

Національна академія наук України  
Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова

ТКАЧЕНКО Геннадій Григорович



УДК [622.002.5:621.51/.54]:621.791 (043.3)

РОЗРОБКА МЕТОДІВ І СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА  
ДОВГОВІЧНОСТІ КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВОК ГІРНИЧИХ МАШИН  
ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ВАКУУМНОЇ ПАЙКИ

Read-only

05.05.06 - «Гірничі машини»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Дніпропетровськ - 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в ПАТ «Науково-виробниче акціонерне товариство «ВНДІкомпресормаш» Концерну «Укрросметал» (м. Суми).

**Науковий керівник** - доктор технічних наук, доцент  
КИРИК Григорій Васильович,  
Концерн «Укрросметал» (м. Суми),  
президент концерну.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
ДИРДА Віталій Іларіонович,  
Інститут геотехнічної механіки  
ім. М.С. Полякова НАН України (м. Дніпропетровськ),  
завідувач відділом механіки еластомірних  
конструкцій гірничих машин;

кандидат технічних наук, доцент  
ОКСЕНЬ Юрій Іванович,  
Державний ВНЗ «Національний гірничий  
університет» МОН України (м. Дніпропетровськ),  
доцент кафедри гірничої механіки.

Read-only

Захист відбудеться “ 16 ” жовтня 2015 р. у 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.188.01 при Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, вул. Сімферопольська, 2а, факс (0562) 462426.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України за адресою: 49005, м. Дніпропетровськ, вул. Сімферопольська, 2а.

Автореферат розісланий “ 15 ” вересня 2015 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
доктор технічних наук



В.Г. Шевченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Стиснене повітря є одним з основних видів використовуваної енергії в гірничорудній галузі – у шахтах і рудниках для привода добувних, бурильних, навантажувальних машин, у прохідницьких та інших пристроях. На більшості підприємств гірничорудної галузі України використовується пневмоенергія, вироблена поршневыми, відцентровими і гвинтовими компресорами. Продуктивність окремих компресорів коливається від 5 до 500 м<sup>3</sup>/хв., а споживана потужність – від 40 до 2000 кВт. Зараз кількість компресорів становить близько 2000 шт. із загальною встановленою потужністю близько 700 тис. кВт. При цьому на окремих шахтах довжина розгалуженої пневмомережі досягає 35–50 км. Установлені на поверхні шахт компресорні станції через велику довжину пневмомереж не забезпечують підземні виробки стисненим повітрям необхідної якості. У цей час більше 80 % парку стаціонарних компресорних машин повністю виробили свій ресурс і перебувають в експлуатації більше 25–30 років.

Актуальним є підвищення надійності та ефективності роботи компресорних установок в умовах вугільних шахт. Виникає потреба створення компресорних машин, у яких істотно поліпшується надійність роботи в складних умовах експлуатації.

У сучасних компресорних установках застосовують ряд складних вузлів, у яких з'єднати деталі можна тільки за допомогою високотемпературної пайки. При пайці з'єднання формується без розплавлення металу деталей розплавленим припоєм, що втримується в зазорах капілярними силами. При відповідному виборі складу припою високотемпературна пайка дозволяє створити міцне з'єднання, що надійно працює при вібраційних навантаженнях у компресорних установках. Крім забезпечення міцності, пайка дозволяє з'єднати одночасно безліч деталей у недоступних або важкодоступних місцях при одній технологічній операції: нагріванні зібраного вузла в камері печі. Як правило, зварювання для створення таких вузлів незастосовне.

Існує необхідність у проведенні досліджень надійності деталей та вузлів компресорних машин, розробці методів підвищення надійності паяних робочих коліс і теплообмінників шахтних компресорних машин при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки, необхідно встановити закономірності зміни довговічності деталей та вузлів шахтних компресорів при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки. Це дозволить розробити та реалізувати способи і технології підвищення надійності деталей і вузлів шахтних компресорів.

Тому, установлення закономірностей зміни довговічності деталей та вузлів шахтних компресорів при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки і розробка на цій основі методів і способів підвищення надійності деталей та вузлів шахтних компресорів є **актуальним науковим завданням**, що має важливе значення для добувної галузі країни.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Державної програми розвитку компресорного і мембранного машинобудування на 2005–2014 рр., затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 5 червня 2004 р. № 833, і концепцією Державної економіч-

ної програми видобутку і використання газу метану вугільних родовищ, як альтернативного енергоресурсу (схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 23 грудня 2009 р. № 1684-р), а також у рамках договору від 01.01.2008 р. № 0705081700 між ПАТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш» Концерну «Укрросметал» та Мінвуглепромом України «Розробити і освоїти серійне виробництво шахтних пересувних компресорних установок УКГШТ-5/7, спеціально призначених для застосування в тупикових виробках шахт», по яких автор був виконавцем.

**Мета і завдання дослідження.**

**Ідея роботи** полягає у використанні встановлених закономірностей підвищення надійності і довговічності деталей та вузлів шахтних компресорів при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки для розробки способів підвищення їхньої надійності, довговічності і енергоефективності при видобутку руди, вугілля та метану.

**Мета роботи** – розробити методи і способи підвищення надійності та довговічності компресорних установок гірничих машин із застосуванням високотемпературної вакуумної пайки.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані наступні **завдання**:

1. Розробити методи підвищення надійності паяних робочих коліс і теплообмінників шахтних компресорних машин при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки.

2. Установити закономірності зміни довговічності деталей та вузлів шахтних компресорів при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки.

3. Розробити та реалізувати способи і технології підвищення надійності деталей та вузлів шахтних компресорів.

4. Оцінити надійність вузлів та блоків шахтних компресорних машин при підземному видобутку корисних копалин.

*Об'єкт дослідження* – процеси підвищення надійності компресорних установок гірничих машин при підземному видобутку корисних копалин.

*Предмет дослідження* – закономірності підвищення надійності і довговічності деталей та вузлів шахтних компресорів при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки.

*Методи дослідження.* У роботі використаний комплексний метод досліджень, що включає: аналіз і узагальнення відомих положень по розглянутій проблемі; проведення лабораторних досліджень на стендах, аналітичні розрахунки, металографічний і рентгеноструктурний аналіз паяних з'єднань і основного металу за допомогою оптичних мікроскопів МБС-9, «Неофот-21» і растрового електронного мікроскопа РЕММА-200; механічні випробування зразків паяних з'єднань на розрив на випробувальній машині ZD-10/90 і ІМ-4Р, випробування на ударну в'язкість на КМ-30, вимір мікротвердості на мікротвердомірі ПМТ-3, вимір твердості на приладі НРО-3000, втомні випробування на машині УКІ-10М; випробування моделей і макетів, що імітують виріб; натурні випробування виробів в умовах експлуатації.

**Наукові положення, що виносяться на захист.**

1. Надійність роботи паяного колеса шахтного відцентрового компресора визначається теоретичним коефіцієнтом напруг, що дорівнює відношенню величини внутрішнього напруження в якій-небудь точці при наявності концентратора до на-

пруги в тій же точці при відсутності концентратора напруги. Для досягнення мінімального значення концентратора напруги необхідне збільшення плавності переходу - радіуса жолобника, оптимальне значення якого дорівнює подвоєній величині товщини стінки тавра; при цьому при збільшенні товщина лопатки колеса з 4 до 10 мм коефіцієнт концентрації лінійно зростає з 2,55 до 3,5, а необхідний радіус тавра змінюється з 4,4 до 5,5 мм.

2. У робочих (гарячих) каналах ПРТ із металевої стрічки, у яких переміщається теплоносій з низькою теплопровідністю, насадка із гладкою поверхнею знижує ефективність теплообміну, а розсічення ламінарного контактного шару в робочих (гарячих) каналах ПРТ дозволяє активно інтенсифікувати теплообмін, створюючи турбулентний потік в'язкої з малою теплопровідністю рідини, що інтенсифікує теплообмін в 2-2,5 рази в порівнянні з теплообміном при ламінарному потоці; при цьому при збільшенні товщини стрічки тонкостінних сталевих теплообмінників шахтних компресорних установок зі сталі 20Х13 при високотемпературній пайці після нагрівання і відпуску у вакуумі з 0,14 до 0,8 мм межа міцності, що визначає довговічність теплообмінника, зростає у квадратичній залежності від 750 до 810 МПа.

3. Надійність роботи шахтних компресорних систем прямопропорційна надійності роботи електричної мережі, електропривода, компресорної машини, пневматичної мережі елементів компресорної машини, при цьому при застосуванні методів і способів підвищення надійності і довговічності компресорних установок гірничих машин із застосуванням високотемпературної вакуумної пайки встановлений ресурс по елементах лінійно зростає від 2107 до 13 162 годин, імовірність безвідмовної роботи елементів при цьому коливається від 0,975 до 0,9995, імовірність безвідмовної роботи при встановленому ресурсі системи в цілому дорівнює 0,9434, а середній наробіток на відмову по елементах зростає від 20 000 до 125 000 годин, а ймовірність безвідмовної роботи елементів - від 0,827 до 0,998.

#### **Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше встановлено закономірності зміни характеристики концентрації напруг таврового паяного з'єднання лопатки з диском робочого колеса відцентрового компресора - коефіцієнта напруг від величини внутрішнього напруження, радіуса жолобника і товщини лопатки.

2. Вперше встановлено закономірність зміни довговічності, що характеризується межею міцності, сталі тонкостінного теплообмінника шахтних компресорних установок при високотемпературній пайці після нагрівання і відпуску у вакуумі від товщини стрічки теплообмінника.

3. Вперше встановлено закономірності зміни встановленого ресурсу по елементах, імовірності безвідмовної роботи елементів, імовірність безвідмовної роботи при встановленому ресурсі системи, середнього наробітку на відмову по елементах і ймовірності безвідмовної роботи елементів при застосуванні методів і способів підвищення надійності та довговічності компресорних установок гірничих машин із застосуванням високотемпературної вакуумної пайки.

**Наукове значення роботи** полягає у встановленні закономірностей зміни коефіцієнта напруг від величини внутрішнього напруження, радіуса жолобника і товщини лопатки, закономірності зміни межі міцності сталі після нагрівання і відпуску у вакуумі від товщини стрічки тонкостінних сталевих теплообмінників шахтних

компресорних установок і закономірності зміни показників надійності шахтних компресорних систем при застосуванні методів і способів підвищення надійності та довговічності компресорних установок гірничих машин із застосуванням високотемпературної вакуумної пайки.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Створено композиційний зносостійкий і корозієстійкий сплав для плакування сталевих деталей шахтних компресорів, у якому введення нових компонентів і підбор співвідношення компонентів дозволяє плакувати сталеві деталі шаром будь-якої товщини з комірчастою структурою, що не має усадочних і ліквацийних дефектів.

