, which is of great scientific and industrial importance for the country's mining industry.

Keywords: compressors mining machinery, techniques, methods, reliability, durability, high temperature vacuum brazing

Анализ проблемы высокотемпературной пайки узлов и деталей шахтных компрессоров указал, что в современных компрессорных установках применяют ряд сложных узлов, в которых соединить детали можно только с помощью высокотемпературной пайки. При соответствующем выборе состава припоя высокотемпературная пайка позволяет создать прочное соединение, надежно работающее при вибрационных нагрузках в компрессорных установках. Кроме обеспечения прочности, пайка позволяет соединить одновременно множество деталей в недоступных или труднодоступных местах при одной технологической операции. Как правило, сварка для создания таких узлов неприменима [1 – 3].

Установление закономерностей изменения долговечности деталей и узлов шахтных компрессоров при применении высокотемпературной вакуумной пайки и разработка на этой основе методов и способов повышения надежности деталей и узлов шахтных компрессоров является актуальной научной задачей, которая имеет важное значение для добывающей отрасли страны.

Разработаны методы повышения надежности деталей и узлов шахтных компрессорных машин путем применения пайки с широким паяльным зазором [4].

Проведены исследования технологии и способов пайки с широким паяльным зазором. Наполнитель и припой выбирают в соответствии с маркой паяемой стали и требуемых свойств соединения. Расчет количества наполнителя ведут, учитывая объем зазора V_3 , см³, коэффициент заполнения K_3 и плотность наполнителя γ_n , г/см³

$$Q_n = V_3 K_n \gamma_n.$$

Так как расчетный объем V_3 может отличаться от фактического, целесообразно при заполнении зазора наполнителем определять его фактическую массу.

Количество припоя Q_n определяется суммой

$$Q_n = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4,$$

где Q_1 – масса припоя в паяльном зазоре; Q_2 – масса технологической добавки припоя в питателе, препятствующей переходу в зазор флюса и газа; Q_3 – масса припоя в

соединительных каналах; Q_4 – масса припоя в полости сорбционного насоса.

Q_2 , Q_3 , Q_4 определяют, исходя из конкретных размеров элементов паяемого узла. Q_1 определяет по формуле

$$Q_1 = Q_n \gamma_n (1 - K_s) / \rho_n,$$

где γ_n – плотность припоя, г/см³; ρ_n – насыпная масса наполнителя, г/см³.

Конструкцию питателя выбирают в каждом конкретном случае. Питатель целесообразно выполнять цилиндрическим с минимально возможным диаметром камеры, так как в этом случае технологическая добавка остающегося в питателе припоя минимальна. Расчет толщины стенки питателя выполняют по формуле

$$s = dP/2[\sigma],$$

где S – толщина стенки, мм; d – внутренний диаметр питателя, мм; P – давление в питателе, МПа; σ – допустимое напряжение, МПа.

Разработаны методы повышения надежности и долговечности паяных рабочих колес центробежных шахтных компрессорных

машин (ЦКМ). Усовершенствованы конструкции и технологии изготовления колес [4].

Основной нагрузкой, вызывающей в деталях статические напряжения, являются центробежные силы собственной массы. В основном диске с фрезерованными лопатками в наиболее напряженном сечении (сопряжении полотна диска со ступицей) напряжения уменьшаются в 2 – 2,5 раза по сравнению с напряжением в диске без лопаток. Характер распределения напряжений в покрывающих дисках колес с фрезерованными в основном диске или соединенными заклепками штампованными лопатками практически не отличается (рис. 1).

Надежности работы мощных ЦКМ уделяют особое внимание, так как даже кратковременная остановка машины в условиях непрерывного шахтного производства может нанести ущерб, значительно превышающий стоимость компрессора. Для обеспечения надежности при вибрационной нагрузке колеса изготавливают из прочных низколегированных, высокопрочных высоколегированных сталей и титановых сплавов. Для соединения лопаток с дисками колеса применяют заклепки, сварку и высокотемпературную пайку.

