

022.022.4  
4-49  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ЧЕРНОВ ВОЛОДИМИР ЮРІЙОВИЧ

УДК 656.56:629.017

**НАУКОВО-ПРИКЛАДНІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ  
ТРУБОПРОВІДІВ ПРИ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Спеціальність 05.15.13- нафтогазопроводи, бази та сховища

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Івано-Франківськ-2003

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант – доктор технічних наук, професор ШЛАПАК Любомир Степанович, Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ, м.Івано-Франківськ



Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор ГРУДЗ Володимир Ярославович, Івано-Франківській національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ, м.Івано-Франківськ

доктор технічних наук, професор НИКИФОРЧИН Григорій Миколайович, Фізико-механічний інститут ім.Г.В.Карпенка НАН України, завідувач відділу корозійно-водневої деградації та захисту матеріалів, м.Львів

доктор технічних наук, професор СТЕКЛОВ Олег Іванович, Російський державний університет нафти і газу ім.І.М.Губкіна, завідувач кафедри зварювання та захисту від корозії, м.Москва

Провідна установа – Інжинірингово-виробниче підприємство "Всеукраїнський науковий і проектний інститут транспорту газу (ВНШПТРАНСГАЗ), м. Київ.

Захист дисертації спеціалізація національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна,

розрахунок за адресою: м. Київ, вул. М. Гоголя, 15, 01019, Україна.

З дисертації вивчено основні положення наукового дослідження, результати виконаних досліджень, висновки та рекомендації. Дисертація рекомендована до друку.

Дисертація захищена в Інституті нафти і газу НАН України, м. Київ, 15.05.2015 р.

Автореферат дисертації розповсюджувати за адресою: м. Київ, вул. М. Гоголя, 15, 01019, Україна.

Вчений спеціалізація

О.В.



an776

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Безупинно зростаючі потреби в енергоносіях змушують інтенсифікувати видобуток нафти і газу, що пов'язано з освоєнням нафтогазових родовищ у північних районах. Це зумовлює необхідність будівництва промислових і магістральних трубопроводів у суворих кліматичних та інженерно-геологічних умовах. При цьому виконання зварювально-монтажних робіт є можливим, переважно, узимку при низьких температурах повітря (до  $-50^{\circ}\text{C}$ ). Трубопроводи, що застосовуються для видобутку і транспортування нафти і газу, постійно контактують з корозійно-агресивними продуктами, їхнє руйнування супроводжується великими матеріальними збитками і важкими екологічними наслідками.

Як показує практика, термін експлуатації трубопроводів в значній мірі визначається корозійною тривкістю і тріщиностійкістю трубних сталей і їхніх зварних з'єднань. Основу трубопровідного будівництва складають зварювально-монтажні та ізоляційно-укладальні роботи, якість виконання яких значною мірою визначає технологічну міцність і експлуатаційну надійність трубопроводів.

При цьому велике значення має також підвищена схильність трубних сталей і їхніх зварних з'єднань до водневого окрихчування, особливо зі зниженням температури навколишнього повітря при зварюванні. Відсутність науково обґрунтованих критеріїв оцінки і вибору режимів зварювання при від'ємних температурах ускладнює розробку оптимальної технології, яка б забезпечила високу технологічну міцність зварних з'єднань і мінімальний негативний вплив термічного циклу зварювання на метал труб. Це призводить до необхідності здійснення додаткових заходів (попереднього і наступного нагрівання, теплоізоляції монтажних стиків та ін.), що значно збільшує вартість монтажу трубопроводів.

Експлуатація нафтових і газових родовищ нерозривно пов'язана з корозійним руйнуванням нафтогазового устаткування, зокрема, промислових трубопроводів. Однією з основних причин такого виду руйнування є присутність у продукті, що транспортується, сірководню і вуглекислого газу. Водонафтогазова емульсія має корозійно-агресивні властивості, які визначаються її складом і концентрацією розчинених солей, наявністю кисню і кислих газів (вуглекислого газу, сірководню), їхнім парціальним тиском, температурою, а також швидкістю руху і характером потоку.

Тому конструкційні матеріали повинні мати необхідне сполучення міцнісних і в'язкопластичних властивостей, що зберігають свою стабільність у широкому інтервалі температур і тисків, з високою корозійною тривкістю, у тому числі до водневого окрихчування, корозійного розтріскування й інших специфічних видів корозійного руйнування, які проявляються в умовах впливу нафтогазових середовищ.

Забезпечення довговічності і надійності промислових трубопроводів родовищ нафти і газу в значній мірі визначається раціональним вибором конструкційних матеріалів і вимагає впровадження нових, більш якісних трубних сталей. Для забезпечення необхідної довговічності та надійності трубопроводів, виготовлених з

найбільш поширених вуглецевих (наприклад, сталь 10 і 20) і низьколегованих (09Г2С, 09Г2, 17Г1С) сталей, потрібно застосовувати різноманітні методи протикорозійного захисту, наприклад, інгібування, з розробкою технологічних варіантів зниження корозійної агресивності середовища, а також різні методи поверхневої обробки і захисту конструкційних матеріалів. Однак найчастіше перелічені вище методи не забезпечують необхідної стійкості поверхонь труб проти корозії, особливо якщо вони використовуються окремо. Тому в останні роки все більшого застосування знаходять комбіновані методи захисту нафтогазового обладнання, зокрема транспортних трубопроводів, від впливу агресивних середовищ.

Альтернативою цьому є метод поліпшення якості і підвищення механічних і корозійних властивостей основного і наплавленого металу, що полягає в мікролегуванні трубних сталей і зварних швів елементами-модифікаторами, зокрема, рідкісно- (РЗЕ) і лужноземельними (ЛЗЕ). Ефективність впливу таких мікродомішок пов'язана зі зміною морфології, розподілу і дисперсності структурних складових металу, а також складу і стану границь зерен. Питання впливу модифікуючих домішок на деформаційну здатність і корозійну стійкість трубних сталей і зварних з'єднань, особливо при низьких температурах, і досі залишається не вивченим.

Існуючі дотепер науково-технічні і конструкторські розробки з підвищення термінів служби промислових трубопроводів містять протиріччя і невизначеність. В них відсутні кількісні науково обгрунтовані практичні рекомендації з оптимального вибору електродних матеріалів і технології монтажного зварювання неповоротних стиків стосовно до змінюваних умов експлуатації нафтогазопроводів. Все це вказує на необхідність комплексного і системного вивчення зазначеної проблеми з розробкою раціональних антикорозійних і конструкторсько-технологічних заходів при спорудженні і ремонті трубопроводів у трасових умовах нафтових родовищ.

Рішення науково-технічної проблеми, спрямованої на розробку високоєфективних ресурсозберігаючих технологічних процесів і матеріалів для виготовлення промислових трубопроводів, а також методів підвищення їхньої надійності й експлуатаційної довговічності являє собою актуальну задачу.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась в рамках державної науково-технічної програми "Новітні технології розвитку паливно-енергетичного комплексу", що входить до Національної програми "Нафта і газ України до 2010 року".

Тематика роботи є частиною планових державних науково-дослідних робіт з розвитку нафтопромислового комплексу РФ.

Наукові дослідження по темі дисертації проведені у відповідності з планом НДР Координаційної ради по зварюванню і міжвузівських програм.

Викладені в дисертації результати покладені в основу розробленої за участю автора науково-технічної концепції розвитку трубопровідного транспорту Самотлорського родовища (в рамках Програми реконструкції Самотлорського родовища).

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної дисертації є розробка науково-

прикладних основ підвищення експлуатаційної надійності промислових трубопроводів для суворих кліматичних умов. Вона досягається вирішенням важливих науково-практичних задач:

1. Дослідження природи і механізму вуглекислотної корозії трубних сталей в умовах експлуатації в агресивних середовищах.
2. Дослідження причин і встановлення механізму локальної корозії зварних нафтопроводів з розробкою математичних моделей корозійних процесів для прогнозних оцінок ресурсу промислових трубопроводів.
3. Виявлення ступеня впливу водню на механізм сульфідного корозійного розтріскування під напруженням (СКРН), а також індукованого ним розшарування (ВІР) металу труб з розробкою електрохімічних і математичних моделей механізмів вказаних видів руйнування.
4. Розробка науково обґрунтованих практичних рекомендацій з підвищення корозійної тріщиностійкості трубних сталей та їхніх зварних з'єднань, а також технологічної міцності промислових трубопроводів.
5. Дослідження і розробка рекомендацій з оптимізації хімічного складу трубних сталей, вмісту в них водню і способів реалізації, що забезпечують високу тріщиностійкість холодостійких сталей у широкому інтервалі зміни температур (+40...-60 °С.).
6. Розробка нових марок сталей для виготовлення промислових труб, проведення випробувань їхніх холодостійких і корозійних властивостей, а також організація дослідно-промислової перевірки і впровадження на промислах.
7. Розробка нової марки електродів для зварювання кореневих швів монтажних стиків, проведення випробувань їхніх зварювально-технологічних характеристик і властивостей металу шва.

*Об'єкт дослідження.* Промислові трубопроводи; удосконалені низьковуглецева сталь 20А і низьколегована сталь 08ХМЧА з високими антикорозійними властивостями, холодо- і тріщиностійкістю при експлуатації в корозійно-активних середовищах; розроблений електрод марки АНО-ТМ.

*Предмет дослідження.* Механізм локальної (пітингової і канавкової) корозії; концепція ступеня впливу водню на СКРН і розшарування металу труб; математична модель опору металу нафтогазопроводів утворенню тріщин, спричинених статичною (циклічною) водневою втомою; закономірності впливу домішок-модифікаторів РЗЕ, ЛЗЕ на корозійну тривкість, міцнісні та опору крихкому руйнуванню характеристики і тріщиностійкість низьколегованих трубних сталей та їхніх зварних з'єднань.

*Методи досліджень.* Дослідження проводилися за допомогою чисельних методів з використанням загальновідомих і оригінальних методик експериментальних досліджень. Під час досліджень і металографічного аналізу структури і геометрії дефектів використовувалося сучасне спеціальне обладнання із застосуванням відповідних комп'ютерних технологій.

Фазовий рентгеноструктурний аналіз продуктів корозії проводився в  $Co_{K\alpha}$  випромінюванні. Фазовий склад визначався методом порівняння значень міжплощинних відстаней з табличними аналогічними значеннями елементів і

з'єднань. Кількісне співвідношення між фазами визначалося порівнянням інтегральних інтенсивностей їхніх дифракційних ліній.

Якісний мікрорентгеноспектральний аналіз проводився за довжинами хвиль рентгенівського випромінювання з допомогою Si-Li детектора "Link".

Загальна корозія металів визначалася методом малоциклової вольтамперометрії, локальна – згідно із спеціально розробленими методиками НДФХІ (м. Москва); кількісна оцінка корозійної стійкості – потенціодинамічним методом кольорових індикаторів.

Швидкість корозії встановлювалася прямим методом (профілографуванням) і експрес-методом (вимірюванням поляризаційного опору і потенціалу корозії).

Випробування на сульфідне розтріскування проводилося згідно з методикою стандарту NACE TM-01-77.

При розробці математичних моделей розрахунку і чисельного прогнозування корозійної тривкості і в'язкого руйнування використовувалися методи кореляційного, дисперсійного і регресійного аналізу.

Вміст водню в сталевих зразках визначався методом вакуум-плавки на хроматографічній установці VH-6 фірми "Геркус" (Німеччина).

Для визначення залежності між твердістю і швидкістю охолодження металу зони термічного впливу (ЗТВ) використовувалася методика, в основу якої покладене зварювання клиновидної проби.