2. Удосконалено спосіб наплавлення металевої поверхні, у якому деталь, що наплавляється, і форму збирають із зазором, з'єднують останній з камерою-живильником, причому в зазор поміщають порошковий матеріал, а в камеру-живильник - метал-зв'язування, потім зібраний вузол нагрівають у вакуумі або захисній атмосфері до розплавлення металу-зв'язування, витримують, прохолоджують і демонтують, звільняючи деталь.

3. Розроблено спосіб формування паяного товстостінного сталевого з'єднання, за яким деталі збирають, закріплюють взаємне положення зварюванням, що відрізняється тим, що для формування жолобника паяного таврового з'єднання застосовують порошки із залізовуглецевих сплавів із вмістом газу не більше  $0,05 \text{ см}^3/\text{м}$ .

4. Розроблено спосіб формування товстостінного таврового з'єднання під час якого з'єднані деталі тавра збирають, формують кутові шви заданого розміру і форми з нерозплавного металевого порошку і здійснюють високотемпературну пайку, під час якої нагрівають зібрані деталі у вакуумі разом з високотемпературним припоєм.

5. Розроблено теплообмінник, що містить секції з каналами для переміщення охолоджуваного середовища і розташованими в них турбулізаторами, між секціями розміщені гофровані металеві стрічки, вхідний та вихідний колектори, зв'язані відповідно із вхідним та вихідним патрубками, який відрізняється тим, що турбулізатори виконано у вигляді вставок з гофровані сітки і металевої стрічки, установлених по напрямку руху охолоджуваного середовища.

6. Розроблено теплообмінник пластинчато-ребристий, що містить секції з каналами для переміщення охолоджуваного середовища з розміщеними в них гофрованими стрічками з металевої сітки, який відрізняється тим, що кожне перехрестя сітки, плетеної з металевого дроту, має покриття і має паяне з'єднання.

7. Удосконалено технологію виготовлення закритих робочих коліс відцентрових компресорних машин із застосуванням автовакуумного нагрівання. Зниження температури пайки до  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  при нагріванні у звичайній нагрівальній печі дозволяє за рахунок регулювання швидкості охолодження колеса безпосередньо після закінчення ізотермічної витримки при пайці зберегти або змінити в потрібному сполученні механічні властивості основного металу.

8. Розроблено спосіб нанесення композиційного корозієстійкого зносостійкого плакування деталей кульових кранів із застосуванням високотемпературної пайки, що дозволяє сформувати на поверхні сталеві деталі шар, що плакує, з необхідними властивостями необхідної товщини при просоченні порошкового наповнювача роз-



плавленим припоєм у широкому зазорі між деталлю і технологічною формою.

9. Розроблено спосіб композиційного корозієстійкого зносостійкого наплавлення на залізо-нікелевій основі ущільнювальних кілець кульових кранів, завдяки якому шар, що плакує, у наплавленні з композиційного залізо-нікелевого сплаву має високу технологічність при механічній обробці.

*Реалізація результатів роботи.*

Розроблені методи і способи реалізовані при:

- розробці установок компресорних шахтних УКГШ та ВВ. На підприємствах вугільної промисловості України впроваджені установки компресорні шахтні УКГШ-7,5/7; УКГШ-10/7; УКГШ-15/7 у кількості 1148 установок продуктивністю 7,5–15 м<sup>3</sup>/хв. Установки експлуатуються з 2001 року. Шахтні компресорні установки типу УКГШ мають більше високий рівень пожежної безпеки, чим установки, що застосовувалися раніше, ШВ-5. За час експлуатації не було зафіксовано жодного випадку загоряння, що мало місце при експлуатації попередніх компресорних установок інших типів (довідка про впровадження від 05.05.2014 р.);

- розробці станцій азотних мембранних гвинтових пересувних АМГП. У воєнізованих гірничорятувальних загонах (1 ВГРЗ м. Горлівка, 3 ВГРЗ м. Макіївка, 4 ВГРЗ м. Луганськ, 5 ВГРЗ м. Красний Луч, 6 ВГРЗ м. Торез, 7 ВГРЗ м. Краснодон, 8 ВГРЗ м. Павлоград, Львівсько-Волинським ВГРЗ м. Червоноград, ОВГРЗ м. Донецьк) впроваджені станції азотні мембранні гвинтові пересувні АМГП-15/0,7 У1 у кількості 9 станцій продуктивністю 15 м<sup>3</sup>/хв. Станції експлуатуються з 2004 року. Станції АМГП-15/0,7 У1 застосовані для гасіння пожеж на шахтах ВП «Шахта ім. М.І. Калініна» ДП «ДУЕК», ПАТ «Шахта ім. О.Ф. Засядька», «Шахта ім. Ф.Е. Дзержинського» ДП «Ровенькиантрацит», ВК «Краснолиманська». Усього станціями вироблено 12 625 325,00 м<sup>3</sup> азоту. Загальний наробіток склав 12536 годин. Фактичний економічний ефект, отриманий за 10 років експлуатації 9 станцій АМГП-15/0,7 У1, тільки за рахунок збереження устаткування і ліквідації втрат у видобутку вугілля склав близько 2 млрд. грн., при цьому було збережено більше 1000 робочих місць (акт впровадження, розрахунок економічної ефективності від 17.12.2013 р.);

- розробці установок компресорних газоутилізаційних УКГ. На шахтах «Молодогвардійська», «Самсонівська-Західна» ПАТ «Краснодонвугілля» впроваджені установки компресорні газоутилізаційні УКГ-5/8 у кількості 3-х установок продуктивністю 1551 м<sup>3</sup>/годину. Установки експлуатуються з 2008 року. Усього за допомогою установок утилізовано 21 627 079,00 м<sup>3</sup> газу метану. Загальний наробіток склав 57160 годин. Фактичний економічний ефект, отриманий за 6 років експлуатації 3-х установок УКГ-5/8, за рахунок зниження емісії метану в атмосферу, реалізації положень Кіотського протоколу склав 19 млн. грн. (довідка про впровадження, розрахунок економічної ефективності від 01.05.2014 р.).

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій** підтверджується використанням фундаментальних положень динаміки і міцності, достатнім обсягом лабораторних та промислових досліджень способів підвищення надійності деталей та вузлів шахтних компресорних машин шляхом застосування пайки із широким паяльним зазором, застосуванням апробованих методів статистичної обробки даних і математичного моделювання, статистичною оцінкою вірогідності отриманих залежностей; використанням стандартних приладів, типової

апаратури і методів вимірювань; позитивними результатами впровадження у виробництво розробленого устаткування, способів та засобів.

**Особистий внесок здобувача.** Автор брав безпосередню участь у виборі методів досліджень, обґрунтуванні параметрів, проведенні експериментів, натурних вимірів, розробці, випробуванні та впровадженні шахтного компресорного устаткування. Мета і завдання дослідження, ідея роботи, основні наукові положення, висновки і рекомендації сформульовані автором самостійно. Авторіві належить: розробка методів підвищення надійності паяних робочих коліс і теплообмінників шахтних компресорних машин при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки; установлення закономірностей зміни довговічності деталей і вузлів шахтних компресорів при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки; оцінка надійності вузлів і блоків шахтних компресорних машин при підземному видобутку корисних копалин. Способи і технології підвищення надійності деталей та вузлів шахтних компресорів розроблені і реалізовані при безпосередній участі автора. Текст дисертації автором викладений особисто.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи були представлені та одержали позитивну оцінку на міжнародних конференціях і семінарах: Міжнародному симпозиумі «Споживачі-виробники компресорів і компресорного устаткування - 2000» (Російська Федерація, С.-Петербург, 2000 р.), Міжнародних науково-технічних конференціях «Пайка - 2000», «Пайка - 2005» (Російська Федерація, Тольяті, 2000 р., 2005 р.); 4-м Міжнародному симпозиумі «Вакуумні технології і устаткування» (Харків, 2001 р.); 10-й Міжнародної науково-технічної конференції «Герметичність, вібронадійність та екологічна безпека насосного і компресорного устаткування» (Суми, 2002 р.); XII Міжнародній науково-технічній конференції по компресоробудуванню «Компресорна техніка і пневматика в ХХ столітті» (Суми, 2004 р.).

**Публікації.** Основний зміст роботи представлений в 45 наукових працях, у тому числі: 1 монографія, 29 статей у спеціалізованих наукових виданнях (з них 3 - у закордонних виданнях), 8 патентів на винахід, 7 - матеріали наукових конференцій.

**Обсяг і структура роботи.** Дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновків і 2 додатків на 6 сторінках. Робота викладена на 199 сторінках, містить 126 малюнків, 35 таблиць, а також список використаних джерел з 236 найменувань на 23 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **першому розділі** виконано аналіз стану питання розробки методів і способів підвищення надійності та довговічності компресорних установок гірничих машин.

Проведено огляд робіт в області розробки, використання і підвищення надійності шахтного компресорного устаткування. Провідні позиції в області вдосконалення методів розрахунку і способів підвищення надійності шахтного компресорного устаткування в Україні та за кордоном займають: НДІГМ ім. М.М. Федорова Міністерства енергетики України, ДонНТУ МОН України, КНУ МОН України, НГУ МОН України, ТОВ «МІКЕМ» (Україна), УрдГУ, КуздТУ (Росія); в області конструю-



вання, розробки і використання компресорних машин широко відомі ПАТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш» (Україна), СП ТОВ «Орелкомпресормаш», ВАТ «Компресормаш» (Росія), ІЧПТУП «Гомелькомпресормаш» (Білорусь) та ін. Виникає необхідність у проведенні досліджень зміни довговічності деталей та вузлів шахтних компресорів і розробки на цій основі методів та способів підвищення надійності деталей та вузлів шахтних компресорів при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки.

Аналіз проблеми високотемпературної пайки вузлів і деталей шахтних компресорів показав, що в сучасних компресорних установках застосовують ряд складних вузлів, у яких з'єднати деталі можна тільки за допомогою високотемпературної пайки. При відповідному виборі складу припою високотемпературна пайка дозволяє створити міцне з'єднання, що надійно працює при вібраційних навантаженнях у компресорних установках. Крім забезпечення міцності, пайка дозволяє з'єднати одночасно безліч деталей у недоступних або важкодоступних місцях при одній технологічній операції. Як правило, зварювання для створення таких вузлів незастосовні.

Проаналізовано проблеми формування композиційних з'єднань при високотемпературній пайці. Аналіз застосування автовакуумного нагрівання для високотемпературної пайки показав, що автовакуумна пайка на відміну від пайки у вакуумних печах дозволяє використовувати в ряді випадків різноманітні хімічні сполуки, здатні активувати поверхню металу, що паяється, поліпшити розтікання і змочування припоєм поверхні, затікання припою в зазор.