В исследовании влияния основных факторов пайки: температуры, продолжительности выдержки при пайке, размера паяльного зазора, разрежения в камере вакуумной печи – установили, что в наибольшей мере изменяется ударная вязкость соединения. Необходимой для определения пригодности паяного соединения рабочего колеса, работающего в условиях вибрационной нагрузки, что характерно для подземных условий шахт, является усталостная прочность.

Наряду с испытанием образцов на заключительном этапе разработки новой конструкции и технологии изготовления рабочего колеса проводят статические и динамические испытания опытных образцов колес. На рис. 2 показана схема испытания рабочего колеса при осевой статической или динамической нагрузке.

Технологический процесс изготовления паяных рабочих колес состоит из следующих основных этапов: изготовление деталей с

технологическими припусками для пайки, подготовка деталей к пайке, пайка, термическая обработка паяного колеса и окончательная обработка. Пайку колес выполняют при нагреве в вакуумных печах и при автовакуумном нагреве. Термическую обработку паяных колес при автовакуумном нагреве выполняют в обычных электрических нагревательных печах.

Наличие в конструкции резких переходов, пазов, отверстий приводит к местному повышению внутренних напряжений. Одной из основных характеристик концентрации напряжений является так называемый теоретический коэффициент напряжений K , который принимают как отношение величины внутреннего напряже-

ния в какой-либо точке при наличии концентратора к напряжению в той же точке при отсутствии концентратора напряжения. Значение коэффициента существенно зависит как от характера внешней нагрузки, так и от физико-химических свойств материала детали, а также от геометрических характеристик детали и ослабляющих эту деталь концентраторов напряжений. Тавровое соединение характеризует радиус перехода, и от его размера соответственно зависит величина концентратора напряжений. Соответственно, для достижения минимального значения концентратора напряжения необходимо увеличение плавности перехода, т.е. увеличение радиуса галтели. Однако это требование

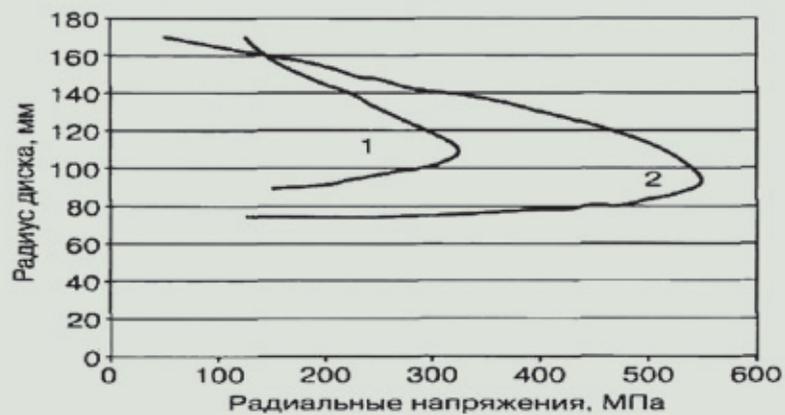


Рис. 1. Кривые радиальных напряжений в основном диске при частоте вращения 14 000 об/мин:
1 – паяного рабочего колеса с фрезерованными лопатками;
2 – клепаного колеса со штампованными лопатками

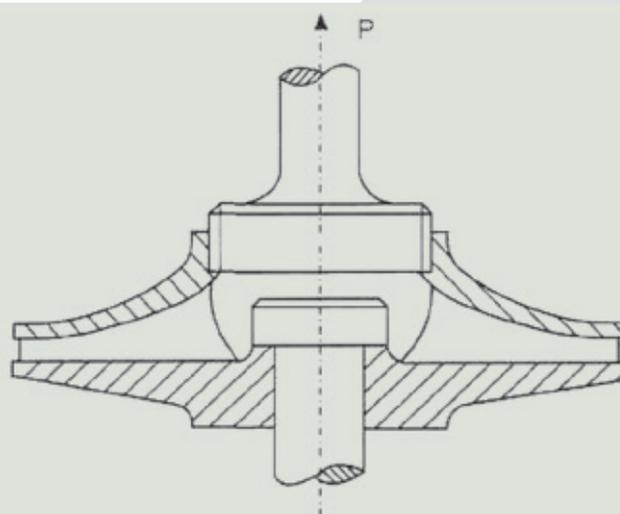


Рис. 2. Схема испытания паяного колеса при осевой статической или циклической нагрузке