**Наукова новизна одержаних результатів.** За результатами виконаних теоретичних і експериментальних досліджень розроблений єдиний підхід для розв'язання важливої науково-технічної проблеми з підвищення експлуатаційної надійності і довговічності промислових трубопроводів, які працюють в умовах впливу активних корозійних продуктів при температурах навколишнього середовища до  $-60$  °C. В рамках розробки цієї концепції отримані такі наукові результати:

а) вивчені природа і механізм вуглекислотної корозії трубних сталей нафтогазового призначення в широкому інтервалі зміни температур, тисків і концентрації  $O_2$ ,  $CO_2$  і  $H_2S$ , що дозволило по-новому оцінити вплив цих компонентів на її кінетику і вперше сформулювати науково обгрунтовані принципи підвищення корозійної стійкості трубних сталей, експлуатованих в агресивних середовищах;

б) вперше встановлено, що висока стійкість проти загальної і пітингової корозії, а також СКРН низьколегованих сталей і їхніх зварних з'єднань досягається шляхом економного модифікування мікродомішками, які сприяють глибоким структурно-фазовим перетворенням, гальмуючи процеси корозійних пошкоджень; науково обгрунтовано вибір оптимального вмісту модифікаторів;

запропоновані математичні моделі чисельного прогнозування основних параметрів корозійних процесів зварних з'єднань і основного металу, що експлуатуються в  $CO_2$ - і  $H_2S$ -вмісних середовищах під напруженням, які можуть використовуватися для інженерних розрахунків та прогнозних оцінок експлуатаційного ресурсу зварних металоконструкцій нафтогазових об'єктів;

в) розроблена математична модель опору матеріалу нафтогазопроводів утворенню тріщин, спричинених статичною водневою втомою, в основу якої

покладений механізм водневого окрихчування металу, що контактує з сірководневмісним середовищем. Зазначена модель враховує особливості структури сталі і вміст розчиненого в ній водню, що дозволяє прогнозувати надійність і працездатність трубопровідних конструкцій, експлуатованих в агресивних середовищах нафтогазових родовищ;

г) вперше розроблені науково обґрунтовані практичні рекомендації з підвищення технологічної міцності промислових трубопроводів, що полягають у виборі оптимальної технології зварювання з використанням термодинамічних діаграм сталей, на які нанесені криві охолодження. Такий підхід гарантує отримання потрібних механічних і службових властивостей зварних з'єднань без утворення холодних тріщин при низьких температурах (до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ );

д) на основі комплексних механічних, корозійних і металографічних досліджень встановлені оптимальні концентрації домішок-модифікаторів, при введенні яких у низьколеговану сталь і зварний шов значно зростають характеристики в'язкості руйнування і показники крихкої міцності і тріщиностійкості металу;

е) вперше виявлена контролююча роль неметалевих включень (оксидів і оксисульфідів) глобулярної форми у процесі крихкого руйнування холодостійкої сталі, економнолегованої Ni, Mo, V, PЗЕ, ЛЗЕ і Zr, що сприяють подрібненню мікроструктури, при цьому з введенням PЗЕ, ЛЗЕ і Zr, окрім того, подрібнюються частки другої фази. Встановлено, що неметалеві включення є джерелами зародження субмікротріщин на межах зерен і обмежують можливість підвищення запасу в'язкості металу; розроблені нові підходи до формування і вибору елементів-модифікаторів, які ґрунтуються на використанні їхнього впливу на подрібнення структурних складових металу, очищення їхніх меж, глобуляризації сульфідних з'єднань Fe і Mn, зниження кількості неметалевих включень при одночасному збільшенні їхньої дисперсності і рівномірності розподілу в структурі S, P, Mn і Si. Вказані підходи розвивають металургійний принцип створення трубних сталей і їхніх зварних з'єднань з високими корозійно- і холодостійкими властивостями;

є) сформульована основна концепція створення універсальних електродів з поліпшеними зварювально-технологічними властивостями, призначених для виконання корневих швів трубопроводів у монтажних умовах, в основу якої покладені принципи вибору оптимального вмісту і співвідношення основних газшлакоутворюючих компонентів ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ) і феросплавів (FeMn, FeSi, FeTi) для отримання високих експлуатаційних характеристик електродів і якісного формування шва при зварюванні у різних просторових положеннях і змінному монтажному зазорі (до 7 мм), особливо в умовах низьких температур (до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ); розроблені електрод марки АНО-ТМ, а також технологія зварювання і ремонту з його використанням монтажних стиків неповоротних трубопроводів, які забезпечують формування зворотного валика при зварюванні кореня шва в стельовому положенні без наступного підварювання зсередини труби. Електроди атестовані Міжнародною страховою компанією Ллойда, Морським Регістром РФ і Міжнародним науково-технічним центром сертифікації «СЕПРОЗ». Організовано їхнє виробництво і застосування при монтажному зварюванні і ремонті

неповоротних стиків трубопроводів нафтогазових підприємств ВАТ «Нижневартовскнефтегаз», ВАТ «Сибнефтегазпереработка» та ін. Економічний ефект від впровадження нових електродів перевищив 4 млн. руб. (у цінах на 1999р.);

ж) розроблені нові марки вуглецевої (сталь 20А) і низьколегованої (08ХМЧА) сталей для виготовлення нафтогазопровідних труб з підвищеними корозійними і холодостійкими властивостями, які успішно пройшли дослідно-промислові випробування на нафтових родовищах ВАТ «Нижневартовскнефтегаз» і рекомендовані до впровадження. Організоване їхнє дослідно-промислове виробництво на основних заводах-виготовлювачах трубної продукції нафтогазового призначення.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати досліджень і запропонованих рішень стали науковою основою створення ефективних технологічних процесів і розробки хімічних складів прогресивних сталей для виготовлення труб, що характеризуються високими холодостійкими і корозійними властивостями, для експлуатації у суворих кліматичних і природно-геологічних умовах.

Впровадження труб з високими корозійними і холодостійкими властивостями для монтажу нафтопроводів дозволило підвищити надійність і довговічність, скоротити число поривів трубопроводів, знизити витрати на їхній поточний капітальний ремонт, значно поліпшити екологічний стан в районах спорудження нафтогазопроводів, водогонів, трубопроводів газліфтних систем і компресорних станцій.

Економічний ефект від застосування труб з підвищеною корозійною тривкістю у ВАТ «Нижневартовскнефтегаз» і його дочірніх підприємствах складає (у тис. руб. на 1 км трубопроводу): при газліфтному видобутку нафти – 319,6 (Ø114 мм); 665,0 (Ø219 мм); 1509,3 (Ø420 мм); при механізованій експлуатації свердловин – 298,7 (Ø114 мм); 517,1 (Ø219 мм); 1120,5 (Ø420 мм), що досягнуто за рахунок збільшення терміну служби нафтопроводів та інших металоконструкцій з 4...5 до 10...15 років у порівнянні з аналогічними конструкціями, виготовленими з труб з низькими корозійними і в'язкими характеристиками.

Рекомендації з оптимізації хімічного складу трубних сталей підвищеної корозійної тривкості й тріщиностійкості використовуються в металургійних і технологічних відділах заводів-виробників трубного прокату: Синарського трубного, Челябінського трубопрокатного, Северського трубного, Волзького трубного і Вихаровського трубного заводів, а також Таганрозького металургійного комбінату.

Результати досліджень, викладені в дисертації, знайшли місце в навчальних курсах «Матеріалознавство», «Технологія конструкційних матеріалів», «Спорудження і ремонт нафтогазопроводів», що читаються в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу, Нижньовартовській філії Тюменського державного нафтогазового університету і Миколаївському державному аграрному університеті; у лабораторному практикумі; курсовому і дипломному проектуванні; у науково-дослідній роботі студентів спеціальностей



«проектування та спорудження нафтогазопроводів і сховищ» і «експлуатація та ремонт нафтогазопроводів і сховищ».

Рекомендації автора впроваджені в галузеві нормативні документи, що використовуються ЗАТ «НижневартовскНИПИнефть» при проектуванні промислових баз і нафтогазових об'єктів, зокрема, кушових і дотискних насосних станцій, пунктів підготовки нафти, нафтозбірних мереж та ін. при облаштуванні і реконструкції нафтових родовищ. Викладені в дисертації результати покладені в основу розробленої за участю автора науково-технічної концепції розвитку трубопровідного транспорту Самотлорського родовища (у рамках Програми реконструкції Самотлорського родовища).

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення, що складають сутність дисертації, були вирішені автором самостійно [14, 15, 17, 18, 21, 26, 32, 33, 35, 38]. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачем, зокрема: досліджені особливості електрохімічної корозії і механізм руйнування зварних трубопроводів у корозійно-активному середовищі [1, 2, 36, 37]; проаналізовані різні варіанти технологічних процесів протикорозійного захисту труб [1, 2]; аналітично досліджена довговічність трубних покриттів і розроблені математична модель прогнозування їхнього руйнування, а також матеріали для них [1, 2]; визначений вплив водню на механізм сульфідного корозійного розтріскування під напруженням і статичну (циклічну) водневу утому сталей промислових трубопроводів при низьких температурах [1, 2, 11, 27]; встановлений механізм локальної (пітингової) корозії [12, 15, 34] і запропонована формула для інженерного розрахунку і прогнозування ресурсу надійності і працездатності експлуатованих і споруджуваних зварних трубопроводів [2, 13, 39]; розроблені практичні рекомендації з підвищення технологічної міцності трубних сталей, їхньої корозійної тріщиностійкості [2, 24, 27, 37, 40, 41, 49, 51, 52].

Автор брав участь в удосконаленні хімічного складу трубних сталей 20А і 08ХМЧА [1, 2, 24], а також їхніх зварних з'єднань [7, 13, 16, 19, 21, 22, 30, 31, 42, 43]; визначенні впливу модифікуючих мікродомішок РЗЕ і ЛЗЕ на механічні властивості, тріщино- і корозійну тривкість [1, 2, 19, 20, 28, 29, 45, 50]; у розробці електрода АНО-ТМ [1, 2, 4-6, 8, 9, 25, 44-47]; його впровадженні при спорудженні та ремонті промислових трубопроводів [1, 2, 25, 48].

**Апробація результатів дисертації.** Головні положення і результати дисертаційної роботи були повідомлені на: міжнародній науково-технічній конференції «Нафта і газ Західного Сибіру» (м.Тюмень, 1996 р.); регіональній науково-технічній конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (м. Тюмень, 1997 р.); технічних радах ВАТ «Нижневартовскнефтегаз» (1995 – 1999 рр.) і ЗАТ «НижневартовскНИПИнефть» (1998 р.); науково-технічному семінарі «Підвищення надійності нафтозбірних мереж» (м. Нижньовартовськ, 1999 р.); науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу механічного факультету МДАУ (1991-2003 рр.); загальних зборах Академії інженерних наук України (м. Дніпропетровськ, 2000 р.); розширеному семінарі кафедри «Спорудження та ремонт газонафтопроводів і газонафтоховищ» ІФНТУНГ (2001, 2003 рр.); VI-й Міжнародній конференції «КОРОЗІЯ – 2002» (м. Львів, 2002 р.);

III-й Міжнародній промисловій конференції “Ефективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціалу в сучасних умовах” (м. Київ - Славське, 2003 р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертації видано 3 монографії (у співавторстві), опубліковано 75 робіт, у тому числі 40 статей у наукових журналах і збірниках наукових праць, 9 публікацій у матеріалах і тезах конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури з 250 найменувань, 3 додатків, викладена на 430 сторінках і містить 142 рисунки і 31 таблицю.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтована актуальність проблеми пошуку шляхів проти-корозійного захисту нафтопроводів, експлуатованих в умовах високоагресивних середовищ і низьких температур довкілля. Наведені: мета роботи, задачі і методи досліджень, наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, а також перелік місць апробації результатів досліджень.

Наведений у **першому розділі** огляд літературних даних свідчить, що основними

причинами руйнувань трубопроводів є: дефекти зварних з’єднань, вплив низьких температур навколишнього повітря, активний вплив на зародження мікротріщин мікрофлори, зокрема, сульфатвідновлювальних бактерій (СВБ), водневе окрихчування зони термічного впливу (ЗТВ) зварного з’єднання, а також нерівномірне осідання основи (грунту) трубопроводів та ін.

Для оцінки аварійності трубопроводів прийнятий показник – питома частота поривів (шт/км-рік), який при довжині діючих трубопровідних систем нафтозбору ВАТ “Нижневартовскнефтегаз” 2231,7 км досягає 0,793 шт/км-рік.

Показано, що основною причиною аварійності трубопроводів Самотлорського родовища є локальна (пітингова) корозія стінок труби і зварного з’єднання, спричинена високою обводненістю нафтових шарів. Проаналізована ефективність введення в експлуатацію труб із внутрішнім ізоляційним покриттям. Доведено, що зменшення аварійності можна досягти і шляхом зміни способу видобутку продукції, зокрема переведенням свердловин газліфтного фонду на механізований видобуток нафти, а також введенням в експлуатацію труб з підвищеною товщиною стінки.

На підставі аналізу фактичних даних визначений передбачуваний безаварійний термін експлуатації трубопроводів системи нафтозбору, виготовлених із сталевих труб, у залежності від їхньої корозійної стійкості. Для труб з підвищеними антикорозійними властивостями і збільшеною товщиною стінки при механізованому способі видобутку він не перевищує 15 років, для інших - цей показник є значно меншим, тому принципово важливого значення набувають теоретичні дослідження з цієї проблеми і наукова обґрунтованість прийнятих технічних рішень.