Аналіз застосування широкого паяльного зазору при створенні композиційних з'єднань різнорідних металів і нанесенні покриттів показав, що необхідно дослідження плакування поверхні створенням композиційного шару за допомогою високотемпературної пайки. Огляд паяних конструкцій тонкостінних теплообмінних апаратів указав на необхідність вирішення ряду завдань, таких як вибір складу припою, наповнювача і режиму пайки.

Тому, установлення закономірностей зміни довговічності деталей та вузлів шахтних компресорів при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки і розробка на цій основі методів і способів підвищення надійності деталей та вузлів шахтних компресорів є актуальним науковим завданням, що має важливе значення для добувної галузі країни.

Сформульовано мету, завдання і обрані методи дослідження.

У **другому розділі** розроблено методи підвищення надійності деталей і вузлів шахтних компресорних машин шляхом застосування пайки із широким паяльним зазором.

Проведено дослідження технології і способів пайки із широким паяльним зазором. Наповнювач і припій вибирають відповідно до марки сталі, що паяється, і необхідних властивостей з'єднання. Розрахунок кількості наповнювача ведуть з огляду на об'єм зазору  $V_z$ ,  $\text{см}^3$ , коефіцієнт заповнення  $K_z$  і щільність наповнювача  $\gamma_n$ ,  $\text{г/см}^3$

$$Q_n = V_z K_z \gamma_n.$$

Тому що розрахунковий об'єм  $V_z$  може відрізнятись від фактичного, доцільно при заповненні зазору наповнювачем визначати його фактичну масу.

Кількість припою  $Q_n$  визначається сумою

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

де  $Q_1$  - маса припою в паяльному зазорі;  $Q_2$  - маса технологічної добавки припою в живильнику, що перешкоджає переходу в зазор флюсу і газу;  $Q_3$  - маса припою в з'єднувальних каналах;  $Q_4$  - маса припою в порожнині сорбційного насоса.

$Q_2, Q_3, Q_4$  визначають, виходячи з конкретних розмірів елементів вузла, що паяється.  $Q_1$  визначається по формулі

$$Q_1 = Q_n \gamma_n (1 - K_3) / \rho_n,$$

де  $\gamma_n$  - щільність припою, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_n$  - насипна маса наповнювача, г/см<sup>3</sup>.

Конструкцію живильника вибирають у кожному конкретному випадку. Живильник доцільно виконувати циліндричним з мінімально можливим діаметром камери, тому що в цьому випадку технологічна добавка припою, що залишається в живильнику, мінімальна. Розрахунок товщини стінки живильника виконують по формулі

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

де  $s$  - товщина стінки, мм;  $d$  - внутрішній діаметр живильника, мм;  $P$  - тиск у живильнику, МПа;  $\sigma$  - допустиме напруження, МПа.

Плакування краще здійснювати при нагріванні у вакуумі. При цьому підвищується щільність і якість шару, що плакує.

Розроблено методи підвищення надійності та довговічності паяних робочих коліс відцентрових шахтних компресорних машин (ВКМ). Удосконалено конструкції й технології виготовлення коліс.

Основним навантаженням, що викликає в деталях статичні напруги, є відцентрові сили власної маси. В основному диску із фрезерованими лопатками в найбільш напруженому перетині (сполучення полотна диска зі ступицею) напруги зменшуються в 2-2,5 рази в порівнянні з напругою в диску без лопаток. Характер розподілу напруг у покриваючих дисках коліс із фрезерованими в основному диску або з'єднаних заклепках штампованими лопатками практично не відрізняється (рис. 1).

Надійності роботи потужних ВКМ приділяють особливу увагу, тому що навіть короткочасна зупинка машини в умовах безперервного шахтного виробництва може завдати шкоди, значно перевищуючу вартість компресора. У дослідженні впливу основних факторів пайки: температури, тривалості витримки при пайці, розміру паяльного зазору, розрідження в камері вакуумної печі - установили, що в найбільшій мірі змінюється ударна в'язкість з'єднання. Необхідною для визначення придатності паяного з'єднання робочого колеса, що працює в умовах вібраційного навантаження, що характерно для підземних умов шахт, є втомна міцність.

Поряд з випробуванням зразків на заключному етапі розробки нової конструкції і технології виготовлення робочого колеса проводять статичні та динамічні випробування дослідних зразків коліс. На рис. 2 показана схема випробування робочого колеса при осьовому статичному або динамічному навантаженні.

Проведено дослідження паяних таврових з'єднань з великим жолобником. Наявність у конструкції різких переходів, пазів, отворів приводить до місцевого підвищення внутрішніх напружень. Однією з основних характеристик концентрації на-

пруг є так званий теоретичний коефіцієнт напруг  $K$ , що приймають як відношення величини внутрішнього напруження в якій-небудь точці при наявності концентратора до напруги в тій же точці при відсутності концентратора напруги. Значення коефіцієнта істотно залежить як від характеру зовнішнього навантаження, так і від фізико-хімічних властивостей матеріалу деталі, а також від геометричних характеристик деталі і концентраторів напруг, що послабляють цю деталь. Таврове з'єднання характеризує радіус переходу і від його розміру відповідно залежить величина концентратора напруг. Відповідно, для досягнення мінімального значення концентратора напруги необхідне збільшення плавності переходу, тобто збільшення радіуса жолобника. Однак ця вимога суперечить умові зменшення металоємності конструкції. Отже, необхідний пошук оптимального рішення. Розрахунок радіуса жолобника можна виконати по залежності

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

де  $K$  - коефіцієнт концентрації напруг;  $S$  - товщина стінки тавра, мм;  $k$  - висота радіусного сполучення, мм;  $R$  - радіус жолобника, мм.

Перетворюючи залежність і вважаючи, що  $K = 1$ ,  $k = R$ , одержимо

$$R = 2S.$$

Конструкція, у якій витримане співвідношення  $R = 2S$ , дозволяє одержувати рівномірне таврове з'єднання в будь-якій точці.



1 - паяного робочого колеса із фрезерованими лопатками; 2 - клепаного колеса зі штампованими лопатками

Рисунок 1 - Криві радіальних напруг в основному диску при частоті обертання 14 000 об/хв.

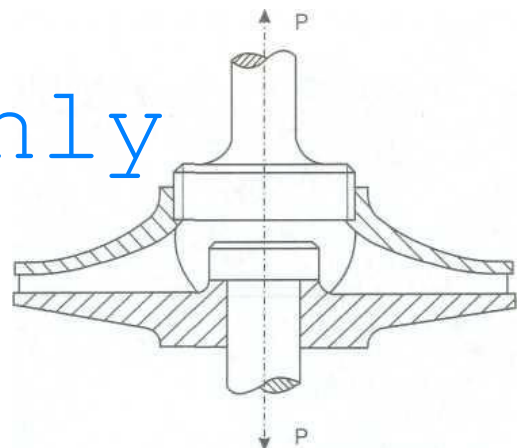


Рисунок 2 - Схема випробування паяного колеса при осьовому статичному або циклічному навантаженні

Паяні робочі колеса, процес пайки яких пройшов тривалу промислову перевірку, експлуатують у компресорах при радіусі жолобника паяного з'єднання, що не перевищує 0,5 мм. У табл. 1 наведені результати розрахунку розміру радіуса для лопаток товщиною 4-10 мм, що включає весь можливий діапазон розмірів паяних коліс. Наведені дані свідчать про те, що для підвищення конструкційної втомної міцності паяних коліс шахтних компресорів до рівня основного металу необхідно збільшити розмір радіуса жолобника паяного шва до 5 мм. У результаті досліджень встановлено закономірності зміни надійності роботи паяного колеса шахтного відцентрового компресора, що характеризується коефіцієнтом напруг таврового паяного з'єднання лопатки з диском робочого колеса відцентрового компресора, від вели-

чини внутрішнього напруження, радіуса жолобника і товщини лопатки (рис. 3).

Одержати в паяному з'єднанні такий великий жолобник можна, попередньо сформувавши його з металевого порошку. Для цього в куті з'єднання з однієї або обох сторін тавра при складанні формують із пасти жолобник з необхідними за умовами рівномірності формою і розмірами (рис. 4).

Таблиця 1 - Значення коефіцієнта концентрації напруг і радіусів жолобника тавра

Товщина лопатки, мм	4	5	6	7	8	9	10
Коефіцієнт концентрації $K$ для паяного тавра з $R=0,5$ мм	2,55	2,74	2,91	3,07	3,23	3,36	3,5
Припустимий коефіцієнт концентрації $K_{прип}$ ( $K/2$ )	1,27	1,37	1,46	1,53	1,62	1,68	1,75
Необхідний радіус тавра $R$ , мм	4,4	4,6	4,7	5,1	5,2	5,4	5,5

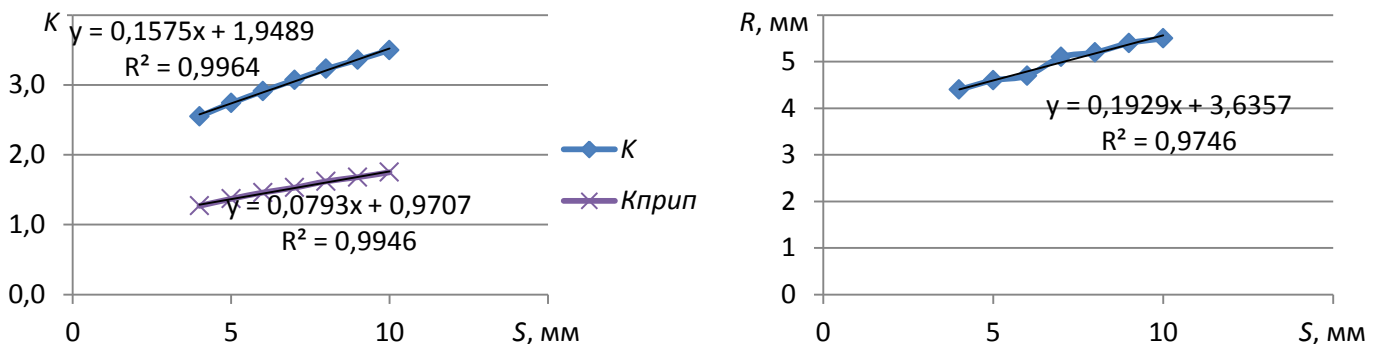


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта концентрації напруг, припустимого коефіцієнта концентрації (а) і необхідного радіуса тавра (б), від товщини лопатки

При формуванні жолобника з порошку наповнювача його кількість можна визначити по формулі

$$Q_n = SLq,$$

де  $Q_n$  - маса наповнювача, г;  $S$  - перетин кутового шва,  $\text{см}^2$ ;  $L$  - довжина кутового шва, см;  $q$  - насипна маса наповнювача,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

При довжині шва  $L=1$  см і трикутній формі жолобника з катетом  $K$ , см необхідно наповнювача, г

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

Для просочення кутового шва довжиною 1 см необхідно припою, г

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

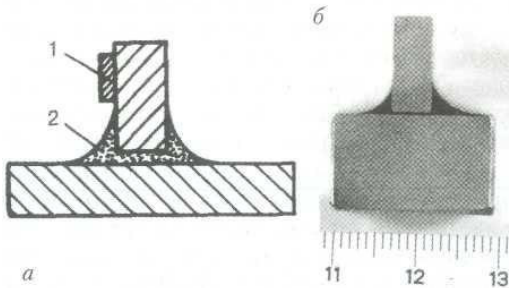
Такої кількості припою досить для формування щільного металу шва і заповнення капілярних зазорів між стінкою і полицею тавра. При збільшенні кількості припою його надлишок кристалізується на поверхні жолобника, створюючи крупнодендритну шорсткувату поверхню (рис. 5). Точне дозування припою забезпечує якісне формування шва із гладкою поверхнею та ідеальним сполученням поверхні шва і металу, що паяється (рис. 6).

