



**В.Є. Панарін, М.Є. Свавільний, В.В. Погорєлая,
Л.З. Петухов, А.І. Хомінич**

Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, Київ

РОЗРОБКА МОБІЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЬНИХ ТРУБ НИЗЬКОГО ТА ВИСОКОГО ТИСКУ МЕТОДОМ ПАЙКИ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИМИ ПРИПОЯМИ



Розроблено технологію безвогневого ремонту дефектів конструкцій з низьковуглецевих сталей шляхом пайки низькотемпературними припоями. Розроблено та заявлено новий склад легкоплавкого припою на базі олова з домішками міді та вісмуту. Припій оптимально поєднує властивості рідкоплинності, корозійної стійкості, міцності та адгезійної міцності. Технологію пайки сталей низькотемпературними припоями із застосуванням високочастотного генератора електричного струму доведено до стану практичного застосування.

Ключові слова: ремонт, труби, ємності, наскрізні дефекти, вибухобезпека, пайка, низькі температури.

Країни з високим рівнем технічного розвитку, до яких належить і Україна, використовують великий об'єм металевих конструкцій, виготовлених з низьковуглецевих сталей, зокрема труби для перекачки води з високим та низьким тиском, магістральні трубопроводи для транспортування нафти, газу, бензину, резервуари для збереження вуглецьводневого палива. Через низьку корозостійкість цих сталей в трубах та резервуарах під дією зовнішнього та внутрішнього середовища виникають наскрізні дефекти у вигляді отворів неправильної форми. Нема потреби пояснювати, до яких негативних наслідків призводять такі дефекти через витікання рідини.

Ремонт наскрізних дефектів корозії механічним шляхом — накладанням хомутів на трубах на труби та латок на клеях — не дає по-

трібного результату. Наприклад, розроблена технологія наклеювання латок на наскрізні отвори на основі полімерних клейових композицій не ефективна через велику різницю у коефіцієнтах термічного розширення клею та металу, через що виникають внутрішні напруження при зміні температур і, як наслідок, відклеювання латки [1–3]. Крім того, продукти деструкції полімерів зазвичай стимулюють процеси корозії шляхом біологічних пошкоджень металів, що у свою чергу інтенсифікує старіння полімерів [4, 5].

Усунення дефектів шляхом зварки є вибухонебезпечним і вимагає звільнення трубопроводів або ємностей від рідини та парів, що призводить до суттєвого ускладнення та подорожчання технології.

Окрім перелічених недоліків існуючих засобів ремонту треба згадати також неможливість ремонту із застосуванням відкритих джерел вогню, коли перекачується пожежо- або вибу-





хонебезпечна рідина (нафта, газ, бензин, ефіри, тощо), а також необхідність тимчасового припинення технологічного процесу.

Добре відомий метод пайки для усунення наскрізних дефектів на сьогодні застосовується дуже рідко через ускладнення в результаті нагрівання металу. Використовувати відкрите полум'я пальника неможливо при перекачці пожежонебезпечних рідин. При пайці водопроводів тепло дуже інтенсивно відбирається та відводиться водою від місця нагрівання, тому треба звільняти трубу від води, тобто перекивати потік на час ремонту. Крім того, існуючі припої мають такі недоліки: невисока корозійна стійкість, низький кут змочування рідкого металу на поверхні сталі, низька адгезія та низький рівень механічних властивостей паяного з'єднання.

Значна частина наскрізних дефектів трубопроводів та ємностей виникає через руйнівну дію корозії. Переважна більшість руйнувань резервуарів утворюється в зоні сполучення стінки із днищем, а також у зоні першого поясу на рівні скупчення підтоварної води (ефект ватерлінії) [6]. Швидкість і характер поширення корозії залежать від внутрішніх та зовнішніх факторів.

Внутрішні фактори (склад і структура металу, стан його поверхні, наявність внутрішніх напружень та дефектів у металі) сильно впливають на швидкість корозії. Для виготовлення трубопроводів та резервуарів використовують головним чином низьковуглецеві сталі з гетерогенною структурою, які мають невисоку корозійну стійкість. Використовуваний метал має внутрішні напруження, які виникають в результаті прокатки; поверхня поставленого металу механічно не обробляється і має підвищену шорсткість, що у свою чергу збільшує швидкість його корозії. Однак не менший вплив на характер і швидкість корозії мають зовнішні фактори: природа та склад рідини, її тиск, швидкість переміщення. Крім того, швидкість і характер корозії залежать від частоти заповнення та спустошення системи, складу атмосфери, температури та вологості навколиш-

нього середовища та інших факторів. Встановлено [7], що за інших однакових умов чим менше обсяг резервуару, тим більша швидкість корозії і, природно, більша швидкість наскрізних та не наскрізних корозійних дефектів.