Показано, що на працездатність і надійність промислових трубопроводів із сталей підвищеної і високої міцності, особливо при експлуатації в умовах низьких

температур (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ), впливають холодні тріщини, які утворюються, як правило, в біляшовній зоні зварних з'єднань. При зварюванні таких трубних сталей імовірність виникнення холодних тріщин з'являється, коли швидкість охолодження  $W^{600}_{500}$  перевищує  $12...30^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , що є характерним для ручного дугового зварювання покритими електродами в умовах низьких температур повітря. При цьому холодні тріщини спостерігаються, незважаючи на відсутність гартівних структур у зварних з'єднаннях. Можливість утворення тріщин підвищується в зв'язку зі збільшенням залишкових напружень і кількості розчиненого в металі водню. Встановлено, що головними причинами руйнування промислових трубопроводів Самотлорського родовища є низька корозійна тривкість матеріалу труб при контакті з корозійно-активними продуктами й утворення холодних тріщин у біляшовній зоні зварного з'єднання при мінусових температурах навколишнього середовища (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ).

Проблема підвищення надійності на стадії експлуатації діючих промислових трубопроводів вимагає системного підходу і передбачає проведення комплексу заходів. Проте для реалізації на практиці організаційно-технічних заходів з підвищення надійності промислових трубопроводів необхідно знати закономірності й особливості зміни тріщиностійкості трубних сталей та зварних з'єднань промислових трубопроводів в залежності від основних технологічних факторів системи транспорту продуктів. Це вимагає проведення комплексних досліджень з визначення:

- причин і механізму локальної (пітингової і канавкової) корозії промислових нафтопроводів; впливу водню на механізм СКРН і водневого розшарування трубних сталей;
- причин зниження корозійної стійкості нафтопроводів з урахуванням впливу сульфатвідновлювальних бактерій на процес корозії труб;
- природи і механізму вуглекислотної корозії в широкому інтервалі зміни температур, тисків і концентрацій  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{S}$ ;
- показників тривкості проти СКРН і ВІР трубних сталей нафтового сортаменту вітчизняного і зарубіжного виробництва;
- характеристик опору корозії, міцнісних властивостей і в'язкості руйнування основного металу і зварних з'єднань при легуванні їх РЗЕ і ЛЗЕ;
- впливу нікелю, ванадію і молибдену на опірність крихкому руйнуванню;
- оптимального хімічного складу холодостійкої низьколегованої сталі і зварних швів з розробкою методів, що забезпечують їхню високу корозійну і тріщинотривкість під час експлуатації в агресивних середовищах під напруженням;
- ефективності розроблених практичних рекомендацій для підвищення холодостійкості і технологічної міцності промислових трубопроводів, споруджуваних і експлуатованих в умовах низьких температур довкілля;
- ефективності нових марок сталей і електродів, їх дослідно-промислові випробування і впровадження при спорудженні та ремонті нафтопроводів.

**Другий розділ** присвячений теоретичному дослідженню і експериментальній розробці методів підвищення корозійної стійкості промислових трубопроводів. Отримані результати комплексних досліджень дозволили розробити науково обгрунтовані рекомендації з хімічного складу трубних сталей, зварювальних

електродів і технології ручного дугового зварювання у суворих природно - кліматичних умовах. Сформульовані основні положення технологічних і металургійних методів при спорудженні і ремонті нафтогазопроводів, оптимізовано склад основного і зварювального матеріалів трубопроводів, установлені причини і механізм локальної (пітингової і канавкової) корозії, визначено вплив різних її видів на терміни служби промислових трубопроводів. Отримані аналітичні залежності для прогнозування величин їхніх основних експлуатаційних показників.

Показано, що причиною зниження корозійної стійкості нафтопроводів Самоглоського родовища є утворення приповерхневих мікротріщин, зумовлених фазовими напруженнями внаслідок локального розігріву поверхневих об'ємів металу до температур аустенізації під впливом дробеструминної обробки поверхонь труб. З метою запобігання значних деформацій і розігрівів приповерхневих шарів удосконалена технологія дробеструминної обробки поверхонь труб, що дозволило ефективно захистити їх від пітингової і канавкової корозії.

Дослідженнями причин і механізму пітингової корозії нафтогазопроводів установлено, що активація локальної електрохімічної корозії трубних сталей та їхніх зварних з'єднань зумовлена присутністю СВБ і локалізується в їхніх застійних ділянках із зародженням мікротріщин. Це призводить до сульфатного розтріскування стінки труби або ЗТВ зварних з'єднань аж до руйнування трубопровідної конструкції. Досліджено також, що зазначена корозія стінки труби супроводжується наводнюванням металу навколо зародків виразок, що спричинює його окрихчування, яке полегшує зародження і поширення тріщин. Найбільш інтенсивно цей процес відбувається по нижній твірній труби. Між утвореною свіжою металевою поверхнею і вкритою продуктами корозії виникає електрохімічна реакція, внаслідок чого утворюється канавка. Цей процес може інтенсифікуватися за рахунок механічного зрізання металу труби в околі канавки частками домішок у вигляді піску і продуктів корозії, які осипалися. Стоншення труби по нижній твірній призводить до пластичної деформації металу, що підтверджується відповідними дослідженнями шліфів, виготовлених перпендикулярно до площини канавки. Одночасно інтенсифікується процес наводнювання деформованого металу канавки. На подовжених сульфідах утворюються характерні тріщини водневого розтріскування. В подальшому вони об'єднуються і під дією напруження переростають у тріщини, які зумовлюють розшарування металу стінки труби і утворення канавок.

За результатами досліджень сформульовані науково обґрунтовані пропозиції щодо запобігання цих видів корозійного ушкодження трубопроводів. Їхнє впровадження зумовило підвищення надійності споруджуваних і експлуатованих металоконструкцій нафтогазових об'єктів.

За даними хімічного, локального мікрорентгеноспектрального аналізів зразків, виготовлених з аварійних труб, виявлено два типи продуктів корозії, що відрізняються за фазовим складом, структурою і ступенем адгезії з поверхнею металу труб, а отже, за впливом на інтенсивність виразкової корозії. Відмінності між ними пов'язані з різною концентрацією іонів кальцію в транспортованому середовищі. Таким чином, на поверхні труби утворюються багаточарові продукти

корозії, представлені шарами фаз, що чергуються,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeCO}_3$ ,  $\text{FeS}$ ,  $\text{CaCO}_3$  і їхнім сполученням. Виявлений механізм утворення продуктів корозійної пошкоджуваності нафтопроводів показав, що одним з перспективних напрямків зниження корозійної активності транспортованого середовища є видалення з нього іонів кальцію за допомогою спеціальних хімічних реагентів (бутилцелюзолу і етилацетату). Це враховано при розробці методів підвищення корозійної стійкості труб, які полягають у поліпшенні їхніх механічних і корозійних властивостей за рахунок сприятливої зміни хімічного складу сталевих штрипсів, зокрема, ошадливого їхнього модифікування корисними домішками.

Для визначення і розробки способів підвищення корозійної тривкості нафтогазопроводів було досліджено 10 марок вуглецевих і низьколегованих трубних сталей виробництва 6-ти заводів. При оцінці тривкості сталей проти загальної і пітингової корозії за методом НДФХІ ім. Карпова (м. Москва) застосовували вольтамперометрію з малим числом циклів, використовуючи вуглекислотну модель пластової води, гальваностатичну і потенціодинамічну поляризацію, а також хімічний метод кольорових індикаторів. Аналіз результатів досліджень показав, що термічна обробка (ТО) сталі 20 підсилює її корозійну тривкість і не впливає на сталь 09Г2С. Легування сталі 20 церієм також підвищує її тривкість проти корозії, як і проведення ТО, а введення до неї хрому (до 1%) є неефективним. Сталь марки 08Х18Н10Т-Ш відрізняється високою тривкістю проти загальної корозії і не піддається пітинговій корозії в розчинах з великим вмістом хлору. Встановлено, що легування трубних сталей РЗЕ і ЛЗЕ є надзвичайно перспективним для підвищення їхньої корозійної тривкості.

Визначені оптимальні концентрації мікродомішок РЗЕ і ЛЗЕ, введення яких у сталь істотно підвищує корозійні характеристики металоконструкцій нафтогазових об'єктів. У дослідях використовували наступні мікродомішки: рідкісноземельні елементи – церій та ітрій; лужноземельні – барій і кальцій. Окрім РЗЕ і ЛЗЕ для порівняння додавали також цирконій. Домішки-модифікатори знаходилися в порошокподібному металевому вигляді. Для експериментів зразки одержували плавленням в індукційній високочастотній печі сталі марки 17Г1С (як найбільш широко розповсюдженої при будівництві нафтогазових та інших відповідальних металоконструкцій на нафтових родовищах), у процесі якого в розплавлену ванну додавали церій, ітрій, барій, кальцій і цирконій.

Першу серію зразків виготовляли з отриманих сталевих заготовок для випробувань на швидкість корозії, другу серію зразків стандартних розмірів – на корозійне сульфідне розтріскування. Через велике число змінних зовнішніх факторів і можливий їхній взаємовплив застосовувався метод багатфакторного планування експерименту.

Встановлено, що різке гальмування корозійного процесу спостерігається при легуванні металу церієм, ітрієм, барієм і кальцієм, у меншій мірі – цирконієм. Це підтверджено результатами проведених випробувань як в автоклаві (реальних середовищах), так і за методикою NACE. Результати комплексних досліджень дають можливість припустити, що головною причиною поліпшення корозійних характеристик випробуваних сталей є позитивні зміни мікроструктури металу,

легованого Се, Y, Са і Ва, що якісно і кількісно підтверджено даними фрактографічних вивчень зламів зразків, які зруйнувалися як у корозійному середовищі, так і на повітрі. Встановлено, що найвищий позитивний ефект від легування модифікуючими домішками спостерігається при введенні їх у низьколеговану сталь у кількості (%): церій 0,01...0,03; ітрій 0,01...0,025; барій 0,007...0,015; кальцій 0,001...0,0025; цирконій 0,02...0,04.

Результати експериментів з визначення корозійної тривкості низьколегованої сталі оброблялися методами кореляційного, дисперсійного і регресійного аналізу, що дозволило створити моделі для чисельного прогнозування корозійних процесів. Розроблені математичні моделі є зручними для інженерних розрахунків і прогнозних оцінок. Результати обчислень за цими моделями підтверджують підвищення терміну служби нафтогазопроводів у 2...3 рази, тобто до 10...15 років.

Відомо, що однією з важливих характеристик зварних з'єднань трубопроводів є стійкість до сульфідного розтріскування. Так, у сірководневмісних середовищах небезпечні фазово-структурні зміни металу (при зварюванні низьколегованих сталей, наприклад, 17Г1С, 09Г2С та ін.) супроводжуються утворенням структур гартівного типу, схильних до сульфідного розтріскування. Якщо метал знаходиться в пасивному чи гранично-пасивному стані, то особливо небезпечними є залишкові зварювальні напруження, які навіть без зовнішнього навантаження можуть спричинити розтріскування металу. Цей вид руйнування пов'язаний з тим, що сірководень, який міститься у водонафтовій суміші, дисоціює на стінках трубопроводів під плівкою вологи і збагачує метал воднем. Воднева крихкість відіграє важливу роль у процесі розтріскування під дією сульфідної корозії.

Результати випробувань показали, що легування металу шва мікродомішками (Се, Y, Са, Ва і Zr) сприятливо впливає на його стійкість проти сульфідного розтріскування (рис.1). За ступенем впливу мікродомішок на цей вид корозійного руйнування металу вони утворюють наступний ряд (у міру збільшення стійкості проти корозійного сульфідного розтріскування): Zr, Са, Ва, Y і Се. Привертає увагу те, що в такій же послідовності розташовані елементи за ступенем впливу на загальну корозію. Така аналогія не є випадковою і свідчить про те, що вищезгадані домішки сприяють глибоким структурно-фазовим перетворенням у сталях, які гальмують процеси корозійних ушкоджень. Зазначені перетворення полягають у подрібненні зерен аустеніту і внутрішньозеренних бейнітних пакетів, у зникненні або зменшенні зони доєвтектоїдного фериту, зниженні кількості неметалевих включень при одночасному збільшенні їхньої дисперсності, причому вони набувають глобулярної форми, а також у зменшенні рівня сегрегаційної неоднорідності S, P і Si.

Отримані результати дозволили встановити, що позитивний ефект від мікролегування Се, Y, Са, Ва і Zr спостерігається стабільно при введенні їх у метал зварних швів у кількостях (%): церію (0,01...0,02), ітрію (0,015...0,022), барію (0,0014...0,0025), кальцію (0,0012...0,0020) і цирконію (0,031...0,044). Подальше збільшення їхнього вмісту зумовлює засмічення металу великими частками силікатів Се, Y, Са і Ва і нітридів цирконію і є недоцільним.