Рівномірність таврового паяного з основним металом у сталях з невисокою межею міцності досягається при розмірах жолобника менш 5 мм, тому що метал жолобника, виконаний припоєм ВПр2 з наповнювачем ПРН24, має механічні властивості, рівні властивостям низьколегованих сталей:  $\sigma_B=600\text{МПа}$ ,  $\sigma_T=290\text{МПа}$ ,  $\delta$



$\sigma = 24 \%$ ,  $\psi = 53 \%$ ,  $KCU = 85 \text{ Дж/см}^2$ , твердість 152 НВ.

Розроблено технологію автовакуумної пайки закритих робочих коліс (рис. 7). Істотним є те, що для здійснення автовакуумної пайки робочого колеса не потрібні дорогі матеріали і спеціальне устаткування. Вона може бути реалізована при незначних капітальних витратах у серійному і одиничному виробництві при виготовленні, ремонті та модернізації відцентрових компресорів.



1 - паяний шов; 2 - припій  
Рисунок 4 - Схема пайки (а) і макрошліф (б) таврового з'єднання з попереднім формуванням жолобників

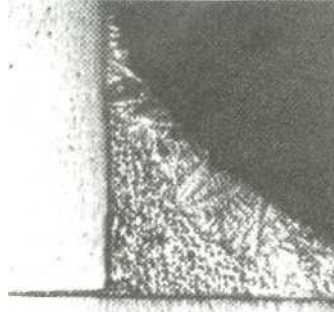


Рисунок 5 - Мікροструктура тавра при надлишку припою (x10)

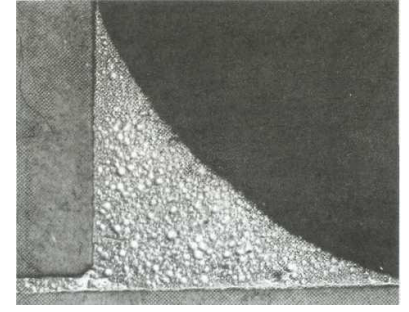


Рисунок 6 - Мікροструктура паяного таврового з'єднання з жолобником з металевим порошком (x20)

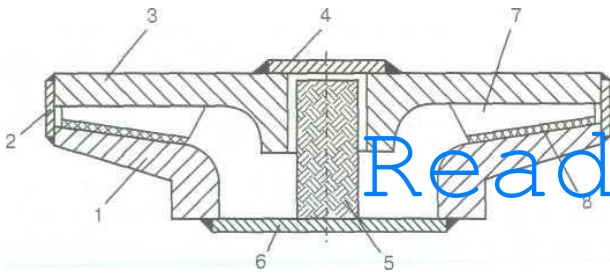


Рисунок 7 - Схема автовакуумної пайки робочого колеса

1 - покриваючий диск; 2 - бандаж; 3 - основний диск; 4-6 - технологічні заглушки; 5 - патрон із сорбентом і активатором; 7 - лопатка; 8 - паяний шов

Розроблено методи підвищення надійності та довговічності теплообмінників. Досліджено і удосконалено конструкції та технології пайки пластинчато-ребристих теплообмінників (ПРТ).

При переміщенні теплоносіїв у каналах насадки, виготовленої з металеві стрічки прокаткою роликками або штампуванням, формуються стійкі ламінарні потоки. Теплообмін ділянок, що прилягають до поверхні насадки, з ядром потоку відбувається за рахунок теплопровідності теплоносія. У робочих (гарячих) каналах ПРТ, у яких переміщається теплоносій з низькою теплопровідністю, насадка із гладкою поверхнею знижує ефективність теплообміну. Розсічення ламінарного контактного шару дозволяє активно інтенсифікувати теплообмін, створюючи турбулентний потік. У розсіченій стрічці можна сформувати жалюзі або зрушити стінку гофри для розриву контактного шару і утворення завихрення. Турбулентний потік в'язкої з малою теплопровідністю рідини інтенсифікує теплообмін в 2-2,5 рази в порівнянні з теплообміном при ламінарному потоці. Розсічення зі зрушенням стінок гофри істотно інтенсифікує теплообмін і в газовому потоці (рис. 8).

За допомогою високотемпературної пайки в місці зіткнення насадки із пластинною формується якісне паяне з'єднання з хорошим жолобником (рис. 9). Руйну-



вання каналів відбувається через розрив дроту насадки, а не паяного з'єднання, тобто міцність каналу визначається міцністю насадки, а не міцністю паяного з'єднання насадки із пластиною.

Алюмінієві сплави мають певні переваги при виготовленні ПРТ - це висока теплопровідність, невелика питома вага і корозійна стійкість в атмосферних умовах. Однак, у порівнянні з нержавіючими сталями, алюмінієві сплави мають два істотних недоліки: значно меншу міцність і схильність до корозії в лужних середовищах. Це виключає можливість застосування алюмінієвих ПРТ в умовах підземних розробок при наявності вологи та у запилених кар'єрах.

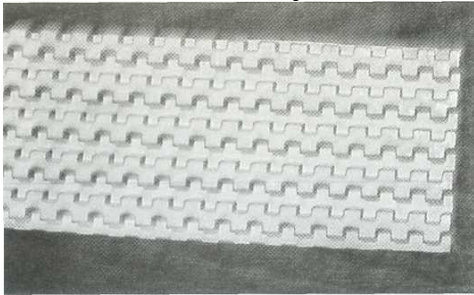


Рисунок 8 - Насадка з розсіченої зі зрушенням стінкою гофри



Рисунок 9 - Структура паяного з'єднання насадки з листом

Вивчено особливості пайки тонкостінних сталевих теплообмінників. Механічні властивості стрічки після термічної обробки по режиму: нагрівання до температури 1120°C, витримка 15 хв., охолодження у вакуумній печі до температури 100°C, нагрівання до температури 700°C, витримка 60 хв., охолодження у вакуумній печі до температури 20°C - наведено в табл. 2. У результаті встановлена закономірність зміни довговічності, що характеризується межею міцності  $\sigma_s$ , сталі тонкостінного теплообмінника шахтних компресорних установок при високотемпературній пайці після нагрівання і відпустку у вакуумі від товщини стрічки теплообмінника  $S$  (рис. 10).

Таблиця 2 - Механічні властивості стрічки зі сталі 20X13 після нагрівання і відпустку у вакуумі

Товщина, мм	Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %
0,14	590	750	7
0,42	510	750	8,8
0,8	570	810	15,8

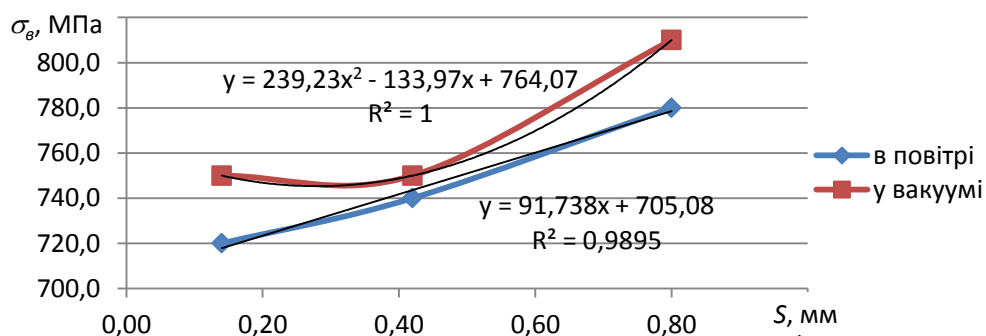


Рисунок 10 - Залежність зміни межі міцності від товщини стрічки при нагріванні і охолодженні у вакуумній печі та на повітрі

Проведені дослідження показали, що сталь 20Х13 дозволяє за допомогою термічної обробки паяних пластинчато-ребристих елементів одержати міцні із запасом пластичності, корозієстійкі ПРТ, що мають високу надійність і довговічність, що важливо для підземних умов шахт.

У **третьому розділі** розроблені способи підвищення надійності деталей і вузлів шахтних компресорів.

Створено композиційний зносостійкий і корозієстійкий сплав для плакування сталевих деталей шахтних компресорів, у якому введення нових компонентів і підбор співвідношення компонентів дозволяє плакувати сталеві деталі шаром будь-якої товщини з комірчастою структурою, що не має усадочних і ліквіаційних дефектів, при наступному співвідношенні компонентів, мас. %: вуглець - 0,3-0,9; кремній - 6,0-7,0; хром - 23-26; вольфрам - 2,0-2,5; бор - 0,5-1,0; титан - 0,6-0,7; нікель - 2,0-4,0; залізо - 1,5-3,5; кобальт - інше.

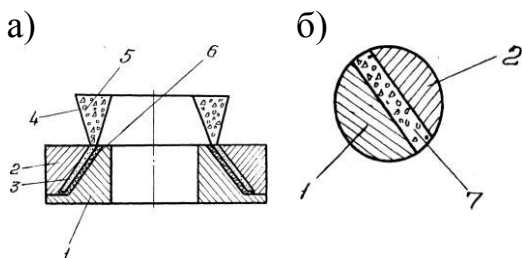


Рисунок 11 - Розріз форми і деталі в зборі (а); зазор (б)

Удосконалено спосіб наплавлення металевої поверхні, у якому деталь, що наплавляється, 2 і форму 1 збирають із зазором 3, з'єднують останній з камерою-живильником 4, причому в зазор поміщають порошковий матеріал 6, а в камеру-живильник - метал-зв'язування 5, потім зібраний вузол нагрівають у вакуумі або захисній атмосфері до розплавлення металу-зв'язування, витримують, прохолоджують і демонтують, звільняючи деталь (рис. 11).

Розроблено спосіб формування товстостінного сталевого з'єднання.