В Інституті металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України розроблено лабораторну технологію безвогневого ремонту трубопроводів та конструкцій із низьковуглецевих сталей шляхом пайки низькотемпературними припоями. На відміну від існуючих, в розробленій технології використано нагрівання металу струмами високої частоти (струми Фуко). Особливістю струмів Фуко є те, що вони виникають лише у поверхневому шарі металу (скін-шарі) і здатні швидко розігрівати його до заданих температур, лишаючи при цьому деякий час холодною основну масу металу, аж доки тепло не пошириться по всьому обсягу металу. Така позитивна особливість дає можливість використовувати лише поверхневий розігрів металу, що важливо для умов пайки, коли необхідно розплавити більш легкоплавкий припій, ніж підкладка.

Другим позитивним чинником є відсутність відкритого полум'я, що забезпечує можливість проведення пожежобезпечних робіт по ремонту на нафто-, газо- та бензопроводах.

Відповідно до документації [8–10] ремонт резервуарів із застосуванням вогневих робіт дозволяється робити тільки після звільнення резервуару від вуглець-водневого палива, очищення від залишків нафтопродуктів (мертвий осад), дегазації його при забезпеченні пожежної безпеки поруч розташованих резервуарів і технологічних трубопроводів. Такі підготовчі роботи вимагають великих часових і матеріальних витрат.

При безвогневому методі ремонту трубопроводів та ємностей не потрібні великі матеріальні і часові затрати у порівнянні з вищевикладеною підготовкою до вогневих робіт. Крім того, пайка сталевих поверхонь сполучуваних деталей є економічною, швидкою, екологічно чистою технологією. Оскільки пайка не передбачає нагрівання металу до високих темпера-



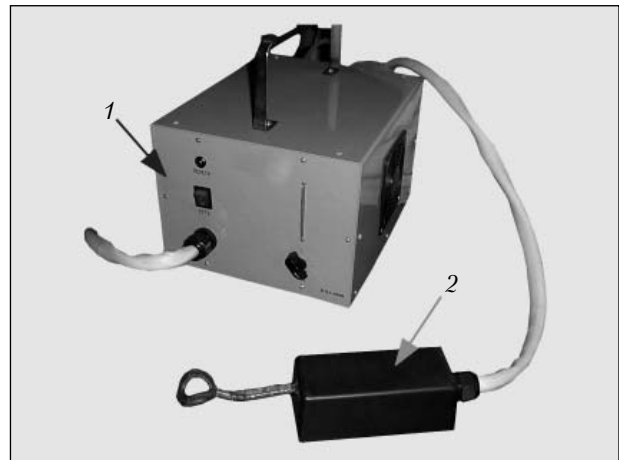
тур (вище температури світіння), то вона не є пожежо- та вибухонебезпечною.

Істотним недоліком паяного з'єднання є відносно слабка міцність сполучених поверхонь, що визначається міцністю матеріалу припою та адгезією припою до поверхні паяної деталі. Але якщо паяне з'єднання, як у нашому випадку ремонту окремих ділянок конструкцій, не піддається високим навантаженням у процесі експлуатації, то технологія пайки може бути цілком задовільною.

Важливим моментом технології пайки є засіб нагрівання паяних поверхонь. Існує досить широкий спектр методів нагрівання металу, які успішно застосовуються на практиці, серед яких для ремонту вуглець-водневої рідини необхідно вибрати лише ті, що характеризуються вибухо- та пожежонебезпечністю, тобто не передбачають використання відкритого полум'я.

Індукційний метод є швидким, економічним та екологічно чистим методом нагрівання будь-яких струмопровідних матеріалів і металів. Установки індукційного нагрівання успішно застосовуються у цілому ряді технологічних операцій [11–14]. З патентної та технічної літератури [15–21] відомі функціональні припої з широким інтервалом солідус–ліквідус, що сприяє наданню припою твердо-рідкого (пастоподібного) стану в широкому температурному інтервалі.

Перевага таких функціональних припоїв полягає в тому, що вони, маючи спеціальні технологічні властивості (пастоподібний стан при температурі пайки, відповідний кут змочування), забезпечують можливість формування вертикальних швів. На сьогодні такі функціональні припої широко застосовуються, наприклад, в автомобільній промисловості для шпаклівки корпусів і кузовів автомобілів. Однак застосування таких припоїв для проведення ремонтних робіт при наявності неконтрольованого виходу вогненебезпечної рідини не уявляється можливим, оскільки температура пайки цими припоями значно перевищує 160 °С, що призводить до пожежо- та вибухонебез-



Загальний вигляд установки індукційного нагрівання: 1 – високочастотний перетворювач напруги; 2 – індукційний нагрівач

печної ситуації. Також ці припої мають недостатню механічну та корозійну стійкість до дії атмосферної та підземної корозії.