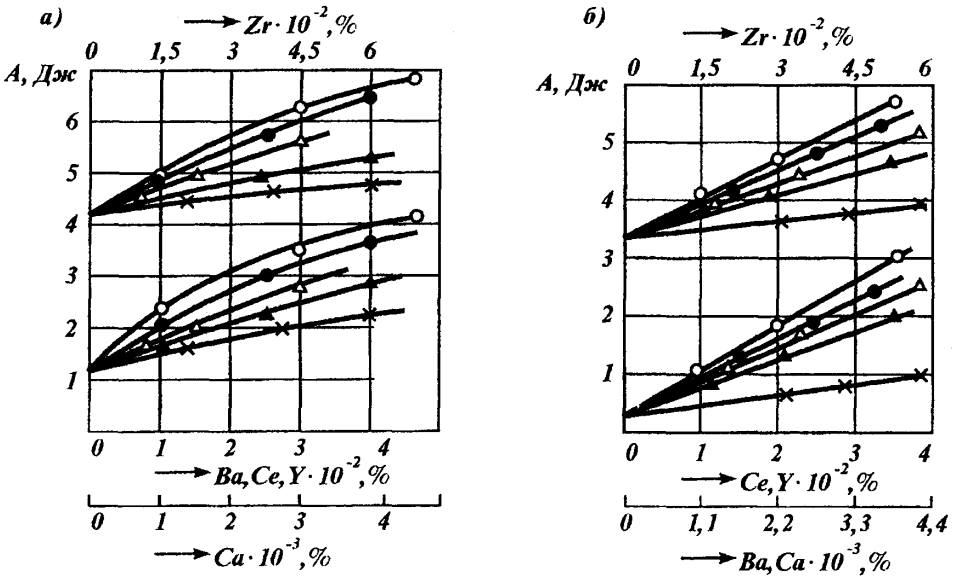


Рис.1. Робота руйнування сталевих зразків (а) і зварних швів (б), легованих мікродомішками (нижня область – руйнування в середовищі NACE; верхня – на повітрі):  $\square$  – Ce,  $\bullet$  – Y,  $\square$  – Ba,  $\square$  – Ca,  $\times$  – Zr

Наведені дані досліджень, які підтверджують виявлені раніше тенденції впливу концентрації NaCl в електроліті, парціального тиску  $CO_2$  і температури на корозійне поведіння металу. Отримані залежності впливу цих факторів на корозійну тривкість металу, легованого в досить широкому діапазоні мікродомішками – Ce, Y, Ca, Ba і Zr. Встановлені кількісні показники такого взаємного впливу можуть бути основою при прогнозуванні корозійного поведіння з'єднань, а також визначенні раціональної області застосування їх в залежності від умов і режимів експлуатації.

Результати комплексних випробувань тріщиностійкості зварних з'єднань, як і для трубної сталі, оброблялися методами кореляційного, дисперсійного і регресійного аналізу і були використані при створенні моделей чисельного передбачення корозійних явищ. Регресійні моделі синтезовані в середовищі матричних рівнянь, а для оцінки невідомих параметрів регресії застосовували метод найменших квадратів. Адекватність моделей перевірялася за критерієм Фішера з довірчою імовірністю понад 95%. Розрахунки велися на ЕОМ типу IBM PC/AT<sub>1</sub> 386 за програмою STATGRAPHICS, версія 2.1, фірми STSC (США).

Аналіз отриманих аналітичних залежностей дозволяє стверджувати, що технічно ефективним і економічно доцільним є метод підвищення корозійної тривкості зварних металоконструкцій нафтогазових об'єктів мікролегуванням елементами-модифікаторами: PЗЕ, ЛЗЕ і Zr.

На підставі отриманих даних з дослідження режиму течії багатофазових потоків запропонована низка конструкторсько-технологічних заходів, що забезпечують оптимальні гідродинамічні режими експлуатації промислових трубопроводів з складним профілем траси, які, в свою чергу, створюють підвищений опір корозійним ушкодженням їхніх внутрішніх поверхонь.

За результатами комплексних аналітико-експериментальних досліджень, що наведені в **третьому розділі**, розроблена концепція впливу водню на механізм СКРН сталей промислових трубопроводів, яка добре узгоджується з даними їх експлуатації на нафтогазових родовищах.

Створена математична модель опору нафтогазопроводів утворенню тріщин, спричинених статичною водневою втомою, в основу якої покладений механізм водневого окрихчування металу, що контактує з сірководневмісним середовищем. При цьому враховані особливості структури сталі й вміст розчиненого в ній водню, що дозволяє прогнозувати надійність і працездатність споруджуваних трубопровідних конструкцій, які експлуатуватимуться в корозійно-активних середовищах.

Розроблені науково обгрунтовані практичні рекомендації з підвищення технологічної міцності промислових трубопроводів, що полягають у виборі оптимального технологічного варіанту зварювання з використанням термодинамічних діаграм зварюваних сталей, на які нанесені криві охолодження з позначенням забезпечуваної при цьому твердості (рис.2). Такий підхід гарантує отримання потрібних механічних і службових властивостей зварних з'єднань без утворення холодних тріщин в широкому інтервалі температур (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ).

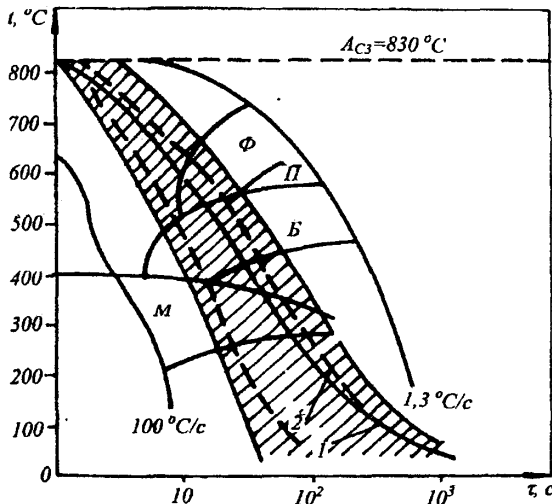


Рис.2. Узагальнена діаграма сталі 17ГІС для визначення оптимальних умов зварювання: 1- критична крива при низьких температурах; 2- те саме у звичайних умовах; заштрихована ділянка – область отримання рівномірних і холодостійких з'єднань



Встановлено, що зниження вмісту водню дозволяє істотно збільшити інтервал оптимальних режимів зварювання для одержання зварних з'єднань без холодних тріщин. Наприклад, використання низьководневих електродів з покриттям основного типу АНО-ТМ для сталі 17Г1С допускає зварювання при низьких температурах трубопроводу з товщиною стінки до 12 мм без попереднього підігріву. Режим останнього повинен вибиратися, виходячи з критичної тривалості охолодження металу шва в інтервалі температур 300...100 °С, вище якої тріщини не утворюються. Ці оптимальні умови дозволяють забезпечити тріщиностійкість швів при зварюванні в зимовий період із застосуванням низьководневих електродів ( $N_{\text{диф}} < 3 \text{ см}^3/100\text{г}$ ).

На основі системного вивчення особливостей зварюваності низьколегованих трубних сталей при низьких температурах повітря і багаторічного досвіду впровадження, накопиченого при спорудженні та ремонті нафтопроводів в умовах Самотлорського родовища, сформульовані основні положення технології їхнього зварювання, яка знижує водневу крихкість і підвищує тріщиностійкість з'єднань:

- зниження рівня дифузійного водню в металі різними технологічними способами;
- зменшення швидкості охолодження, що дозволяє одержати більш пластичний і менш схильний до водневої крихкості метал шва і ЗТВ, а також підсилити ефект видалення водню з металу в процесі охолодження;
- підвищення температури попереднього, а в деяких випадках і супутнього підігріву (до 100...200 °С), що знижує водневу крихкість, зумовлену дифузійним і молекулярним воднем;
- проведення «відпочинку» з'єднань безпосередньо після зварювання при підвищеній температурі, у процесі якого виділяється дифузійний водень;
- режим зварювання варто вибирати з урахуванням того, що на кожних 10 °С підвищення температури повітря варто зменшувати погонну енергію зварювання на 3...5% за рахунок зниження величини зварювального струму. Так, зварювання низьколегованих сталей класу С52/40, С60/45, С70/50 доцільно виконувати фтористокальцієвими електродами з погонною енергією 1,3...2,5 МДж/м;
- застосування для виготовлення труб у північному виконанні холодостійких сталей, що характеризуються підвищеною стійкістю до водневого окрихчування при мінусових температурах повітря.

Конкретні відомості про технологію зварювання при низьких температурах викладені в розроблених автором спільно з фахівцями ЗАТ «НижневартовскНИПИнефть» рекомендаціях з виконання зварювально-монтажних робіт при спорудженні та ремонті зварних металоконструкцій нафтогазових об'єктів, призначених для роботи в складних природно - кліматичних умовах.

Отримані та викладені у **четвертому розділі** результати дозволяють стверджувати, що в досліджуваних сталевих зразках рівень технологічної міцності визначається не величиною зерен, а дисперсністю часток другої фази – неметалевих включень. Крім того, коефіцієнт в'язкості сталі  $K_v = (R_{\text{МВ}}/\sigma_{0,2})$  також багато в чому залежить від розміру останніх. Здрібнювання структури призводить до збільшення

умовної границі текучості  $\sigma_{0,2}$ , але при сталому рівні напруження мікровідколу  $R_{MB}$  це неминуче супроводжується падінням запасу в'язкості, причому тим більшим, чим вищим є темп зростання границі текучості. Таким чином, істотного підвищення технологічної міцності низьколегованої сталі можна досягти реалізацією принципу, що об'єднує необхідну і достатню умови, а саме:

- а) максимальне здрібнювання зерна структури (необхідна умова);
- б) максимальна дисперсність неметалевих включень (достатня).

Для реалізації цього принципу на практиці низьколеговану сталь бажано ошадливо модифікувати такими елементами, як Се, Y, Са, Ва, Zr та ін., що подрібнюють не тільки структуру сталі, але й неметалеві включення.

Позитивний ефект, пов'язаний з присутністю в сталі Ni, Mo і V, у сутності виявився нереалізованим до кінця (досягнуте лише підвищення ударної в'язкості і характеристик в'язкого руйнування, тобто  $K_{Ic}$ ,  $\delta_c$ , KCV). Метал, який містить 1,5% Ni, 0,9% Mo і 0,06% V, у кожному конкретному випадку має менший коефіцієнт в'язкості (у температурному інтервалі  $-40...-60$  °C), ніж метал без цих елементів.

Використання моделі мікровідколу для аналізу структурної залежності опору крихкому руйнуванню металу дозволило виявити ефективний структурний параметр, що контролює процес крихкого руйнування. У даному випадку таким виявився розмір часток другої фази, тобто неметалевих включень. Тому використання як легуючих елементів Ni, Mo і V, які не впливають на дисперсність цих включень, не забезпечує підвищення технологічної міцності металу. Зростання рівня ударної в'язкості і характеристик в'язкого руйнування зі збільшенням вмісту Ni, Mo і V не відбиває дійсного запасу в'язкості металу і може бути пояснено зростанням границі текучості. При цьому встановлене зниження позитивного впливу нікелю на механічні властивості наплавленого металу. Для підвищення стійкості проти крихкого руйнування поряд з визначенням оптимального вмісту Ni, Mo і V необхідно правильно підібрати систему розкислення (зокрема, марганець, кремній, титан, алюміній та ін.). Істотне зростання технологічної міцності металу і зварного шва досягається застосуванням модифікаторів Се, Y, Са і Ва, що дозволяє цілком реалізувати їх металургійний і металографічний потенціал (рис.3).

Встановлена контролююча роль неметалевих включень (оксидів і оксисульфідів) глобулярної форми у процесі крихкого руйнування холодостійкої сталі, економнолегованої вказаними модифікаторами. Неметалеві включення є джерелами зародження субмікротріщин на границях зерен і обмежують, тим самим, можливість підвищення запасу в'язкості металу.

Показано, що легуючі мікродомішки церію, ітрію, барію і кальцію (нарізно) зумовлюють, окрім здрібнювання структури металу шва і ЗТВ, очищення границь зерен від неметалевих включень і сторонніх фаз, причому зникають сульфідні з'єднання Fe і Mn великої довжини; вони набувають глобулярної форми при одночасному зменшенні їхнього числа.