противоречит условию уменьшения металлоемкости конструкции. Следовательно, необходим поиск оптимального решения. Расчет радиуса галтели можно выполнить по зависимости

$$K = 1 + 0,4\sqrt{\frac{2S - k}{R}},$$

где K – коэффициент концентрации напряжений; S – толщина стенки тавра, мм; k – высота радиусного сопряжения, мм; R – радиус галтели, мм.

Преобразуя зависимость и полагая, что $K=1$, $k=R$, получим

$$R=2S.$$

Конструкция, в которой выдержано данное соотношение, позволяет получать равнопрочное тавровое соединение в любой точке.

Паяные рабочие колеса, процесс пайки которых прошел длительную промышленную проверку, эксплуатируют в компрессорах при радиусе галтели паяного соединения, не превышающем 0,5 мм. Для обеспечения работоспособности таких колес удаляют часть полотна диска («ромашка»). При этом величина концентратора напряжений для лопатки толщиной 7 мм, как следует из указанного выше расчета, составляет 3,07. Испытанием паяного тавра из стали 07X16H6 с толщиной стенки 7 мм и радиусом галтели 0,5 мм определили, что конструкционная усталостная прочность составляет 185 МПа. Для увеличения усталостной прочности вдвое, что достигает уровня основного металла, достаточно уменьшить коэффициент концентрации K вдвое, т.е. $3,07:2=1,53$. Из формулы следует, что для этого необходима галтель $R=5,1$ мм. В табл. 1 приведены результаты расчета размера радиуса для лопаток толщиной 4 – 10 мм, что включает весь возможный диапазон размеров паяных колес. Приведенные данные свидетельствуют о том, что для повышения конструкционной усталостной прочности паяных колес шахтных компрессоров до уровня основного металла необходимо увеличить размер радиуса галтели паяного шва до 5 мм.

Получить в паяном соединении такую большую галтель можно, предварительно сформировав ее из металлического порошка. Для этого в углу соединения с одной

или обеих сторон тавра при сборке формируют из пасты галтель с необходимыми по условиям равнопрочности формой и размерами (рис. 3).

При формировании галтели из порошка наполнителя его количество можно определить по формуле

$$Q_n = SLq,$$

где Q_n – масса наполнителя, г; S – сечение углового шва, см²; L – длина углового шва, см; q – насыпная масса наполнителя, г/см³.

При длине шва $L=1$ см и треугольной форме галтели с катетом K , см, необходимо наполнителя, г:

$$Q_n = 0,5K^2q.$$

Для пропитки углового шва длиной 1 см необходимо припоя, г:

$$Q_{np} = 1,1Q_n.$$

Определенное по данному выражению значения количества припоя достаточно для формирования плотного металла шва и заполнения капиллярных зазоров между стенкой и полкой тавра. При увеличении количества при-

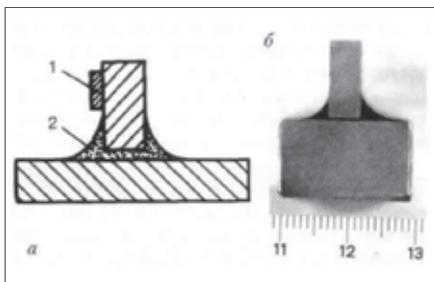


Рис. 3. Схема пайки (а) и макрошлиф (б) таврового соединения с предварительным формированием галтелей:
1 – паяный шов; 2 – припой

поя его избыток кристаллизуется на поверхности галтели, образуя крупнодендритную шероховатую поверхность (рис. 4). Точная дозировка припоя обеспечивает качественное формирование шва с гладкой поверхностью и идеальным сопряжением поверхности шва и паяемого металла (рис. 5).