Випробування способу показали, що паяно-зварений тавр при двохсторонньому формуванні жолобника необхідної форми і розміру при просочуванні розплавом безкисневої рафінованої міді суміші порошоків із залізовуглецевих сплавів з різним вмістом вуглецю має механічні властивості на рівні основного металу (табл. 3).

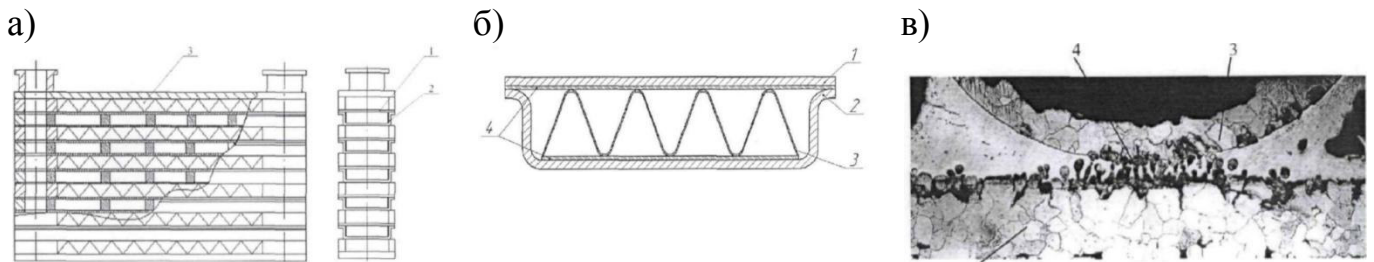
Таблиця 3 - Результати випробувань на розтягування і втомну міцність

№ порошку	Марка порошку	Вміст вуглецю, %	Межа міцності, $\sigma_{\epsilon}$ , МПа	Межа втоми, $\sigma_T$ , МПа
1	H24	0,03	450	80
2	H24	0,32	510	95
3	Суміш 1:1 порошоків № 1 і № 2	-	600	140
4	Суміш порошоків № 1 30 % № 2 70 %	-	480	92
5	Суміш порошоків № 1 70 % № 2 30 %	-	460	85

Розроблено спосіб формування товстостінного таврового з'єднання, що відрізняється тим, що перед фіксуванням взаємного розташування деталей тавра між їх спорідненими поверхнями розміщують прошарок з порошку високо вуглецевого карбонільного заліза, а локальний закритий об'єм утворюють у вигляді контейнера самою деталлю тавра.

Удосконалено конструкції теплообмінних апаратів шахтних компресорних установок. Розроблено теплообмінник пластинчато-ребристий, який відрізняється

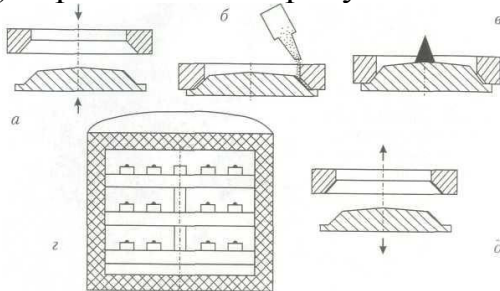
тим, що покриття має склад і товщину, що забезпечують формування паяних з'єднань на перехрестях дроту і у контактні його з листами каналу, при цьому перехрестя встановлені з можливістю забезпечення теплообміну всієї гофрованої сітки (рис. 12).



2 - лист зі сталі 20x13; 3 - гофрована вставка зі сталі 08x18Н10; 4 - сполучний шов, утворений у зазорі розплавленням мідної стрічки

Рисунок 12 - Вид спереду і збоку теплообмінника пластинчасто-ребристого (а), поперечний розріз каналу теплообмінника для переміщення теплоносія (б), мікроструктура паяно-звареного з'єднання деталей теплообмінника міддю (в)

Розроблено і реалізовано способи підвищення надійності та довговічності кульових кранів шахтних компресорних установок. Розроблено спосіб нанесення композиційного корозієстійкого зносостійкого плакування деталей кульових кранів. Технологічна схема здійснення способу представлена на рис. 13. Розроблено спосіб композиційного корозієстійкого зносостійкого наплавлення на залізо-нікелевій основі ущільнювальних кілець кульових кранів. Виконано наплавлення композиційним корозієстійким зносостійким сплавом на залізо-нікелевій основі дослідної партії ущільнювальних кілець кульових кранів для експлуатації в підземних умовах шахт (рис. 14). Промислові випробування дали позитивний результат.



а - установка деталі на технологічну форму; б - заповнення зазору наповнювачем; в - дозування і установка припою; г - нагрівання у вакуумній печі; д - видалення форми

Рисунок 13 - Схема формування шару, що плакує



Рисунок 14 – Кульовий кран і його основні плаковані деталі із прохідним перетином діаметром 100 мм

У четвертому розділі проведена оцінка надійності вузлів і блоків шахтних компресорних машин.

Отримані в дисертації рішення покладені в основу конструкції розроблених гвинтових компресорних установок ВВ-50/8 У2 (Т2), продуктивністю 50 м<sup>3</sup>/хв. і абсолютним тиском нагнітання до 8 кг/см<sup>2</sup>, для буріння свердловин 300 і 311 мм у

складі бурових верстатів СБШ-250МНА-32КП і СБШ-2703 у рудовидобувній промисловості (рис. 15). З 2001 р. по теперішній час було поставлено більше 210 компресорних установок на ГЗК України, Білорусії, Казахстану, Монголії, Росії, Туркменістану, Узбекистану. Зазначеними компресорними установками продуктивністю 25 і 32 м<sup>3</sup>/хв. оснащені бурові верстати виробництва ВАТ «Криворіжгормаш», ТОВ «Завод бурової техніки ДСД» (м. Кривий Ріг), ВАТ «Рудгормаш» (м. Воронеж, Росія), ВАТ «Бузулукський завод важкого машинобудування», ТОВ «ОМЗ ГОІТ» (м. Санкт-Петербург, Росія).

Проведено оцінку надійності вузлів і блоків компресорних машин УКГШ (рис. 16) і ВВ при їхній експлуатації в умовах вугільних шахт (табл. 4). Уперше встановлені закономірності зміни встановленого ресурсу по елементах, імовірності безвідмовної роботи елементів, імовірність безвідмовної роботи при встановленому ресурсі системи, середнього наробітку на відмову по елементах і ймовірності безвідмовної роботи елементів при застосуванні методів і способів підвищення надійності та довговічності компресорних установок гірничих машин із застосуванням високотемпературної вакуумної пайки.



Рисунок 15 - Установка ВВ-40/8 УЗ



Рисунок 16 - Шахтна гвинтова компресорна установка УКГШ-10/7 А У2

Таблиця 4 – Розрахункові значення показників надійності елементів компресорної машини

№ п/п	Найменування	Середній наробіток на відмову, годин	Щільність імовірності відмови	Імовірність безвідмовної роботи	Інтенсивність відмови	Установлений безвідмовний наробіток
1	Контролер	39 736	$1,78 \cdot 10^{-5}$	0,827	$2,03 \cdot 10^{-5}$	-
2	Блок подачі повітря	85 969	$9,2 \cdot 10^{-8}$	0,9975	$9,22 \cdot 10^{-8}$	9057
3	Повітроохолоджувач попередній	50 000	$5,27 \cdot 10^{-7}$	0,995	$8,99 \cdot 10^{-7}$	5288
4	Конденсатовідвідник	30 000	$2,2 \cdot 10^{-6}$	0,987	$2,23 \cdot 10^{-6}$	3160
5	Фільтр грубого очищення	100 000	$2,03 \cdot 10^{-8}$	0,998	$2,03 \cdot 10^{-8}$	10 536
6	Фільтр тонкого очищення	100 000	$2,03 \cdot 10^{-8}$	0,998	$2,03 \cdot 10^{-8}$	10 536
7	Електронагрівач	25 000	$4,04 \cdot 10^{-6}$	0,978	$4,13 \cdot 10^{-6}$	2634
8	Датчик тиску	125 000	$8,7 \cdot 10^{-8}$	0,9975	$8,71 \cdot 10^{-8}$	13 162
9	Датчик температури	20 000	$8,9 \cdot 10^{-7}$	0,96	$8,94 \cdot 10^{-7}$	2107

На підприємствах вугільної промисловості України впроваджені установки компресорні шахтні УКГШ-7,5/7; УКГШ-10/7; УКГШ-15/7 у кількості 1148 установок продуктивністю 7,5–15 м<sup>3</sup>/хв. Установки експлуатуються з 2001 року. Шахтні компресорні установки типу УКВШ мають більше високий рівень пожежної безпе-



ки, ніж установки ШВ-5, що застосовувалися раніше.

У воєнізованих гірничорятувальних загонах впроваджені станції азотні мембранні гвинтові пересувні АМГП-15/0,7 У1 у кількості 9 станцій продуктивністю 15 м<sup>3</sup>/хв. Станції експлуатуються з 2004 року. Станції АМГП-15/0,7 У1 застосовані для гасіння пожеж на шахтах ВП «Шахта ім. М.І. Калініна» ДП «ДУЕК», ПАТ «Шахта ім. О.Ф. Засядька», «Шахта ім. Ф.Е. Дзержинського» ДП «Ровенькиантрацит», ВК «Краснолиманська». Усього станціями вироблено 12 625 325,00 м<sup>3</sup> азоту. Загальний наробіток склав 12536 годин. Фактичний економічний ефект, отриманий за 10 років експлуатації 9 станцій АМГП-15/0,7 У1, склав близько 2 млрд. грн.

На шахтах «Молодогвардійська», «Самсонівська-Західна» ПАТ «Краснодонвугілля» впроваджені установки компресорні газоутилізаційні УКГ-5/8 у кількості 3-х установок продуктивністю 1551 м<sup>3</sup>/ч. Установки експлуатуються з 2008 року. Усього за допомогою установок утилізовано 21 627 079,00 м<sup>3</sup> газу метану. Загальний наробіток склав 57160 годин. Фактичний економічний ефект, отриманий за 6 років експлуатації 3-х установок УКГ-5/8 склав 19 млн. грн.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, у якій вирішене актуальне наукове завдання встановлення закономірностей зміни довговічності деталей та вузлів шахтних компресорів при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки: коефіцієнта напруг від величини внутрішнього напруження, радіуса жолобника і товщини лопатки, закономірності зміни меж міцності сталі після нагрівання і відпуску у вакуумі від товщини стрічки тонкостінних сталевих теплообмінників шахтних компресорних установок та закономірностей зміни показників надійності шахтних компресорних систем і розробки на цій основі методів і способів підвищення надійності деталей та вузлів шахтних компресорних установок гірничих машин, що дозволило створити та впровадити таке устаткування і одержати економічний ефект у розмірі більше 2 млрд. грн. за рахунок підвищення продуктивності, ефективності та безпеки підземних гірничих робіт.