Отримані дані про залежність характеристик міцності і пластичності металу від структурних параметрів дозволяють визначити методи подальшого підвищення механічних властивостей низьколегованих холодостійких сталей, що полягають у

здрібнюванні елементів структури, здатних ініціювати зародження субмікродріщин. Як показали результати досліджень, оптимальне сполучення технологічної міцності і запасу в'язкості реалізується при відношенні величини зерна сталі до діаметра глобулярної частки другої фази, рівному 25 і більше, при одночасному максимальному їх диспергуванні. Ця вимога успішно виконується в досліджуваних сталевих зразках, модифікованих Ce, Y, Ba, Ca, і не витримується для сталей, що містять Ni, Mo і V.

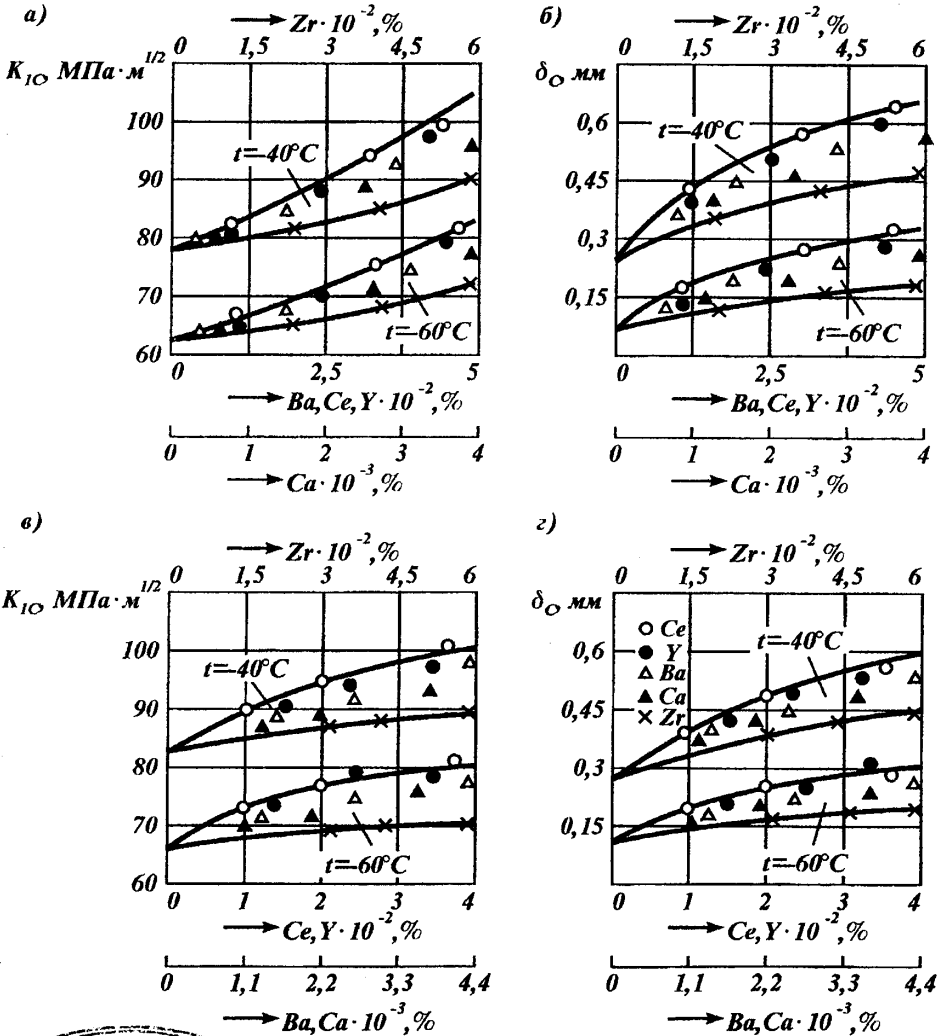
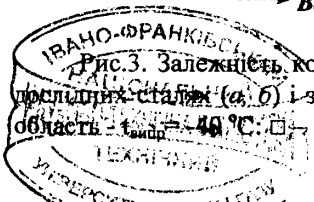


Рис.3. Залежність коефіцієнта  $K_{10}$  (а, в) і  $\delta_0$  (б, г) від вмісту мікродомішок у дослідних сталей (а, б) і зварних швах (в, г); нижня область —  $t_{\text{випр}} = -60^\circ\text{C}$ ; верхня область —  $t_{\text{випр}} = 40^\circ\text{C}$ ; ○ — Ce, ● — Y, □ — Ba, ◻ — Ca, × — Zr



Досліджено, що характер руйнування і топографія поверхні руйнування металу змінюються в широкому інтервалі температур, причому руйнування починається відколом від в'язких тріщин критичної довжини, які утворюються злиттям мікропорожнин у тілі феритних зерен. Запропонована схема зміни механізму руйнування металу одношарових швів, виконуваних електродами основного типу, в інтервалі температур крихко-в'язкого переходу. Зроблено висновок про те, що немає необхідності завжди прагнути до досягнення максимальних характеристик пластичності, достатньо сполучити високу в'язкість руйнування з в'язким механізмом руйнування шляхом злиття мікропорожнин.

Створені математичні моделі для чисельного прогнозування характеристик в'язкості металу трубних сталей та їхніх зварних з'єднань, експлуатованих в агресивних середовищах під напруженням, які можуть використовуватися для інженерних розрахунків і прогнозних оцінок тривкості проти крихкого руйнування металоконструкцій нафтогазових об'єктів, де у якості параметрів були прийняті:

$$X_1 = \% \text{ Ce}; X_2 = \% \text{ Y}; X_3 = \% \text{ Ca}; X_4 = \% \text{ Ba}; X_5 = \% \text{ Zr}.$$

Функціями відгуку були: критичний коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{IC}$ , МПа·м<sup>1/2</sup>; розкриття тріщини  $\delta_c$ , мм; діаметр аустенітного зерна основного металу  $d_0$ , мкм; діаметр рівноважних дендритів  $d$ , мкм; довжина  $l$ , мм і ширина  $h$ , мкм стовпчастих дендритів; швидкість росту тріщин  $V$ , мм/цикл.

Регресійні моделі синтезовані в середовищі матричних рівнянь, а для оцінки невідомих параметрів регресії застосовували метод найменших квадратів.

Загальний вигляд синтезованих регресійних моделей представлено матричним рівнянням

$$y = X\beta + \varepsilon,$$

де  $y = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_n)$  – вектор-стовпець значень, що спостерігаються, залежної змінної  $y$ ;

$\varepsilon = \text{col}(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$  – вектор-стовпець помилок;

$\beta = \text{col}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_s)$  – вектор-стовпець невідомих параметрів регресії;

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \dots & x_{s1} \\ x_{12} & x_{22} & \dots & x_{s2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{sn} \end{bmatrix},$$

де  $X$  – матриця експериментальних значень незалежних змінних,

$x_{ji}$  — значення  $j$ -ої незалежної змінної ( $j=1,2,\dots, s$ ) у  $i$ -му експерименті ( $i = 1,2,\dots, n$ ).

У тих випадках, коли функція регресії шукалася у вигляді полінома вище першого порядку від незалежних змінних, у матрицю  $X$  додавалися відповідні вектори-стовпці даних. Наприклад, якщо в модель включалися не тільки змінна  $x_j$ , але й її квадрат  $x_j^2$ , то в матрицю  $X$  додавався вектор-стовпець  $\text{col}(x_{j1}^2, x_{j2}^2, \dots, x_{jn}^2)$ . Для перевірки кореляції помилок  $\varepsilon_i$ , що входять у перевірку здійсненості припущень регресійного аналізу, обчислювалася статистика Дарбіна-Ватсона. Адекватність моделей перевірялася за критерієм Фішера з довірчою імовірністю вищою 95%.

Для зварного шва отримані наступні моделі:

1. Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень:

$$K_{IC} = 83,9 + 562,5 \cdot X_1 + 468,3 \cdot X_2 + 2764 \cdot X_3 + 3240 \cdot X_4 + 94,6 \cdot X_5.$$

2. Розкриття тріщини:

$$\delta_C = 0,323 + 7,56 \cdot X_1 + 7,67 \cdot X_2 + 52,3 \cdot X_3 + 47,5 \cdot X_4 + 1,82 \cdot X_5.$$

3. Довжина стовпчастих дендритів:

$$l = 4 - 63 \cdot X_1 - 56,6 \cdot X_2 - 391,5 \cdot X_3 - 336,7 \cdot X_4 - 13,8 \cdot X_5.$$

4. Діаметр рівноважних дендритів:

$$d = 40,3 - 1046,7 \cdot X_1 - 1001 \cdot X_2 - 8469 \cdot X_3 - 7411 \cdot X_4 - 436 \cdot X_5.$$

5. Ширина стовпчастих дендритів:

$$h = 37 - 532 \cdot X_1 - 452 \cdot X_2 - 3577 \cdot X_3 - 2979 \cdot X_4 - 160 \cdot X_5.$$

6. Діаметр аустенітного зерна:

$$d_{ш} = 310 - 5954 \cdot X_1 - 4795 \cdot X_2 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot X_3 - 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot X_4 - 1690 \cdot X_5.$$

7. Швидкість росту тріщини у зварних зразках різного легування при випробуваннях на утому в залежності від числа циклів  $N$ :

$$V_{\text{АНО-26}} = 0,18 + 8,5 \cdot 10^{-4} \cdot N^2; V_{\text{Zr}} = 0,18 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot N^2; V_{\text{Ca}} = 0,14 + 1 \cdot 10^{-4} \cdot N^2;$$

$$V_{\text{Ba}} = 0,08 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot N^2 + 3 \cdot 10^{-5} \cdot N^2; V_{\text{Y}} = 0,08 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot N^2;$$

$$V_{\text{Ce}} = 0,03 + 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot N^2 + 6 \cdot 10^{-6} \cdot N^2.$$

Для всіх регресій коефіцієнт детермінації  $k^2 \geq 0,9$  і множинний коефіцієнт кореляції  $k \geq 0,95$ .

Аналіз отриманих залежностей дозволяє зробити висновок, що технічно ефективним і економічно доцільним методом підвищення стійкості проти крихкого руйнування зварних металоконструкцій нафтогазових об'єктів є мікролегування зварного шва елементами-модифікаторами: ЩЗМ, ЛЗМ і Zr. Встановлені оптимальні концентрації цих елементів у низьколегованих сталях і зварних швах, при яких значно збільшуються характеристики опору крихкому руйнуванню та показники технологічної міцності і тріщиностійкості.

У **п'ятому розділі** наведені дані про розробку та впровадження трубних сталей з високими холодостійкими і корозійними властивостями і зварювальних електродів.

Автором разом з фахівцями ВАТ "Тюменская нефтяная компания—Сибирь", ВАТ "ВНИИТнефть" (м. Самара) і заводів-виробників трубної продукції були удосконалені хімічні склади сталей 20 і 08ХМ, що відтворено у розроблених технічних умовах: ТУ 14-162-12-95 (сталь 20А) і ТУ 14-162-14-96 (сталь 08ХМЧА).

За час експлуатації (понад 5 років) нафтопровідних труб з поліпшених сталей відмовлень через корозійні поразки не зареєстровано.

Аналіз узагальнених результатів з визначення хімічного складу, механічних і корозійних характеристик (тривкості до загальної корозії в трьох модельних середовищах і тривкості до водневого і сульфідного корозійного розтріскування під напруженням) труб з підвищеними корозійними властивостями показує:

1) труби підвищеної корозійної тривкості мають більш високі значення границь текучості і міцності у порівнянні із серійними трубами, що дозволяє віднести їх до більш високого класу міцності. Це повинно враховуватися при розробці конструкторсько-технічної документації на спорудження трубопроводів;

2) удосконалені за хімічним складом трубні сталі 20А і 08ХМЧА при температурі випробувань  $+20$  °С за значеннями ударної в'язкості на порядок

перевищують серійні, а при мінусових температурах – на два порядки, тобто проблема забезпечення холодостійкості трубних сталей вирішена;

3) по тривкості до загальної корозії в  $H_2S$ - і  $CO_2$ -вмістних середовищах труби підвищеної корозійної тривкості у порівнянні із серійними показали в 2...4 рази більшу тривкість. Швидкість загальної корозії нових труб не перевищує 0,5 мм/рік;

4) характеристики стійкості до СКРН і ВІР знаходяться на рівні імпорتنних труб. Найбільш важкі екологічні наслідки мають місце при руйнуванні по нижній твірній труби через СКРН, розроблені технології виготовлення нових марок трубних сталей дозволяють цілком запобігти цьому виду руйнування.