У зв'язку з цим нами було поставлене завдання розробити спеціальний сплав (низькотемпературний припій), який би відрізнявся від відомих підвищеною корозійною стійкістю в умовах атмосферної корозії з поліпшеними фізико-механічними і спеціальними технологічними властивостями, а також технологію пайки низьковуглецевих сталей цим припоєм. Неодмінною вимогою було те, щоб максимальна температура пайки таким припоєм не пере-

Технічні характеристики установки індукційного нагрівання

Параметр	Величина
Напруга на вході (50 Гц), В	220 ± 10
Споживана потужність, кВт	3–4
Діапазон температур навколишнього середовища, °С	–40 ÷ +40
Час безперервної роботи, хв.	10
Робоча частота (кГц)	66
Вага індуктора, кг	2
Вага високочастотного перетворювача напруги, кг	8

вищувала 160 ± 5 °С з метою забезпечення проведення пожежо- та вибухобезпечних робіт. З іншого боку, з огляду на технологічні особливості проведення процесу пайки, а також фізичні і хімічні процеси, які відбуваються в зоні пайки, мінімальна температура пайки повинна бути не нижче 70–80 °С. Отже, розроблений спеціальний сплав для низькотемпературного припою повинен мати температуру пайки 70–160 °С.

При розробці припоїв одним із головних чинників є температура та інтервал плавлення (відстань між солідусом та ліквідусом). Крім того, дуже важливу роль у формуванні необхідних механічних, фізичних та хімічних властивостей припою відіграє його фазовий склад, який у нашому випадку буде визначатися відносно термодинамічно рівноважними станами, що пов'язано з невеликими швидкостями нагрівання та охолодження паяного з'єднання. Враховуючи наведені міркування в нашій роботі, для розробки сплаву з достатньою точністю можна було використовувати діаграми фазових станів відповідних систем легкоплавких металів.

З аналізу відомих [22, 23] подвійних та потрійних фазових діаграм легкоплавких металів було обрано шестикомпонентну систему Pb–In–Cd–Ni–Ge–Sn, яка найбільш повно відповідає сформованим вимогам пайки, особливо з вертикальними та стельовими швами. Для виявлення вірогідності утворення можливих фаз, що знаходяться у термодинамічній рівновазі між собою, було проаналізовано відповідні утворюючі подвійні та потрійні діаграми фазових рівноваг. Конкретною метою даної розробки, яка впливає із попередньо наведених вимог до низькотемпературних припоїв, є зниження температури плавлення і розширення інтервалу кристалізації, а також підвищення міцності і корозійної стійкості паяного з'єднання. З огляду на ці вимоги було обрано такий склад сплаву (мас. %): свинець — 24–25; індій — 18–19; кадмій — 14–15; нікель — 3–5; германій — 1–1,2; решта — олово.

На склад припою оформлено заявку на патент України та отримано позитивне рішення.

Розроблено установку (див. рисунок) індукційного нагрівання, яка призначена для нагрівання металевої поверхні під пайку і відноситься до групи електроустаткування II класу за ДСТ 12.2.020.

Установка індукційного нагрівання зі споживаною потужністю 3–4 кВт складається з високочастотного перетворювача напруги (1) і високочастотного індукційного нагрівача (2). Технічні характеристики індукційного нагрівача наведено у таблиці. Загальний вигляд високочастотного перетворювача та індукційного нагрівача наведено на рисунку.

Нами розроблено та впроваджено у виробництво (відповідні акти використання на діючих ємностях ТОВ ВКФ «Агронафтопродукт» додаються до кінцевого звіту) технологічний процес безвогневого ремонту металевих конструкцій і споруджень, призначених для зберігання та транспорту пожежо- та вибухонебезпечного (переважно вуглець-водневого) палива. Розроблено також технологію БРТ та технологічну інструкцію по безвогневому ремонту сталевих трубопроводів і резервуарів.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Правила безопасности при эксплуатации магистральных нефтепроводов.* — М.: Недра, 1987. — 17 с.
2. *Правила безопасности при эксплуатации магистральных газопроводов.* — М.: Недра, 1985. — 6 с.
3. *Защита от коррозии, старения, и биоповреждений машин, оборудования и сооружений.* Справочник в 2-х томах / Под ред. А.А. Герасименко. — М.: Машиностроение, 1987. — Т. 1. — С. 172.
4. *Манин В.Н., Громов А.Н.* Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации. — М.: Химия, 1980. — 126 с.
5. *Воробьева Г.Я.* Химическая стойкость полимерных материалов. — М.: Химия, 1981. — 296 с.
6. *Галеев В.Б.* Эксплуатация стальных вертикальных резервуаров в сложных условиях. 1981. — 150 с.
7. *Лыков М.В.* Защита от коррозии резервуаров, цистерн, тары и трубопроводов для нефтепродуктов бензостойкими покрытиями. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Химия, 1978. — 240 с.
8. *Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту / Государственный комитет*