1. Аналіз стану питання розробки методів і способів підвищення надійності та довговічності гвинтових компресорних установок гірничодобувних машин показав, що існує необхідність у проведенні досліджень надійності деталей та вузлів компресорних машин, розробці методів підвищення надійності паяних робочих коліс і теплообмінників шахтних компресорних машин при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки, необхідно встановити закономірності зміни довговічності деталей та вузлів шахтних компресорів при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки. Це дозволить розробити та реалізувати способи і технології підвищення надійності деталей та вузлів шахтних компресорів.

2. Уперше встановлені закономірності зміни характеристики концентрації напруг таврового паяного з'єднання лопатки з диском робочого колеса відцентрового компресора - коефіцієнта напруг від величини внутрішнього напруження, радіуса жолобника і товщини лопатки. Однією з основних характеристик концентрації напруг таврового паяного з'єднання лопатки з диском робочого колеса відцентрового компресора є теоретичний коефіцієнт напруг, що дорівнює відношенню величини



внутрішнього напруження в якій-небудь точці при наявності концентратора до напруги в тій же точці при відсутності концентратора напруги. Для досягнення мінімального значення концентратора напруги необхідне збільшення плавності переходу - радіуса жолобника, оптимальне значення якого дорівнює подвоєній величині товщини стінки тавра; при цьому при збільшенні товщина лопатки колеса з 4 до 10 мм коефіцієнт концентрації лінійно зростає з 2,55 до 3,5, а необхідний радіус тавра змінюється з 4,4 до 5,5 мм.

3. Уперше встановлена закономірність зміни межі міцності сталі після нагрівання і відпуску у вакуумі від товщини стрічки тонкостінних сталевих теплообмінників шахтних компресорних установок. У робочих (гарячих) каналах ПРТ із металевої стрічки, у яких переміщається теплоносій з низькою теплопровідністю, насадка із гладкою поверхнею знижує ефективність теплообміну, а розсічення ламінарного контактного шару у робочих (гарячих) каналах ПРТ дозволяє активно інтенсифікувати теплообмін, створюючи турбулентний потік в'язкої з малою теплопровідністю рідини, що інтенсифікує теплообмін в 2-2,5 рази в порівнянні з теплообміном при ламінарному потоці; при цьому при збільшенні товщини стрічки тонкостінних сталевих теплообмінників шахтних компресорних установок зі сталі 20X13 після нагрівання і відпуску у вакуумі з 0,14 до 0,8 мм межа міцності, що визначає довговічність теплообмінника, зростає у квадратичній залежності від 750 до 810 МПа.

4. Уперше встановлені закономірності зміни показників надійності по елементах шахтних компресорних систем при застосуванні методів і способів підвищення надійності та довговічності компресорних установок гірничих машин із застосуванням високотемпературної вакуумної пайки. Надійність роботи шахтних компресорних систем прямопропорційна надійності роботи електричної мережі, електропривода, компресорної машини, пневматичної мережі елементів компресорної машини, при цьому при застосуванні методів і способів підвищення надійності та довговічності компресорних установок гірничих машин із застосуванням високотемпературної вакуумної пайки встановлений ресурс по елементах лінійно зростає від 2107 до 13 162 годин, імовірність безвідмовної роботи елементів при цьому коливається від 0,975 до 0,9995, імовірність безвідмовної роботи при встановленому ресурсі системи в цілому дорівнює 0,9434, а середній наробіток на відмову по елементах зростає від 20 000 до 125 000 годин, а ймовірність безвідмовної роботи елементів - від 0,827 до 0,998.

5. Створено композиційний зносостійкий і корозієстійкий сплав для плакування сталевих деталей шахтних компресорів, у якому введення нових компонентів і підбор співвідношення компонентів дозволяє плакувати сталеві деталі шаром будь-якої товщини з комірчастою структурою, що не має усадочних і ліквіаційних дефектів.

6. Удосконалений спосіб наплавлення металевої поверхні, у якому деталь, що наплавляється, і форму збирають із зазором, з'єднують останній з камерою живильником, причому в зазор поміщають порошковий матеріал, а в камеру живильник - метал-зв'язування, потім зібраний вузол нагрівають у вакуумі або захисній атмосфері до розплавлення металу-зв'язування, витримують, прохолоджують і демонтують, звільняючи деталь.

7. Розроблено спосіб формування паяного товстостінного сталевого з'єднання і

спосіб формування товстостінного таврового з'єднання під час якого з'єднані деталі тавра збирають, формують кутові шви заданого розміру і форми з нерозплавного металевих порошку та здійснюють високотемпературне паяння, під час якого нагрівають зібрані деталі у вакуумі разом з високотемпературним припоєм.

8. Удосконалено конструкції теплообмінних апаратів шахтних компресорних установок. Удосконалено конструкції пластинчато-ребристих теплообмінників. Розроблено теплообмінник пластинчато-ребристий, що містить секції з каналами для переміщення охолоджуваного середовища з розміщеними в них гофрованими стрічками з металеві сітки, який відрізняється тим, що кожне перехрестя сітки, плетеної з металевих дроту, має покриття і має паяне з'єднання. Паяні з'єднання перехрестя входять до складу зносостійкого корозієстійкого покриття на дроті сітки.

7. Удосконалена технологія виготовлення закритих робочих коліс відцентрових компресорних машин із застосуванням автовакуумного нагрівання має деякі переваги в порівнянні з нагріванням у вакуумній печі, що реалізована при незначних капітальних витратах у серійному і одиничному виробництві при виготовленні, ремонті та модернізації відцентрових компресорів.

8. Розроблено способи підвищення надійності та довговічності кульових кранів шахтних компресорних установок. Розроблено спосіб нанесення композиційного корозієстійкого зносостійкого плакування деталей кульових кранів. Із застосуванням високотемпературної пайки можна сформувати на поверхні сталеві деталі шар, що плакує, з необхідними властивостями необхідної товщини при просоченні порошкового наповнювача розплавленим припоєм у широкому зазорі між деталлю і технологічною формою. **Read-on.ly** Такий спосіб придатний для технології групової обробки деталей у серійному та крупносерійному виробництві кульових кранів з металевим ущільненням.

9. Розроблені методи та способи реалізовані при:

- розробці установок компресорних шахтних УКГШ і ВВ, які впроваджені на підприємствах вугільної промисловості України в кількості 1148 установок. Установки експлуатуються з 2001 року;

- розробці станцій азотних мембранних гвинтових пересувних АМГП, які впроваджені у воєнізованих гірничорятувальних загонах у кількості 9 станцій. Станції експлуатуються з 2004 року. Усього станціями вироблено 12 625 325,00 м<sup>3</sup> азоту. Загальний наробіток склав 12536 годин. Фактичний економічний ефект, отриманий за 10 років експлуатації 9 станцій АМГП-15/0,7 У1, тільки за рахунок збереження устаткування і ліквідації втрат у видобутку вугілля склав близько 2 млрд. грн., при цьому було збережено більше 1000 робочих місць;

- розробці установок компресорних газоутилізаційних УКГ, які впроваджені на шахтах у кількості 3-х установок. Установки експлуатуються з 2008 року. Усього за допомогою установок утилізовано 21 627 079,00 м<sup>3</sup> газу метану. Загальний наробіток склав 57160 годин. Фактичний економічний ефект, отриманий за 6 років експлуатації 3-х установок УКГ-5/8, за рахунок зниження емісії метану в атмосферу, реалізації положень Кіотського протоколу склав 19 млн. грн.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

*Монографії.*

1. Радзиевский В.Н. Высокотемпературная вакуумная пайка в компрессоростроении / В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко. – К.: Екотехнологія, 2009. – 400 с.

*Статті.*

2. Автовакуумная пайка крупногабаритных стальных деталей / В.Н. Радзиевский, В.Л. Дудченко, В.К. Беспалов, Г.Г. Ткаченко // Сварочное производство. - 1988. - № 10. - С. 35-36.

3. Радзиевский В.Н. Высокотемпературная пайка стали при широком зазоре / В.Н. Радзиевский, В.Л. Дудченко, Г.Г. Ткаченко // Сварочное производство. - 1991. - № 10. - С. 7-10.

4. Радзиевский В.Н. Особенности вакуумирования широкого паяльного зазора с металлическим порошковым наполнителем / В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко // Сварочное производство. – 1992. - № 1. - С. 14-16.

5. Радзиевский В.Н. Высокотемпературная пайка труб с трубными решетками по широкому паяльному зазору в вакууме / В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко // Сварочное производство. – 1996. - № 8. - С. 35-37.

6. Радзиевский В.Н. Высокотемпературная пайка в вакууме труб с трубными решетками с широким паяльным зазором / В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко // Роль процессов пайки в создании новой техники. - М.: Центр. Рос. дом знаний. - 1996. - 1996. - С. 10-12.

7. Радзиевский В.Н. Применение высокотемпературной пайки в вакууме при изготовлении компактных кожухотрубчатых теплообменников / В.Н. Радзиевский, В.А. Мышенко, Г.Г. Ткаченко // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1997. - № 6. – С.67-68.

8. Радзиевский В.Н. О растворении-осаждении стали при высокотемпературной пайке медными припоями / В.Н. Радзиевский, Ю.Ф. Гарцунов, Г.Г. Ткаченко // Сварочное производство. -1997. - № 8. – С. 19-22.

9. Радзиевский В.Н. Высокотемпературная пайка стали медно-марганцевым припоем с наполнителем при широком зазоре / В.Н. Радзиевский, Ю.Ф. Гарцунов, Г.Г. Ткаченко // Автоматическая сварка. - 1997. - № 11. - С. 18-21.

10. Особенности формирования толстостенного таврового соединения с применением высокотемпературной пайки и сварки плавлением / В.Н. Радзиевский, Ю.Ф. Гарцунов, Г.Г. Ткаченко, А.А. Бондарев // Сварочное производство. - 2001. - № 4. - С. 42-46.

11. Special features of forming thick-walled welded joints in brazing and fusion welding / V.N. Radzievskii, Y.F. Gartsunov, G.G. Tkachenko, A.A. Bondarev // Welding International. - 2001. – 15 (9). –Pp. 744-747.

12. Радзиевский В.Н. Высокотемпературная автовакуумная пайка стальных рабочих колес центробежных компрессоров / В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко, Ю.Ф. Гарцунов // Автоматическая сварка. - 2001. - № 7. - С. 44-47.

13. Новая технология изготовления сварно-паяных рабочих колес центробежных компрессоров с применением автовакуумного нагрева / В.Н. Радзиевский, П.Е. Жарков, Г.Г. Ткаченко, Ю.Ф. Гарцунов, В.Л. Дудченко // Пневматика и компрессорная техника. - Россия. – 2001. - № 2. - С. 25-26.