Статистика свідчить, що у вітчизняній практиці нафтовидобутку посилюється агресивність нафтопромислових середовищ, збільшується ступінь їхнього зараження СВБ. У світовій практиці відсутні розробки і, відповідно, труби, що мали б високу надійність у зазначених середовищах. Закордонні фірми виробляють або холодостійкі труби, або труби з високою тривкістю до СКРН. До того ж ці труби відносяться до розряду дорогих. Тому розроблені з участю автора корозійностійкі матеріали для труб нового покоління не мають аналогів у світовій практиці будівництва нафтопроводів.

Таким чином, позитивні результати дослідно-промислових випробувань труб з нових і удосконалених (за хімічним складом) сталевих штрипсів дозволили рекомендувати їх для впровадження на нафтогазових об'єктах ВАТ «Нижневартовскнефтегаз» та інших нафтових компаній. Багаторічний досвід експлуатації цих труб малого і середнього діаметрів (114...420 мм), які характеризуються високими корозійними властивостями, холодо- і тріщиностійкістю, показали велику надійність і повну відсутність поривів, спричинених корозією.

Отримані результати досліджень з розробки нових марок трубних сталей, а також аналіз технології виплавлення сталей і технічного стану устаткування для виробництва і термообробки труб на основних заводах-виготовлювачах трубної продукції сприяли розробці рекомендацій з удосконалення корозійнотривких трубних сталей, впровадження яких у виробництво істотно підвищило корозійні і холодостійкі характеристики трубного прокату.

Необхідна надійність, достатня міцність і тріщиностійкість монтажних стиків, а, отже, трубопроводу в цілому, залежать від якості кореневих швів. При цьому дуже важливим є формування зворотного валика, тобто посилення шва, особливо при зварюванні в стельовому положенні, оскільки у випадку провисання кореневого шва необхідне його підварювання зсередини труби. Окрім того, при спорудженні та ремонті трубопроводів доцільно використовувати для перших двох шарів шва більш "м'які" електроди з основним покриттям, ніж для шарів, що заповнюють обробку. Застосування таких електродів дозволяє одержувати корінь шва, менш схильний до крихких руйнувань і утворення тріщин.

Виявлені закономірності зміни і взаємозв'язку технологічних характеристик електродів з хімічним складом покриття і газошлаковою системою ванни дали змогу оптимізувати склад і підвищити їхню якість. Це гарантує одержання тріщиностійких

з'єднань нафтопроводів в трасових умовах.

Дослідження показали, що для формування зворотного валика при зварюванні труб у різних просторових положеннях, зокрема в стельовому, необхідне виконання двох умов: створення потужного газового потоку, що забезпечує подрібнювання крапель і їхнє перенесення у зварювальну ванну; одержання шлаку, який добре змочує краї стику і підтягує до нього рідкий метал, що є особливо важливим при зварюванні в стельовому положенні.

Експериментально встановлено, що необхідного сполучення зазначених властивостей електроди досягають при визначеному співвідношенні компонентів покриття, кількість яких знаходиться у певній залежності від фториду кальцію. Його кількість може змінюватися в межах від 6 до 8 % по масі. При цьому вміст мармуру складає 5,5... 6,0 частин  $\text{CaF}_2$ , рутилу 0,9...1,0 і польового шпату 1,25...1,35 частини  $\text{CaF}_2$ .

Зазначеним межам відповідає конкретний склад (табл.1) пропонованого покриття (розроблено разом з докт. техн. наук В.Д. Макаренком (Тюменський державний нафтогазовий університет) і канд. техн. наук В.М. Горпенюком (ІЕЗ ім. Е.О. Патона НАН України)).

Таблиця 1

Склад покриття розробленого електрода АНО-ТМ, % мас.

| Назва компонентів |                   |               |                  |                |      |            |            |                      |
|-------------------|-------------------|---------------|------------------|----------------|------|------------|------------|----------------------|
| Мармур            | Плави́кови й шпат | Польовий шпат | Слюда синтетична | FeSi (ФС-15гс) | FeMn | Ni порошок | Fe порошок | Рутиловий концентрат |
| 40                | 7                 | 9             | 5                | 18             | 5    | 5          | 4          | 7                    |

Примітка: Na/K або K/Na рідке скло додається в об'ємі 23...26% до ваги сухої шихти

Можливість одержання зворотного валика оцінювалася при зварюванні кореневих швів труб у стельовому положенні. Зварювання виконували на трубах сталей Х60, Х65, Х70, 17Г1С, 09Г2, 10, 20, 16Г2, 14Г2САФ товщиною 8...20 мм, електродами 3,0 і 3,25 мм. Електродне покриття АНО-ТМ забезпечує формування зворотного валика, при цьому у зламах стикових зварних з'єднань тріщин, пор, шлакових включень і інших дефектів не виявлено.

Електроди марки АНО-ТМ відносяться до типу Е50А за ГОСТ 9467-75 і рекомендуються для зварювання кореневого шару монтажних стиків труб з низько - вуглецевих кремнемарганцевих сталей ( у тому числі сталей з мікродомішками елементів - дисперсоїдів) під час спорудження і ремонту технологічних і магістральних трубопроводів у суворих кліматичних зонах. При цьому вони можуть бути використані для спеціальних робіт при спорудженні трубопроводів, зварюванні котушок, захльостів, відводів, кривих, запірної арматури і т.д., коли ставляться особливо жорсткі вимоги до якості зварювання і неможливе підварювання зсередини стику. Електроди АНО-ТМ забезпечують більш дрібнокрапельне

перенесення електродного металу, оскільки мають меншу тривалість коротких замикань при переході електродних крапель, ніж більшість електродів аналогічного призначення. В зв'язку з цим їх можна призначати для зварювання на малих струмах без небезпеки “примержання” електрода до виробу. Це значно полегшує ведення процесу зварювання в будь-яких просторових положеннях, а також дозволяє перекривати зазори підвищеної ширини, що є особливо важливим в монтажних умовах.

Споживачі дали позитивну оцінку зварювально-технологічним властивостям нових електродів АНО-ТМ, зокрема: відзначили високу стабільність горіння, гарне формування металу шва при зварюванні в усіх просторових положеннях, легку віддільність шлакової кірки і мале розбризування розплавленого металу. Особливо відзначена висока якість формування зворотного валика шва (з достатнім посиленням) в стельовому положенні. Розроблені електроди дозволяють перекривати широкі зазори (до 7 мм) і виконувати зварювання у важкодоступних місцях. Окрім того, вони допускають зварювання на малих режимах, що уможливило їхнє використання в будь-яких монтажних умовах.

Електроди АНО-ТМ успішно пройшли дослідно-промислові випробування на різних об'єктах нафтогазової промисловості. Вони схвалені Міжнародною страховою компанією Ллойда (Регістр Ллойда: категорія ЗУН15) і Морським Регістром Російської Федерації (РС: категорія ЗУНН), атестовані Міжнародним науково-технічним центром сертифікації «СЕРПРОЗ». Їхнє виробництво організоване на дослідному заводі зварювальних матеріалів “ІЕЗ ім. Є.О.Патона” (м. Київ), в АТ “Орловський сталепрокатний завод” (м. Орел), дослідному зварювальному заводі (м. Москва), в АТ “Дослідно-зварювальне підприємство – ЕЛКОМ” (м. Комсомольск-на-Амурі) та ін.

Електроди АНО-ТМ з 1989 р. широко використовуються на об'єктах ВАТ “Нижневартовскнефтегаз” і його дочірніх підприємствах, у ВАТ “Сибур-Тюмень”, ВАТ “Сибнефтегазпереработка”, ВАТ “Мегионнефтегаз-Славнефть” та ін. для зварювання корневих і заповнюючих шарів монтажних стиків трубопроводів, а також трубчастих елементів несучих конструкцій морських стаціонарних платформ з низьковуглецевих сталей в АТ “Арктик-Север”.

На електроди АНО-ТМ розроблена необхідна технічна документація (паспорти, технологічні інструкції на виготовлення, технічні умови, карти технічного рівня й ін.). Вони занесені в довідники, які видані в Україні і в Росії. За період з 1989 по 2000 рр. включно обсяг використовуваних електродів марки АНО-ТМ тільки у ВАТ «Нижневартовскнефтегаз» склав понад 200 т, що дозволило одержати економічний ефект у розмірі 4,286 млн. руб (у цінах 1999 р.). Прибуток отриманий, насамперед, за рахунок заміни дорогих імпортних електродів (вартість 1 т електродів марки LB-52U японського виробництва складає 1500...2000 дол. США в залежності від діаметра) на відносно дешеві електроди АНО-ТМ (вартість 1 т цих електродів дорівнює в середньому 8...9 тис. руб.). Другою складовою прибутку є збільшення службового ресурсу відповідальних конструкцій, що значно скоротило кількість і обсяги ремонтно-відбудовчих робіт на трасі у суворих кліматичних і природно-геологічних умовах. Так, ресурс експлуатації нафтопроводів, виконаних



електродами УОНИ-13/55, складає в середньому 4...5 років, а електродами АНО-ТМ – понад 10 років.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

На підставі теоретичних і експериментальних досліджень винайдено нове рішення науково-технічної проблеми забезпечення надійності і збільшення ресурсу промислових нафтопроводів, яке полягає у розробці науково-прикладних основ боротьби з корозійними процесами в умовах низьких температур, удосконалених математичних моделей перебігу досліджуваних механізмів корозійного руйнування металу труб, нових марок трубних сталей і електродів для їхнього зварювання. При цьому отримані такі основні результати:

1. Вивчені природа і механізм вуглекислотної корозії трубних сталей нафтового призначення в широкому інтервалі зміни температур (30...250 °С), тисків (0...1,5 МПа) і концентрацій  $O_2$ ,  $CO_2$  і  $H_2S$ , що дозволило по-новому оцінити вплив цих компонентів на її кінетику і вперше сформулювати науково обґрунтовані принципи підвищення корозійної стійкості трубних сталей, експлуатованих в агресивних середовищах.

Запропоновано перспективний напрямок зниження корозійної активності середовища, що транспортується, який полягає у вилученні іонів кальцію з розчину за допомогою спеціальних хімічних реагентів (бутилцелюзолу і етилацетату).

2. Вперше встановлено, що висока стійкість проти загальної і пітинової корозії, сульфідного корозійного руйнування під напруженням низьколегованих сталей і зварних з'єднань досягається економним модифікуванням мікродомішками. Останні сприяють глибоким структурно-фазовим перетворенням, які гальмують процеси корозійних пошкоджень. Науково обґрунтовано оптимальний вміст модифікаторів для:

- низьколегованої сталі (%): церій 0,01...0,03; ітрій 0,01...0,025; барій 0,007...0,015; кальцій 0,001...0,0025; цирконій 0,02...0,04;
- зварного шва (%): церій 0,01...0,02; ітрій 0,015...0,022; барій 0,0014...0,0025; кальцій 0,0012...0,002; цирконій 0,031...0,044.

Запропоновані математичні моделі чисельного прогнозування величин основних показників корозійних процесів зварних з'єднань і основного металу, експлуатованих в агресивних  $H_2S$ - і  $CO_2$ -вмістних середовищах під напруженням, які можуть використовуватися для інженерних розрахунків і прогнозних оцінок експлуатаційного ресурсу зварних металоконструкцій нафтогазових об'єктів.

3. Розроблена математична модель опору нафтогазопроводів утворенню тріщин, спричинених статичною водневою втомою, в основу якої покладений механізм водневого окрихчування металу, що контактує з сірководневмісним середовищем. Зазначена модель враховує особливості будови сталі і вміст в ній розчиненого водню, що дозволяє прогнозувати надійність і працездатність споруджуваних конструкцій, які експлуатуватимуться в агресивних середовища нафтогазових родовищ.

4. Вперше розроблені науково обґрунтовані практичні рекомендації з

підвищення технологічної міцності промислових трубопроводів, що полягають у виборі оптимального технологічного варіанту зварювання з використанням термокінетичних діаграм зварюваних сталей, на які нанесені криві охолодження з вказівкою забезпечуваної при цьому твердості. Такий підхід гарантує отримання потрібних механічних і службових властивостей зварних з'єднань без утворення холодних тріщин у широкому інтервалі температур (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ).

5. На базі комплексних механічних, корозійних і металографічних досліджень встановлені оптимальні концентрації домішок-модифікаторів, при введенні яких у низьколеговану сталь і зварний шов збільшуються характеристики в'язкості руйнування і показники крихкої міцності і тріщиностійкості металу.