Изучены особенности пайки тонкостенных стальных теплообменников [4]. Механические свойства ленты после термической обработки по режиму: нагрев до температуры 1120°C, выдержка 15 мин, охлаждение в вакуумной печи

до температуры 100°C: нагрев до температуры 700°C, выдержка 60 мин, охлаждение в вакуумной печи до температуры 20°C – приведены в табл. 2.

Проведенные исследования показали, что сталь 20X13 позволяет с помощью термической обработки паяных ПРЭ получить прочные с запасом пластичности, коррозионностойкие ПРТ, обладающие высокой надежностью и долговечностью, что важно для подземных условий шахт.

Исследована высокотемпературная пайка шликерным припоем стальных ПРЭ. Показано, что плакирующий слой на основе сплава системы Ni-Cr-Si-B увеличивает предел прочности тонких материалов до 25% (рис. 6).

Усовершенствованы конструкции теплообменных аппаратов шахтных компрессорных установок [5]. Разработан теплообменник пластинчато-ребристый, который отличается тем, что покрытие имеет состав и толщину, обеспечивающие формирование паянных соединений на перекрестках провода и в контакте его с листами канала,

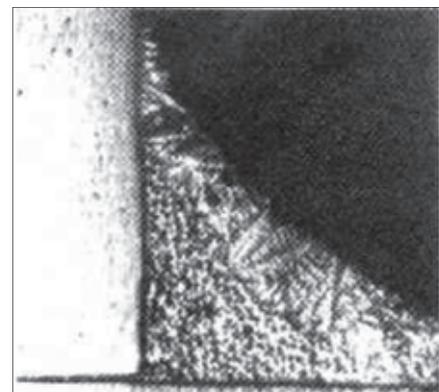


Рис. 4. Микроструктура тавра при избытке припоя (×10)

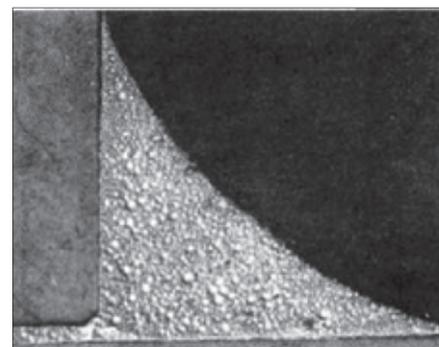


Рис. 5. Микроструктура паяного таврового соединения с галтелью из металлического порошка (×20)

Таблица 1. Значения коэффициента концентрации напряжений и радиусов галтели тавра

Толщина лопатки, мм	4	5	6	7	8	9	10
Коэффициент концентрации K для паяного тавра с $R = 0,5$ мм	2,55	2,74	2,91	3,07	3,23	3,36	3,5
Допустимый коэффициент концентрации $K_{\text{доп}}(K/2)$	1,27	1,37	1,46	1,53	1,62	1,68	1,75
Необходимый радиус тавра R , мм	4,4	4,6	4,7	5,1	5,2	5,4	5,5