14. Выбор материала для изготовления пластинчато-ребристых воздушных охладителей компрессорных установок / А.М. Лавренко, П.Е. Жарков, В.Н. Радзи-

евский, Г.Г. Ткаченко, А.М. Котов // Компрессорная техника и пневматика. – 2002. - № 7. - С. 19-20.

15. Радзиевский В.Н. Высокотемпературная пайка стальных рабочих колес центробежных компрессоров с применением автовакуумного нагрева / В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко, Ю.Ф. Гарцунов // Сварочное производство. - 2002. - № 9. - С. 40-43.

16. Радзиевский В.Н. Высокотемпературная пайка стальных рабочих колес центробежных компрессоров с применением автовакуумного нагрева / В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко, Ю.Ф. Гарцунов // Технология машиностроения. - 2003. - № 1. - С. 20-23.

17. Radzievskii V.N. High-temperature brazing of steel impellers of centrifugal compressors using autovacuum heating / V.N. Radzievskii, Y.F. Gartsunov, G.G. Tkachenko // Welding International. – 2003. – 17 (2). - Pp. 152-155.

18. Повышение эффективности пластинчато-ребристых охладителей масла для винтовых компрессорных установок / А.М. Лавренко, П.Е. Жарков, В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко, А.М. Котов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 2003. - № 6. - С. 22-24.

19. Пластинчатые охладители масла с сеточным оребрением для винтовых компрессорных установок горнодобывающих машин / А.М. Лавренко, В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко, А.М. Котов // Сборник научных трудов Национального горного университета. – Днепропетровск: НГУ. – 2003. - № 17, том 2. - С. 183-187.

20. Особенности паяных стальных пластинчатых охладителей с сеточным оребрением / В.Н. Радзиевский, А.М. Лавренко, Г.Г. Ткаченко, А.М. Котов // Компрессорная техника и пневматика. – 2004. – № 3. – С. 29-33.

21. Освоение производства алюминиевых пластинчато-ребристых теплообменников в концерне «Укрросметалл» / Г.Г. Ткаченко, В.Н. Радзиевский, А.М. Лавренко, А.М. Котов // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2005. - № 2. - С. 56-59.

22. Радзиевский В.Н. Интенсификация теплообмена в охладителях масла и газа компрессорных установок / В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. - 2006. - № 4. - С. 52-58.

23. 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.

24. Барон В.Г. О выборе водяных маслоохладителей для винтовых компрессорных установок / В.Г. Барон, В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. - 2007. - № 1. - С. 40-45.

25. Радзиевский В.Н. Современное состояние технологии изготовления закрытых рабочих колес центробежных компрессорных машин / В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. - 2007. - № 2. - С. 20-25.

26. Ткаченко Г.Г. Формирование активной восстановительной атмосферы при автовакуумной пайке рабочих колес центробежных компрессоров / Г.Г. Ткаченко, В.Н. Радзиевский // Компрессорное и энергетическое машиностроение. - 2007. - № 3. - С. 32-38.



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

28. Ткаченко Г.Г. Влияние процесса окисления-восстановления поверхности стали на формирование паяного соединения при нагреве в вакууме / Г.Г. Ткаченко, В.Н. Радзиевский // Компрессорное и энергетическое машиностроение. - 2008. - № 2. - С. 93-99.

29. Жарков П.Е. Разработка и создание новых воздушных систем термостатирования / П.Е. Жарков, Г.Г. Ткаченко, В.Н. Радзиевский // Компрессорное и энергетическое машиностроение. - 2014. - № 4. - С. 2-5.

30. Кирик Г.В. Разработка методов и способов повышения надежности и долговечности компрессорных установок горных машин с применением высокотемпературной вакуумной пайки / Г.В. Кирик, Г.Г. Ткаченко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. - 2015. - № 2 (40). - С. 40-45.

#### *Патенти.*

31. Патент Украины. № 15945 А. В22D 19/08. Спосіб наплавки металеві поверхні / Радзівський В.М., Жарков П.Є., Гарцунов Ю.Ф., Ткаченко Г.Г. / 93005192. Заявл. 24.04.1993. Опубл. 30.06.1997, Бюл. № 3.

32. Патент Украины. № 19480 А. С22С 19/05. Композиційний зносостійкий і корозійностійкий сплав для плакування сталевих деталей / Радзівський В.М., Гарцунов Ю.Ф., Ткаченко Г.Г., Несвіт А.П. / 94107275. Заявл. 17.10.1994. Опубл. 25.12.1997, Бюл. № 6.

33. Патент Украины. № 19482 А. С22С 19/05. Композиційний зносостійкий і корозійностійкий сплав для плакування сталевих деталей / Радзівський В.М., Гарцунов Ю.Ф., Ткаченко Г.Г. / 94117506. Заявл. 09.11.1994. Опубл. 25.12.1997, Бюл. № 6.

34. Патент Украины. № 53744. С21D1/74. Спосіб формування товстостінного таврового з'єднання / Радзівський В.М., Жарков П.Є., Ткаченко Г.Г., Гарцунов Ю.Ф., Дудченко В.Л. / u200041877. Заявл. 04.04.2000. Опубл. 17.02.2003, Бюл. № 2.

35. Патент Украины. № 56529. F28D 9/00. Теплообмінник / Радзівський В.М., Лавренко О.М., Жарков П.Є., Ткаченко Г.Г., Котов О.М. / u200275779. Заявл. 12.07.2002. Опубл. 15.05.2003, Бюл. № 5.

36. Патент Украины. № 27878. F28D 9/00. Теплообмінник пластинчато-ребристий / Радзівський 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.

37. Патент Украины. № 58015. В23К 31/00. Спосіб формування паяного товстостінного сталевого таврового з'єднання / Радзівський В.М., Жарков П.Є., Ткаченко Г.Г., Будник А.Ф. / u201010944. Заявл. 13.10.2010. Опубл. 25.03.2011, Бюл. № 6.

38. Патент Украины. № 61915. F28D 9/04. Теплообмінник пластинчато-ребристий / Радзівський В.М., Жарков П.Є., Ткаченко Г.Г., Будник А.Ф. / u201010313. Заявл. 25.08.2010. Опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15.

#### *Матеріали конференцій.*

39. Новая технология изготовления сварно-паяных рабочих колес центробежных компрессоров с применением автовакуумного нагрева / В.Н. Радзиевский, П.Е.



Жарков, Г.Г. Ткаченко, Ю.Ф. Гарцунов, В.Л. Дудченко // Сб. трудов Международного симпозиума «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования – 2000». - С. Петербург. - 2000. - С. 225-228.

40. Радзиевский В.Н. Автовакуумная пайка рабочих колес центробежных компрессоров из стали 07X16H6 / В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко, Ю.Ф. Гарцунов // Сб. трудов Международной научно-технической конференции «Пайка – 2000». – Тольятти: ТПИ. - 2000. - С. 44-48.

41. Радзиевский В.Н. Применение автовакуумного эффекта при высокотемпературном нагреве металла в технологических процессах пайки и сварки / В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко // Сб. докладов 4-го Международного симпозиума «Вакуумные технологии и оборудование». - Харьков. - 2001. - С. 405-407.

42. Радзиевский В.Н. Повышение усталостной прочности теплообменных аппаратов / В.Н. Радзиевский, А.М. Лавренко, Г.Г. Ткаченко // Труды 10-й Междун. науч. техн. конф. «Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования». – Сумы. - 2002. - Том 3. - С. 114-117.

43. Исследование теплотехнических характеристик и процесса высокотемпературной пайки пластинчато-ребристых теплообменников с сеточным оребрением / В.Н. Радзиевский, А.М. Лавренко, Г.Г. Ткаченко, А.М. Котов // Труды XIII Междунар. науч.-технич. конф. по компрессоростроению «Компрессорная техника и пневматика в XXI веке». - Сумы. - 2004. - С. 133-143.

44. Особенности конструкции и технологии оребрения труб проволочной спиралью для воздушных теплообменников / В.Н. Радзиевский, Г.Г. Ткаченко, Ю.Ф. Гарцунов, А.М. Котов // Труды XIII Международной научно-технической конференции по компрессоростроению «Компрессорная техника и пневматика в XXI веке». - Сумы. - 2004. – Т. 2. - С. 126-133.

45. Ткаченко Г.Г. Особенности высокотемпературной пайки в вакууме компактных трубчатых охладителей со спиральным проволочным оребрением / Г.Г. Ткаченко, В.Н. Радзиевский // Сб. докладов Международной научно-техн. конф. «Пайка – 2005». – Тольятти: ТГУ. - 2005. - С. 132-137.

*Внесок здобувача в роботи, опубліковані в співавторстві. У роботі [1] - розвинені основи високотемпературної вакуумної пайки в компресоробудуванні, в [2, 3] - розвинені основи автовакуумної пайки великогабаритних сталевих деталей, високотемпературної пайки сталі при широкому зазорі, в [4] – викладені особливості вакуумування широкого паяльного зазору з металевим порошковим наповнювачем, в [5, 6] - розвинені основи високотемпературна пайка труб із трубними решітками по широкому паяльному зазорі у вакуумі, в [7] - розроблені способи застосування високотемпературної пайки у вакуумі при виготовленні компактних кожухотрубчатих теплообмінників, в [8] - досліджено осадження сталі при високотемпературній пайці мідними припоями, в [9] - розвинені основи високотемпературної пайки сталі мідно-марганцевим припоєм з наповнювачем при широкому зазорі, в [10] – досліджені особливості формування товстостінного таврового з'єднання із застосуванням високотемпературної пайки і зварювання плавленням, в [11] – досліджені особливості формування товстостінних зварених швів у пайки і зварювання, в [12] - розроблені технології високотемпературної автовакуумної пайки сталених робочих коліс шахтних відцентрових компресорів, в [13] - розроблена нова технологія виготовлен-*

ня зварювально-паяних робочих коліс шахтних відцентрових компресорів із застосуванням автовакуумного нагрівання, в [14] - здійснений вибір матеріалу для виготовлення пластинчато-ребристих повітряних охолоджувачів шахтних компресорних установок, в [15-17] - викладені методи і способи високотемпературної пайки сталевих робочих коліс, в [18] - розроблені способи підвищення ефективності пластинчато-ребристих охолоджувачів масла для шахтних гвинтових компресорних установок, в [19] - розроблені пластинчасті охолоджувачі масла із сітковим оребренням для шахтних гвинтових компресорних установок гірничодобувних машин, в [20] – визначені особливості паяних сталевих пластинчастих охолоджувачів із сітковим оребренням, в [21] - освоєння виробництва алюмінієвих пластинчато-ребристих теплообмінників, в [22] - розроблений спосіб інтенсифікація теплообміну в охолоджувачах масла і газу шахтних компресорних установок, в [23] - розроблене композиційне корозієстійке зносостійке плакування деталей кульових кранів, в [24] - розроблені водяні маслоохолоджувачі для шахтних гвинтових компресорних установок, в [25] - розроблена технологія виготовлення закритих робочих коліс відцентрових компресорних машин, в [26] - розроблений спосіб формування активної атмосфери при автовакуумній пайці, в [27] - розроблений спосіб композиційної корозієстійкого зносостійкого наплавлення на залізнікіселевій основі ущільнювальних кілець кульових кранів, в [28] - досліджений вплив процесу окислювання-відновлення поверхні сталі на формування паяного з'єднання при нагріванні у вакуумі, в [29] - участь в розробці нових систем термостатування, у [30] – розробка методів і способів підвищення надійності та довговічності компресорних установок гірничих машин із застосуванням високотемпературної вакуумної пайки, в [31-34] - розробка способу наплавлення металевої поверхні, в [35, 36, 38] - удосконалення конструкції пластинчато-ребристого теплообмінника, в [37] - розробка способу формування паяного товстостінного сталевого таврового з'єднання, в [39] - розробка нової технології виготовлення зварювально-паяних робочих коліс, в [40] - розробка способу автовакуумної пайки робочих коліс шахтних відцентрових компресорів, в [41] - застосування автовакуумного ефекту при високотемпературному нагріванні металу, в [42] - розробка способу підвищення втомної міцності теплообмінних апаратів, в [43] - дослідження теплотехнічних характеристик і процесу високотемпературної пайки пластинчато-ребристих теплообмінників, в [44, 45] - вивчення особливостей конструкції і технології оребрення труб для повітряних теплообмінників, високотемпературної пайки у вакуумі компактних трубчастих охолоджувачів зі спіральним дротовим оребренням шахтних компресорних машин.