Вперше виявлена контролююча роль неметалевих включень (оксидів і окисульфідів) глобулярної форми в процесі крихкого руйнування холодостійкої сталі, економнолегованої Ni, Mo, V, PЗЕ, ЛЗЕ і Zr. Ці включення сприяють подрібненню мікроструктури, а PЗЕ, ЛЗЕ і Zr, окрім того, і часток другої фази. Неметалеві включення є джерелами зародження субмікротріщин на межах зерен і обмежують тим самим можливість підвищення запасу в'язкості металу.

Отримані результати сприяли розробці металургійних основ з підвищення крихкої міцності трубних сталей при низьких температурах (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ), які полягають в економному модифікуванні їх PЗЕ і ЛЗЕ.

6. Сформульована концепція створення універсальних електродів з поліпшеними зварювально-технологічними властивостями, призначених для виконання корневих швів трубопроводів у монтажних умовах, в основу якої покладені принципи вибору оптимального вмісту і співвідношення основних газшлакоутворюючих компонентів ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ) і феросплавів (FeMn, FeSi, FeTi). При цьому до уваги бралася необхідність отримання високих експлуатаційних характеристик електродів і якість формування шва при зварюванні у різних просторових положеннях і змінному монтажному зазорі (від 0 до 7 мм), особливо в умовах низьких температур (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ).

Розроблені електрод марки АНО-ТМ, а також технологія зварювання і ремонту монтажних стиків неповоротних трубопроводів. Зазначені електроди забезпечують формування зворотного валика при зварюванні кореня шва в стельовому положенні без наступного підварювання зсередини труби. Електрод атестований Міжнародною страховою компанією Ллойда, Морським Регістром РФ і Міжнародним науково-технічним центром сертифікації "СЕПРОЗ". Організоване його виробництво і використання для монтажного зварювання і ремонту неповоротних стиків трубопроводів нафтогазових підприємств ВАТ "Нижневартовскнефтегаз", ВАТ "Сибнефтегазпереработка" та ін. Економічний ефект від впровадження нових електродів склав понад 4 млн. руб. (у цінах 1999 р.).

7. Розроблені нові марки вуглецевої (сталь 20) і низьколегованої (08ХМЧА) сталей для виготовлення нафтогазопровідних труб з підвищеними корозійними і холодостійкими властивостями, які успішно пройшли дослідно-промислово випробування на нафтових родовищах ВАТ "Нижневартовскнефтегаз" і рекомендовані до впровадження. Організоване їх дослідно-промислове виробництво на основних заводах-виготовлювачах трубної продукції нафтогазового призначення.

Економічний ефект від впровадження труб з підвищеними корозійно-механічними показниками складає (у тис.руб. на 1 км трубопроводу): при газліфтному видобутку нафти – 319,6 (Ø114 мм); 655,0 (Ø219 мм); 1509,3 (Ø420 мм); при механізованій експлуатації свердловин – 298,7 (Ø114 мм); 517,1 (Ø219 мм); 1120,5 (Ø420 мм).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Сварка и коррозия нефтегазопроводов Западной Сибири / Макаренко В.Д., Беляев В.А., Грачев С.И., Иванов В.А., Полторанин Н.Е., Прохоров Н.Н., Чернов В.Ю.–К.: Наукова думка, 1996.–549 с.
2. Коррозионная стойкость сварных металлоконструкций нефтегазовых объектов. / Макаренко В.Д., Беляев В.А., Галиченко Е.Н., Ковенский И.М., Мухин М.Ю., Полторанин Н.Е., Прохоров Н.Н., Чернов В.Ю., Шатило С.П. –М.: Недра, 2000.–504 с.
3. Технологические свойства сварочных материалов для изготовления оборудования нефтяного назначения / Петровский В.А., Михайлишин П.Б., Чернов В.Ю., Макаренко В.Д., Каливошко А.Н., Галиуллин М.Ф., Макаренко И.О.–Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2003.–140 с.
4. Любич А.И., Чернов В.Ю., Макаренко В.Д. Исследование влияния волластонитового концентрата на сварочно-технологические свойства фтористокальциевых электродов // Сварочное производство.–1986.–№ 12.–С.6-7.
5. Любич А.И., Чернов В.Ю., Макаренко В.Д. Использование модифицирующих лигатур в покрытиях фтористокальциевых электродов // Сварочное производство.–1987.–№10.–С.16-18.
6. Любич А.И., Чернов В.Ю., Макаренко В.Д. Расчет термодинамической вероятности образования тетрафторидов титана и кремния в шлаках электродов с основным покрытием // Сварочное производство.—1988.–№5.–С.37-39.
7. Квасницкий В.Ф., Чернов В.Ю., Макаренко В.Д. Влияние барийсодержащего стекла в электродных покрытиях фтористокальциевого типа на свойства обмазочных масс и сварных соединений // Прогрессивная технология судостроения и сварочного производства.–Николаев: НКИ.–1989.–С.92-99.
8. Любич А.И., Чернов В.Ю., Макаренко В.Д. Технологические свойства электродов с основным покрытием при использовании новых сырьевых материалов // Сварочное производство.–1989.–№11.–С.19-21.
9. Любич А.И., Чернов В.Ю., Макаренко В.Д. Основные принципы выбора газшлакообразующей системы покрытия // Сварочное производство. –1989. –№12. – С.20-23.
10. Чернов В.Ю., Макаренко В.Д., Квасницкий В.Ф. Некоторые пути улучшения пластических свойств покрытий фтористокальциевых электродов // Прогрессивная технология судостроения и сварочного производства.–Николаев: НКИ.–1990.–С.12-17.

11. Чернов В.Ю., Макаренко В.Д., Островский И.Я. Влияние гранулометрического состава электродных капель  $\text{CaF}_2$  в покрытии на содержание диффузионного водорода в наплавленном металле // Технология судостроения и сварочного производства.–Николаев: НКИ.–1992.–С.108-112.
12. Чернов В.Ю., Макаренко В.Д., Островский И.Я. Механізм пітингової корозії нафтопроводів // Вісник аграрної науки Причорномор'я. Миколаїв: МСГІ.–1999.–Вип. 1 (6).–С.149-155.
13. Макаренко В.Д., Чернов В.Ю. Пути повышения трещиностойкости сварных соединений нефтегазопроводов // Сб. научн. тр. УГМТУ. Николаев.–1999.–№1(361).–С.65-73.
14. Чернов В.Ю. Математическое моделирование сопротивления трубопроводов статической водородной усталости // Сб. научн. тр. УГМТУ. Николаев.–1999.–№2 (362).–С.51-60.
15. Чернов В.Ю. Причины питтинговой коррозии нефтяных трубопроводов // Сб. научн. тр. УГМТУ. Николаев.–1999.–№3 (363).–С.66-74.
16. Макаренко В.Д., Чернов В.Ю. Коррозионная стойкость сварных соединений нефтепроводов // Сб. научн. тр. УГМТУ. Николаев.–1999.–№4 (364).–С.92-100.
17. Чернов В.Ю. Влияние комплексных лигатур на сварочно-технологические свойства фтористокальциевых электродов // Сб. научн.тр. УГМТУ. Николаев.–1999.–№5(365).–С.104-110.
18. Чернов В.Ю. Дослідження руйнування зварних швів нафтогазопроводів // Фізико-хімічна механіка матеріалів.–2000.–№3.–С.131-132.
19. Макаренко В.Д., Беляев В.А., Галиченко Е.Н., Мухин Н.Ю., Палий Р.В., Прохоров Н.Н., Чернов В.Ю. Влияние модифицирующих микродобавок на вязкопластичность и хрупкую прочность хладостойкой низколегированной стали // Сварочное производство.–2000.–№8.–С.7-13.
20. Макаренко В.Д., Беляев В.А., Галиченко Е.Н., Мухин Н.Ю., Палий Р.В., Прохоров Н.Н., Чернов В.Ю. Влияние модифицирующих микродобавок на коррозионную стойкость сварных соединений из низколегированной стали // Сварочное производство.–2000.–№9.–С.3-8.
21. Чернов В.Ю. Вплив кисню і сірководню на вуглекислотну корозію зварних металоконструкцій нафтогазових об'єктів // Фізико-хімічна механіка матеріалів.–2001.–№5.–С.98-102.
22. Макаренко В.Д., Беляев В.А., Галиченко Е.Н., Мухин Н.Ю., Палий Р.В., Прохоров Н.Н., Чернов В.Ю. Влияние модифицирующих микродобавок на коррозионную стойкость сварных соединений нефтегазопроводов // Сварочное производство.–2001.–№4.–С.13-19.
23. Макаренко В.Д., Беляев В.А., Галиченко Е.Н., Мухин Н.Ю., Палий Р.В., Прохоров Н.Н., Чернов В.Ю. Влияние модифицирующих микродобавок на механические и вязкопластические свойства сварных соединений нефтегазопроводов // Сварочное производство.–2001.–№5.–С.9-14.
24. Чернов В.Ю., Макаренко В.Д., Крижанівський Є.І., Прохоров М.М.,

Шатило С.П. Проблеми корозійної тривкості промислових трубопроводів // Нафтова і газова промисловість. –2002.–№6.–С.57-59.

25. Чернов В.Ю., Макаренко В.Д., Крижанівський Є.І. Удосконалення електродів для зварювання і ремонту нафтогазопроводів // Нафтова і газова промисловість.–2002.–№3.–С.33-35.

26. Чернов В.Ю. Оцінка корозійної тривкості труб з вуглецевих низьколегованих сталей // Фізико-хімічна механіка матеріалів.–2002.–№1.–С.105-106.

27. Чернов В.Ю., Шлапак Л.С. Розробка практичних рекомендацій з підвищення технологічної міцності промислових трубопроводів // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ.–2002.–№3.–С.59-64.

28. Makarenko V. D., Belyaev V. A., Chernov V. Yi. et al. Effect of modifying microadditions in the corrosion resistance of welded joints in low-alloy steel // Welding International. Cambridge (England).- 2001.-Vol. 2, № 1.-P. 140-145.

29. Makarenko V. D., Belyaev V. A., Chernov V. Yi. et al. Effect of modifying microadditions in the corrosion resistance of welded joints in oil and gas pipelines // Welding International. Cambridge (England).-2001.- Vol. 15, № 9.- P. 723-728.

30. Makarenko V.D., Belyaev V.A., Chernov V.Yi. et al. Effect of modifying microadditions on the mechanical and ductility properties of welded joints in oil and gas pipelines// Welding International. Cambridge (England).-2001.- Vol. 15, № 10.- P. 808-811.

31. Makarenko V. D., Belyaev V. A., Chernov V. Yi. et al. Effect of modifying additions on the ductility and plastic properties and the brittle strength of cold-resistant, low-alloy steel // Welding International. Cambridge (England).-2001.- Vol. 15, №1.- P. 4551.

32. Чернов В.Ю. Влияние микродобавок на сопротивление хрупкому разрушению сварных соединений нефтепроводов // Фізико-хімічна механіка матеріалів.–2002.–№3.–С.110-113.

33. Чернов В.Ю. Дослідження механізму утворення корозії нафтопроводів // Нафтова і газова промисловість.–2002.–№5.–С.46-48.

34. Чернов В.Ю., Макаренко В.Д., Крижанівський Є.І., Шлапак Л.С. Причини і механізм локальної корозії промислових нафтопроводів // Фізико-хімічна механіка матеріалів.–2002.–№5.–С.97-102.

35. Чернов В.Ю. Удосконалення технології зварювання неповоротних стиків нафтогазопроводів // Нафтова і газова промисловість.–2003.–№3.–С.44-47.

36. Чернов В.Ю., Макаренко В.Д., Крижанівський Є.І., Шлапак Л.С. Про причини корозійних руйнувань промислових трубопроводів // Фізико-хімічна механіка матеріалів.–2002.–№6.–С.93-95.

37. Чернов В.Ю., Макаренко В.Д., Крижанівський Є.І., Шлапак Л.С. Вплив водню на механізм сульфідного корозійного розтріскування під напруженням (СКРН) сталей промислових трубопроводів // Фізико-хімічна механіка матеріалів.–2003.–№1.–С.121-123.

38. Чернов В.Ю. Особенности сварки неповоротных стыков

нефтегазопроводов // 36.наук.пр. УДМТУ.–Миколаїв: УДМТУ, 2002.–№7(385).–С.48-59.

39. Палий Р.В., Макаренко В.Д., Чернов В.Ю. Аналитический метод расчета и прогнозирования трещиностойкости промышленных трубопроводов // Химическое и нефтегазовое машиностроение.–2002.–№3.–С.29-31.