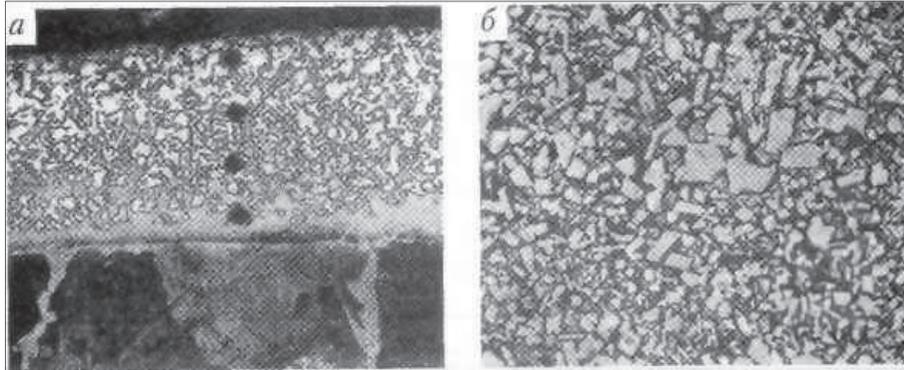


Рис. 6. Микроструктура плакирующего слоя, выполненного шликером системы Ni-Cr-Si-B с добавкой 60% смеси ВКБ: а) – сечение; б) – поверхность слоя (x200)

при этом перекрестки установлены с возможностью обеспечения теплообмена всей гофрированной сетки (рис. 7).

Разработаны и реализованы способы повышения надежности и долговечности шаровых кранов шахтных компрессорных установок [6]. Разработан способ нанесения композиционного коррозионностойкого износостойкого плакирование деталей шаровых кранов. Технологическая схема осуществления способа представлена на рис. 12. Для формирования плакирующего слоя может быть применена керамическая форма (рис. 13) или стальная с нанесением защитной пасты, предотвращающей взаимодействие расплава со сталью.

Разработан способ композиционной коррозионностойкой износостойкой наплавки на железоникелевой основе уплотнительных колец шаровых кранов [7]. Выполнена наплавка композиционным коррозионностойким износостойким сплавом на железоникелевой основе опытной партии уплотнительных колец шаровых кранов для эксплуатации в подземных ус-

ловиях шахт (рис. 8, 9). Промышленные испытания дали положительный результат.

Полученные в ходе исследований решения стали одними из основных в разработке конструкций винтовых компрессорных установок ВВ-50/8 У2 (Т2), производительностью 50 м³/мин и давлением нагнетания абсолютным до 8 кг см², для бурения скважин 300 и 311 мм в составе буровых станков СБШ – 250МНА – 32КП и СБШ – 270ИЗ в рудодобывающей промышленности. С 2001 г. по настоящее время было поставлено более 210 компрессорных установок на ГОКи Украины, России, Белоруссии, Казахстана, Узбекистана, Туркменистана, Монголии. Указанными компрессорными установками производительностью 25 и 32 м³/мин оснащены буровые станки производства ОАО "Криворожгормаш", ООО "Завод буровой техники ДСД" (г. Кривой Рог), ОАО "Рудгормаш" (г. Воронеж, Россия), ОАО "Бузулукский завод тяжелого машиностроения", ООО "ОМЗ ГОИТ" (г. Санкт-Петербург, Россия) (рис. 10).