## АНОТАЦІЯ

Ткаченко Г.Г. Розробка методів і способів підвищення надійності та довговічності компресорних установок гірничих машин із застосуванням високотемпературної вакуумної пайки. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидат технічних наук. Спеціальність: 05.05.06 - «Гірничі машини». - Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, Дніпропетровськ, 2015 р.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання - установ-

ленню закономірностей зміни довговічності деталей та вузлів шахтних компресорів при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки і розробки на цій основі методів і способів підвищення надійності деталей та вузлів шахтних компресорів, що має важливе значення для добувної галузі країни.

Розроблено методи підвищення надійності паяних робочих коліс і теплообмінників шахтних компресорних машин при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки.

Установлено закономірності зміни довговічності деталей та вузлів шахтних компресорів при застосуванні високотемпературної вакуумної пайки. Уперше встановлені закономірності зміни характеристики концентрації напруг таврового паяного з'єднання лопатки з диском робочого колеса відцентрового компресора - коефіцієнта напруг від величини внутрішнього напруження, радіуса жолобника і товщини лопатки. Уперше встановлена закономірність зміни межі міцності сталі після нагрівання і відпуску у вакуумі від товщини стрічки тонкостінних сталевих теплообмінників шахтних компресорних установок.

Виконано оцінку надійності вузлів і блоків шахтних компресорних машин при підземному видобутку корисних копалин. Уперше встановлені закономірності зміни встановленого ресурсу по елементах, імовірності безвідмовної роботи елементів, імовірності безвідмовної роботи при встановленому ресурсі системи, середнього наробітку на відмову по елементах і ймовірності безвідмовної роботи елементів при застосуванні методів і способів підвищення надійності та довговічності компресорних установок гірничих машин із застосуванням високотемпературної вакуумної пайки.

Розроблено та реалізовано способи і технології підвищення надійності деталей та вузлів шахтних компресорів. Удосконалено спосіб наплавлення металевої поверхні. Розроблено спосіб формування паяного товстостінного сталевого з'єднання і спосіб формування товстостінного таврового з'єднання. Удосконалено конструкції теплообмінних апаратів шахтних компресорних установок. Удосконалено технологію виготовлення закритих робочих коліс відцентрових компресорних машин із застосуванням автовакуумного нагрівання. Розроблено способи підвищення надійності та довговічності кульових кранів шахтних компресорних установок. Розроблено спосіб нанесення композиційного корозієстійкого зносостійкого плакування деталей кульових кранів.

Розроблені методи і способи реалізовані при розробці установок компресорних шахтних УКГШ і ВВ; розробці станцій азотних мембранних гвинтових пересувних АМГП, станції експлуатуються з 2004 року. Усього станціями вироблено 12 625 325,00 м<sup>3</sup> азоту, загальний наробіток склав 12536 годин; розробці установок компресорних газоутилізаційних УКГ, установки експлуатуються з 2008 року, усього за допомогою установок утилізовано 21 627 079,00 м<sup>3</sup> газу метану, загальний наробіток склав 57160 годин. Фактичний економічний ефект, отриманий від реалізації компресорних установок перевищив 2 млрд. грн.

Ключові слова: методи і способи, надійність та довговічність, компресорні установки гірничих машин, високотемпературна вакуумна пайка.

## АННОТАЦІЯ

Ткаченко Г.Г. Разработка методов и способов повышения надежности и долговечности компрессорных установок горных машин с применением высокотемпературной вакуумной пайки. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидат технических наук. Специальность: 05.05.06 – «Горные машины». – Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины, Днепропетровск, 2015 г.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи – установлению закономерностей изменения долговечности деталей и узлов шахтных компрессоров при применении высокотемпературной вакуумной пайки и разработки на этой основе методов и способов повышения надежности деталей и узлов шахтных компрессоров, что имеет важное значение для добывающей отрасли страны.

Разработаны методы повышения надежности паяных рабочих колес и теплообменников шахтных компрессорных машин при применении высокотемпературной вакуумной пайки.

Установлены закономерности изменения долговечности деталей и узлов шахтных компрессоров при применении высокотемпературной вакуумной пайки. Впервые установлены закономерности изменения характеристики концентрации напряжений таврового паяного соединения лопатки с диском рабочего колеса центробежного компрессора - коэффициента напряжений от величины внутреннего напряжения, радиуса галтели и толщины лопатки. Впервые установлена закономерность изменения предела прочности стали после нагрева и отпуска в вакууме от толщины ленты тонкостенных стальных теплообменников шахтных компрессорных установок.

Выполнена оценка надежности узлов и блоков шахтных компрессорных машин при подземной добыче полезных ископаемых. 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 при применении методов и способов повышения надежности и долговечности компрессорных установок горных машин с применением высокотемпературной вакуумной пайки.

Разработаны и реализованы способы и технологии повышения надежности деталей и узлов шахтных компрессоров. Усовершенствован способ наплавки металлической поверхности. Разработан способ формирования паянного толстостенного стального соединения и способ формирования толстостенного таврового соединения. Усовершенствованы конструкции теплообменных аппаратов шахтных компрессорных установок. Усовершенствована технология изготовления закрытых рабочих колес центробежных компрессорных машин с применением автовакуумного нагрева. Разработаны способы повышения надежности и долговечности шаровых кранов шахтных компрессорных установок. Разработан способ нанесения композиционного коррозионностойкого износостойкого плакирования деталей шаровых кранов.

Разработанные методы и способы реализованы при разработке установок компрессорных шахтных УКВШ и ВВ; разработке станций азотных мембранных винтовых передвижных АМВП, станции эксплуатируются с 2004 года. Всего станциями

произведено 12 625 325,00 м<sup>3</sup> азота, общая наработка составила 12536 часов; разработке установок компрессорных газопутилизационных УКГ, установки эксплуатируются с 2008 года, всего при помощи установок утилизировано 21 627 079,00 м<sup>3</sup> газа метана, общая наработка составила 57160 часов. Фактический экономический эффект, полученный от реализации компрессорных установок превысил 2 млрд. грн.

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

## ANNOTATION

Tkachenko G.G. Development of methods and ways to improve the reliability and durability of compressor installations mining machines with the use of high-temperature vacuum brazing. - Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences. Speciality: 05.05.06 – “Mining machines”. - Institute of Geotechnical Mechanics by N.S. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnepropetrovsk, 2015.

Dissertation is devoted to solving actual scientific problem - establishing patterns of change in the durability of parts and assemblies mine compressors when applying high-temperature vacuum brazing and development on this basis methods and ways of improving the reliability of parts and components compressor mining, which is important for the mining industry in the country.

Methods of improving the reliability of soldered heat exchangers impellers and shaft compressor machines in the application of high-temperature vacuum brazing.

The regularities of changes in the longevity of parts and assemblies mine compressors when applying high-temperature vacuum brazing. For the first time the regularities of changes in the characteristics of the stress concentration tee solder connection with the disc blades of the impeller of a centrifugal compressor - the coefficient of the stress on the value of the internal stress, the fillet radius and thickness of the blade. The first time the pattern changes the tensile strength of steel after heat and leave in a vacuum the thickness of the thin-walled steel tape exchangers mine compressor installations.

The evaluation of the reliability of units and blocks of mine compressor machines in underground mining. For the first time the regularities of changing the set of resource elements, the probability of failure-free operation of elements, the probability of failure-free operation during a resource system of the elements and the probability of failure-free operation of elements in the application of methods and techniques to improve the reliability and durability of compressor installations mining machines with the use of high-vacuum soldering.

Developed and implemented methods and technologies increase the reliability of parts and assemblies mine compressors. An improved method for hardfacing a metal surface. A method of forming thick-walled steel solder connections and a method of forming a thick-walled T-joints. Improve the design of heat exchangers mine compressor installations. The technology of manufacturing closed impeller centrifugal compressor machines using autovacuum heating. Ways of improving the reliability and durability of ball valves mine compressor installations. A method of applying a wear-resistant corrosion-resistant



composite cladding parts of ball valves.

The developed methods and techniques implemented in the design of compressor units UKVS mine and explosives; development of membrane nitrogen stations screw AMVP mobile stations operated since 2004. Total stations produced 12 625 325,00 m<sup>3</sup> of nitrogen, total operating time amounted to 12,536 hours; development of compressor installations gasutilization UKG, which have been operating since 2008, all with the help of plants disposed of 21,627 079.00 m<sup>3</sup> of methane gas, the total operating time was 57160 hours. The actual economic impact derived from the sale of compressor units exceeded 2 billion UAH.

Keywords: methods and ways, reliability and durability, compressor weed-installation of mining machines, high-temperature vacuum brazing.

Read-only

Ткаченко Геннадій Григорович

Розробка методів і способів підвищення надійності та довговічності компресорних установок гірничих машин із застосуванням високотемпературної вакуумної пайки

Read-only Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Підписано до друку 09.09.2015 р.  
Гарнітура Times. Друк ризографічний.  
Папірофсетний. 1,19 умов. друк. арк.  
Тираж 100 прим. Зам №1040  
Друк ТОВ «Барвікс»  
Свідоцтво про внесення до державного реєстру  
№24 від 25.07.2000р.  
49005, м. Дніпропетровськ, вул. Сімферопольська, 17