- тет СССР по обеспечению нефтепродуктами. — М.: Недра, 1988. — 269 с.
9. Правила пожарной безопасности в нефтяной промышленности. ППБО—85. — М.: Недра, 1986. — 14 с.
 10. *Правила* технической эксплуатации магистральных нефтепродуктопроводов. Гос. ком. РСФСР по обеспечению нефтепродуктами: Введ. 23.07.84, разработ. Госкомнефтепродукт СССР. — М.: Недра, 1988. — 87 с.
 11. *Вологдин В.В.* Пайка и наплавка при индукционном нагреве / Под ред. А.А. Фогеля. — 3-е изд., испр. и доп. — М.—Л.: Машиностроение, 1965. — 90 с.
 12. *Тир Л.Л., Фомин Н.И.* Современные методы индукционной плавки (Библиотека электротермиста, вып. 59). — М.: Энергия, 1975. — 37 с.
 13. *Зенкин А.С., Арпентьев Б.М.* Сборка неподвижных соединений термическими методами. — М.: Машиностроение, 1987. — 125 с.
 14. *Немков В.С., Демидович В.Б.* Теория и расчет устройств индукционного нагрева. — Л.: Энергоатомиздат, 1988. — 280 с.
 15. *O. Sakir and O. Alpaut.* Thermodynamic Properties of Solid. In-Sn Alloys, J. Less-Common Met., 1988. — 141. — P. 11–27.
 16. *Авт. свид.* СССР № 1401771, кл. В 23 К 35/26.
 17. *Авт. свид.* СССР № 1404893, кл. В 23 К 35/26. 12.05.87.
 18. *Патент* Франции № 2105808. кл. В 23 К 35/26. 02.06.72.
 19. *Авт. свид.* СССР № 1358249, кл. В 23 К 35/26. 1986.
 20. *Патент* США №219–10.79. Оpubл. 1960.
 21. *Авт. свид.* СССР №200045, кл. Н 05 В 5/02. Оpubл. 1972.
 22. *Ternary Alloy Systems. Phase Diagrams, Crystallographic and Thermodynamic Data. Noble Metal Systems. Non-Ferrous Metal Systems. Selected Semiconductor Systems*, ed. Effenberg, G., Пыенко, S. — Vol. C1. — 2006. — P. 450.
 23. *T. Neumann, O. Alpaut.* J. Less-Common Met. 6 (1964). — P. 108–117.

*В.Е. Панарин, Н.Е. Свавильный, В.В. Погорелая,
Л.З. Петухов, А.И. Хоминич*

РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЬНЫХ ТРУБ НИЗКОГО И ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ МЕТОДОМ ПАЙКИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПРИПОЯМИ

Разработана технология безогневого ремонта дефектов конструкций из низкоуглеродистых сталей путем пайки низкотемпературными припоями. Разработан и заявлен новый состав легкоплавкого припоя на базе олова, с добавками меди и висмута. Припой оптимально объединяет свойства жидкотекучести, коррозионной стойкости, прочности и адгезионной прочности. Технологию пайки сталей низкотемпературными припоями с применением высокочастотного генератора электрического тока доведено до состояния практического применения.

Ключевые слова: ремонт, трубы, емкости, сквозные дефекты, взрывобезопасность, пайка, низкие температуры.

*V.E. Panarin, N.E. Svavilny, V.V. Pogorelaya,
L.Z. Petukhov, A.I. Hominich*

DEVELOPMENT OF MOBILE TECHNOLOGY TO REPAIR HIGH AND LOW PRESSURE LOW CARBON STEEL TUBS BY SOLDERING WITH LOW-TEMPERATURE SOLDER METHOD

The technology of out fire defects repair in low carbon steel constructions by soldering with low-temperature solders is developed. The new fusible tin rich solder composition containing copper and bismuth additives is developed and declared. The solder has optimum properties of liquid stream, corrosion resistance, durability and adhesion strength. The low carbon steel soldering technology with application of high-frequency electric current generator is carried to practical application.

Key words: repair, tubs, tanks, through defects, explosion safety, soldering, low temperatures.

Надійшла до редакції 03.03.09