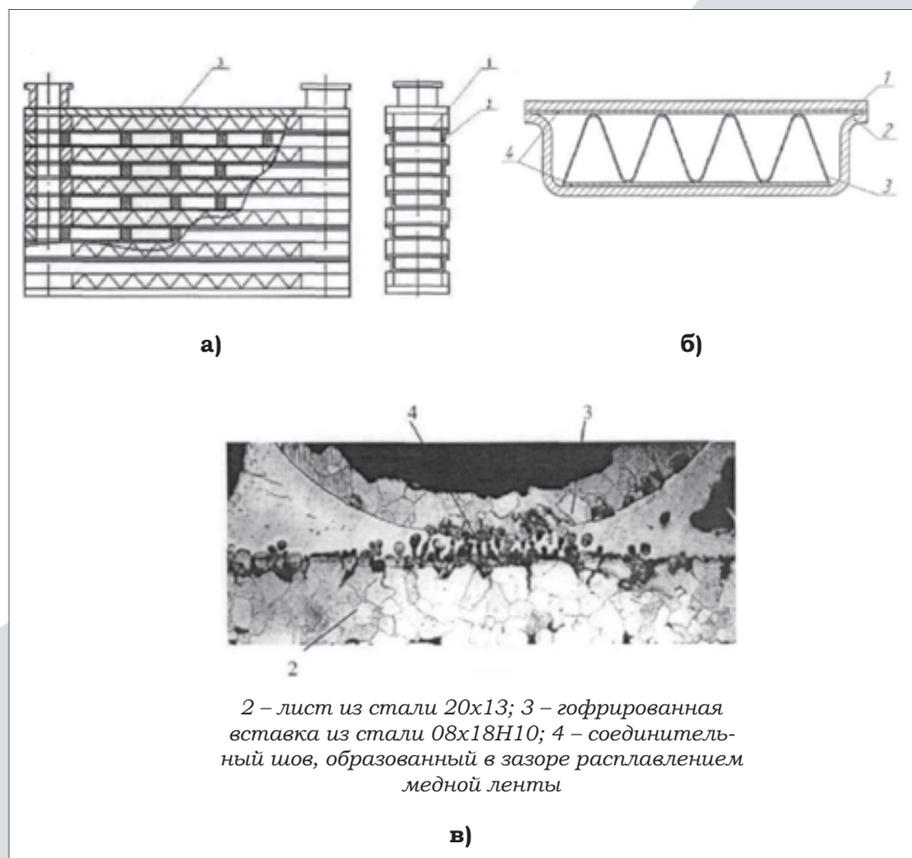


Рис. 7. Вид спереди и сбоку теплообменника пластинчато-ребристого (а), поперечный разрез канала теплообменника для перемещения теплоносителя (б), микроструктура паяно-сварного соединения деталей теплообменника медью (в)

Таблица 2. Механические свойства ленты из стали 20Х13 после нагрева и отпуска в вакууме

Толщина, мм	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
0,14	590	750	7
0,42	510	750	8,8
0,8	570	810	15,8



Рис. 8. Шаровый кран и его основные плакированные детали с проходным, сечением диаметром 100 мм



Рис. 9. Уплотнительные кольца шарового крана с отслоившимся покрытием, нанесенным плазменным напылением

Проведена оценка надежности узлов и блоков компрессорных машин УКВШ (рис. 11) и ВВ при их эксплуатации в условиях угольных шахт (табл. 3). Впервые установлены закономерности изменения установленного ресурса по элементам, вероятности безотказной работы элементов, вероятность

безотказной работы при установленном ресурсе системы, средней наработки на отказ по элементам и вероятности безотказной работы элементов – от 0,827 до 0,998 при применении методов и способов повышения надежности и долговечности компрессорных установок горных машин с применением высокотемпературной вакуумной пайки.

На предприятиях угольной промышленности Украины внедрены установки компрессорные шахтные УКВШ-7,5/7; УКВШ-10/7; УКВШ-15/7 в количестве 1148 установок производительностью 7,5–15 м³ мин. Установки эксплуатируются с 2001 года. Шахтные компрессорные установки типа УКВШ имеют более высокий уровень пожарной безопасности, чем применявшиеся ранее установки ШВ-5. За время



Рис. 10. Установка ВВ-40/8 УЗ

эксплуатации не было зафиксировано ни одного случая возгорания, что имело место при эксплуатации предыдущих компрессорных установок других типов.

Полученные решения также положены в основу конструкции разработанных передвижных азотных компрессорных станций с мембранным разделительным блоком АМВП и установки компрессорной газоутилизационная типа КГУУ.

В военизированных горноспасательных внедрены станции азотные мембранные винтовые передвижные АМВП-15/0,7 У1 в количестве 9 станций производительностью 15 м³/мин. Станции эксплуатируются с 2004 года. Станции АМВП-15/0,7 У1 применены для тушения пожаров на шахтах ОП "Шахта им. М.И. Калинина ГП "ДУЭК, ПАО "Шахта



Рис. 11. Шахтная винтовая компрессорная установка УКВШ-10/7 А У2

Таблица 3. Расчетные значения показателей надежности элементов компрессорной машины

	Наименование элемента	Средняя наработка на отказ, час	Плотность вероятности отказа	Вероятность безотказной работы	Интенсивность отказа	Установленная безотказная наработка
1	Контроллер	39 736	$1,78 \cdot 10^{-5}$	0,827	$2,03 \cdot 10^{-5}$	
2	Блок подачи воздуха	85 969	$9,2 \cdot 10^{-8}$	0,9975	$9,22 \cdot 10^{-8}$	9057
3	Воздухоохладитель предварительный	50 000	$5,27 \cdot 10^{-7}$	0,995	$8,99 \cdot 10^{-7}$	5288
4	Конденсатоотводчик	30 000	$2,2 \cdot 10^{-6}$	0,987	$2,23 \cdot 10^{-6}$	3160
5	Фильтр грубой очистки	100 000	$2,03 \cdot 10^{-8}$	0,998	$2,03 \cdot 10^{-8}$	10 536
6	Фильтр тонкой очистки	100 000	$2,03 \cdot 10^{-8}$	0,998	$2,03 \cdot 10^{-8}$	10 536
7	Электронагреватель	25 000	$4,04 \cdot 10^{-6}$	0,978	$4,13 \cdot 10^{-6}$	2634
8	Датчик давления	125 000	$8,7 \cdot 10^{-8}$	0,9975	$8,71 \cdot 10^{-8}$	13 162
9	Датчик температуры	20 000	$8,9 \cdot 10^{-7}$	0,96	$8,94 \cdot 10^{-7}$	2107

им. А.Ф. Засядько", шахта им. Ф.Э. Дзержинского ГП "Ровенькиантрацит", УК "Краснолиманская". Всего станциями произведено 12 625 325,00 м³ азота. Общая наработка составила 12536 часов. Фактический экономический эффект, полученный за 10 лет эксплуатации 9 станций АМВП-15/0,7 У1, составил около 2 млрд. грн.

На шахтах "Молодогвардейская", "Самсоновская-Западная" ПАО "Краснодонуголь" внедрены установки компрессорные газоутилизационные УКГ-5/8 в количестве 3-х установок производительностью 1551 м³/ч. Установки эксплуатируются с 2008 года. Всего при помощи установок утилизировано 21 627 079,00 м³ газа метана. Общая наработка составила 57160 часов. Фактический экономический эффект, полученный за

6 лет эксплуатации 3-х установок УКГ-5/8 составил 19 млн. грн.

Список литературы:

1. Алхазов А. Д. Воздушные поршневые компрессорные станции машиностроительных заводов / А. Д. Алхазов. – М. : Машигиз, 1961. – 110 с.
2. Блейхер В. Я. Компрессорные станции / В. Я. Блейхер, В. Н. Елисеев. – М.: Машигиз, 1958. – 324 с.
3. Чернов В. Ю. Особенности высокотемпературной пайки соевых уплотнений / Чернов В.Ю., Радзиевский В.Н. // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1977. – № 12. – С. 19 – 21.
4. Радзиевский В.Н. Высокотемпературная вакуумная пайка в компрессоростроении / В.Н.Радзиевский, Г.Г.Ткаченко. – К.: Екотехнологія, 2009. – 400 с.
5. Патент Украины. № 27878. F28D 9/00. Теплообмінник

пластинчато-ребристый / Радзиевський В.М., Лавренко О.М., Жарков П.Є., Ткаченко Г.Г., Котов О.М. / u200613868. Заявл. 26.12.2006. Опубл. 26.11.2007, Бюл. № 19.

6. Радзиевский В.Н. Композиционное коррозионностойкое износостойкое плакирование деталей шаровых кранов / В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко, П.Е. Жарков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2006. – № 1. – С. 9 – 15.

7. Ткаченко Г.Г. Композиционная коррозионностойкая износостойкая наплавка на железоникелевой основе уплотнительных колец шаровых кранов / Ткаченко Г.Г., Радзиевский В.Н., Жарков П.Е. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 1. – С. 86 – 89.