40. Макаренко В.Д., Прохоров Н.Н., Мухин М.Ю., Галиченко Е.Н., Чернов В.Ю. Технологии обеспечения коррозионной стойкости трубопроводов // Технология машиностроения.–2003.–№1. –С.35-40.

41. Макаренко В.Д., Чернов В.Ю., Крижанівський Є.І., Прохоров М.М. Аналіз і оцінювання працездатності та тріщиностійкості зварних трубопроводів // Нафтова і газова промисловість.–2003.–№4.–С. 47-50.

42. Макаренко В.Д., Шлапак Л.С., Чернов В.Ю. Оцінювання експлуатаційної надійності нафтопроводів за наявності локальних дефектів зварних з'єднань // Нафтова і газова промисловість.–2003.–№5.–С. 46-49.

43. Макаренко В.Д., Петровський В.А., Чернов В.Ю. Технологічні методи забезпечення корозійної стійкості трубопроводів // Нафтова і газова промисловість.–2003.–№6.–С. 50-52.

44. Чернов В.Ю., Макаренко В.Д., Привалов Н.Т. Термодинамический расчет вероятности образования продуктов рафинирования металла шва комплексными лигатурами с РЗМ // Материалы всесоюзн. конф. “Состояние и перспективы развития электротехнологии”.–Т.1. Иваново. –1985. –С.54-55.

45. Чернов В.Ю., Макаренко В.Д. Вплив скла з барієм у електродних покриттях основного типу на властивості зварних з'єднань // Матеріали обл. наук.-теор. конф. “Соціально-економічні та технологічні проблеми АПК Причорномор'я та шляхи їх вирішення”. Миколаїв.–1993.–С.74-75.

46. Чернов В.Ю., Макаренко В.Д. Вплив комплексних лігатур на зварювально-технологічні властивості електродів основного типу // Матеріали обл. наук.-теор. конф. “Сучасні проблеми АПК та шляхи їх вирішення в умовах півдня України”. Миколаїв.–1995.–С.59-61.

47. Чернов В.Ю., Макаренко В.Д. Поліпшення пластичних властивостей покриттів електродів фтористо-кальцієвого типу // Матеріали обл. наук.-теор. конф. “Перспективні напрями розвитку АПК Причорноморського регіону”. Миколаїв.–1996.–С.81-82.

48. Макаренко В.Д., Беляев В.А., Чернов В.Ю. Особенности влияния никеля на структуру и механические свойства наплавленного металла при сварке нефтепроводов // Материалы междунар. научн.-техн. конф. “Нефть и газ Западной Сибири”.–Т.2. Тюмень.–1996.–С.13-14.

49. Макаренко В.Д., Беляев В.А., Чернов В.Ю. Коррозионная стойкость сварных соединений нефтепроводов в северном исполнении // Материалы междунар. научн.-техн. конф. “Нефть и газ Западной Сибири”.–Т.2. Тюмень.–1996.–С.87-88.

50. Чернов В.Ю., Шлапак Л.С., Крижанівський Є.І. Вплив мікродомішок-модифікаторів на корозійну стійкість нафтогазопроводів // Матеріали VI Міжнар.

конф. «Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів» (КОРОЗІЯ-2002). Львів.–2002.–С.32.

51. Чернов В.Ю., Макаренко В.Д., Шатило С.П., Прохоров Н.Н. Повышение коррозионной стойкости нефтегазопроводов // Материалы III Междунар. пром. конф. «Эффективность реализации научного и промышленного потенциала в современных условиях».–Киев-Славское.–2003.–С.116-117.

52. Чернов В.Ю., Макаренко В.Д., Шатило С.П., Прохоров Н.Н. Альтернативные пути повышения коррозионной стойкости металлоконструкций нефтяных месторождений // Материалы III Междунар. пром. конф. «Эффективность реализации научного и промышленного потенциала в современных условиях».–Киев-Славское.–2003.–С.118-119.

## АНОТАЦІЯ

**Чернов В.Ю. Науково-прикладні основи забезпечення експлуатаційної надійності промислових трубопроводів при низьких температурах.**–Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – нафтогазопроводи, бази та сховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2003.

Дисертація присвячена питанням забезпечення надійності промислових трубопроводів, що працюють у суворих кліматичних і природно-геологічних умовах. В дисертації вироблено єдиний підхід щодо вирішення важливої науково-технічної проблеми, спрямованої на розробку вискоєфективних технологічних процесів і матеріалів для виготовлення трубних сталей та їхнього зварювання, а також методів підвищення надійності й експлуатаційної довговічності в корозійно-активних середовищах при низьких температурах (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ).

В рамках розробки цієї концепції досліджено природу і механізм вуглекислотної корозії трубопроводів в умовах взаємодії з агресивними продуктами. Вивчено причини і встановлено механізм локальної корозії зварних нафтопроводів. Розроблено математичні моделі корозійних процесів і прогнозних оцінок працездатності промислових трубопроводів. Вивчено ступінь впливу водню на механізм корозійного розтріскування під напруженням, індукованого ним розшарування металу труб, і створено електрохімічні моделі механізмів вказаних видів руйнування. Розроблено науково обґрунтовані практичні рекомендації з підвищення корозійної тріщиностійкості трубних сталей та їхніх зварних з'єднань, а також технологічної міцності. Досліджено і встановлено оптимальний хімічний склад металу труб нафтового сортаменту і способи, що забезпечують їхню високу тріщино- і холодотривкість. Розроблено нові марки сталей для виготовлення промислових труб, проведено випробування їхніх властивостей, організовано дослідно-промислово перевірку і впровадження на промислах. Розроблено і впроваджено новий електрод для зварювання корневих швів монтажних стиків в будь-яких просторових положеннях, проведено випробування зварювально-технологічних показників і характеристик з'єднань.

*Ключові слова:* промислові трубопроводи, корозійна стійкість, трубні сталі,

зварні з'єднання, агресивні середовища, механічні властивості, експлуатаційна надійність.

## АННОТАЦІЯ

**Чернов В.Ю. Научно-прикладные основы обеспечения эксплуатационной надежности промышленных трубопроводов при низких температурах.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.15.13 – нефтегазопроводы, базы и хранилища. – Ивано - Франковский национальный технический университет нефти и газа. Ивано-Франковск, 2003.

Работа посвящена актуальным вопросам обеспечения эксплуатационной надежности промышленных трубопроводов, работающих в суровых климатических и природо - геологических условиях.

Целью работы является разработка научно-прикладных основ повышения эксплуатационной надежности промышленных трубопроводов для суровых климатических условий.

В первом разделе проанализированы причины снижения коррозионной стойкости нефтепроводов Самотлорского месторождения и отмечено, что главной из них является образование приповерхностных микротрещин, вызванных фазовыми напряжениями, являющимися результатом локального разогрева приповерхностных объемов металла до температур аустенизации под действием дробеструйной обработки.

Для предотвращения значительных деформаций и разогревов во втором разделе усовершенствована технология дробеструйной обработки поверхности труб, что позволило эффективно защитить их от канавочной и питтинговой коррозии.

Изучены природа и механизм углекислотной коррозии трубных сталей нефтяного назначения в широком интервале изменения температур, давлений и концентраций  $O_2$ ,  $CO_2$  и  $H_2S$ , что позволило по-новому оценить влияние этих компонентов на ее кинетику и впервые сформулировать научно обоснованные принципы повышения коррозионной стойкости трубных сталей, эксплуатируемых в агрессивных средах, содержащих  $O_2$ ,  $CO_2$  и  $H_2S$ .

Впервые установлено, что высокая стойкость против общей и питтинговой коррозии, сульфидного коррозионного разрушения под напряжением низколегированных сталей и сварных соединений достигается путем их экономного модифицирования микродобавками, которые благоприятствуют глубоким структурно-фазовым превращениям, тормозящим процессы коррозионных повреждений. Установлено оптимальное содержание модификаторов.

Разработаны и предложены математические модели численного прогнозирования величин основных показателей коррозионных процессов основного металла и сварных соединений, эксплуатируемых в агрессивных  $CO_2$ - и  $H_2S$ -содержащих средах под напряжением. Указанные модели могут использоваться для инженерных расчетов и прогнозных оценок эксплуатационного ресурса сварных металлоконструкций нефтегазовых объектов, а также сопротивления нефтегазопроводов образованию трещин, вызванных статической водородной



усталостью. В их основу положен механизм водородного охрупчивания металла, контактирующего с сероводородсодержащей средой, учитывающий особенности старения стали и содержание растворенного в ней водорода.

В третьем разделе разработаны научно обоснованные практические рекомендации для повышения технологической прочности промышленных трубопроводов, состоящие в выборе оптимального технологического варианта сварки с использованием термокинетических диаграмм свариваемых сталей, на которые нанесены кривые охлаждения с указанием обеспечиваемой при этом твердости. Такой подход гарантирует получение требуемых механических и служебных свойств сварных соединений при отсутствии вероятности образования холодных трещин в широком интервале температур (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ).

В четвертом разделе на базе комплексных механических, коррозионных и металлографических исследований установлены оптимальные концентрации модифицирующих микродобавок, при введении которых в низколегированную сталь и сварной шов увеличиваются характеристики вязкости разрушения и показатели хрупкой прочности и трещиностойкости металла.

Проанализирована контролирующая роль неметаллических включений (оксидов и окисульфидов) глобулярной формы в процессе хрупкого разрушения хладостойкой стали, экономнолегированной Ni, Mo, V, PЗЭ, ЦЗЭ и Zr. Указанные элементы способствуют измельчению микроструктуры, а PЗЭ, ЦЗЭ и Zr, кроме этого, и частиц второй фазы. Неметаллические включения являются источниками зарождения субмикротрещин на границах зерен и ограничивают тем самым возможность повышения запаса вязкости металла. Полученные результаты способствовали разработке металлургических основ повышения хрупкой прочности трубных сталей при низких температурах (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ).

В пятом разделе сформулирована основная концепция создания универсальных электродов с улучшенными сварочно-технологическими свойствами, предназначенных для выполнения корневых швов трубопроводов в монтажных условиях, в основу которой положены принципы выбора оптимального содержания и соотношения основных газшлакообразующих компонентов ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ) и ферросплавов ( $\text{FeMn}$ ,  $\text{FeSi}$ ,  $\text{FeTi}$ ). При этом первоочередными задачами были необходимость получения высоких эксплуатационных характеристик электродов и качество формирования шва при сварке в различных пространственных положениях и переменном монтажном зазоре (от 0 до 7 мм) в условиях низких температур (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ).

Разработаны новые марки углеродистой (сталь 20А) и низколегированной (08ХМЧА) сталей для изготовления нефтегазопроводных труб с повышенными коррозионными и хладостойкими свойствами, которые успешно прошли опытно-промышленные испытания на нефтяных промыслах ОАО «Нижневартовскнефтегаз» и рекомендованы для внедрения. Организовано их опытно-промышленное производство на основных заводах-изготовителях трубной продукции нефтегазового назначения.

Экономический эффект от внедрения в строительство нефтепроводов труб с повышенными коррозионно-механическими показателями составляет (в тыс.руб. на

1 км трубопровода): при газлифтной добыче нефти – 319,6 (Ø114 мм); 655,0 (Ø219 мм); 1509,3 (Ø420 мм); при механизированной эксплуатации скважин – 298,7 (Ø114 мм); 517,1 (Ø219 мм); 1120,5 (Ø420 мм).

*Ключевые слова:* промышленные трубопроводы, коррозионная стойкость, трубные стали, сварные соединения, агрессивная среда, механические свойства, эксплуатационная надежность.

#### ANNOTATION

Chernov V.Yu. Scientifically-applied guaranteeing bases of operational reliability of industrial conduits attached to low temperatures. Manuscript.

The thesis for a doctor's degree achievement in speciality 05.15.13- oil gas pipelines, bases and depositories. Ivano – Frankivsky National Technical University of Oil and Gas. Ivano – Frankivsk, 2003.

The thesis is devoted to the problem of reliability guaranteeing of industrial conduits working in strict climatic and naturally-geologic conditions. In dissertation produced one approach as for settlement of important scientific and technical problem, directed on development of high-effective technological processes and materials for making trumpet steels and their welding and reliability rise methods operational longevity in corrosively-active environments attached to low temperatures (to  $-60^{\circ}\text{C}$ ).

Within the frameworks development of this conception inquired into nature and mechanism carbon acid of conduits corrosion in interaction conditions with aggressive products. Learned the causes and set a mechanism of local corrosion of welding pipelines. Developed the mathematical models of corrosive processes and prognosis estimations of industrial conduits. Defined an influence degree to hydrogen on mechanism of sulfite stress corrosive cracking under effort (SSCC), pipes stratification (HIC) induced by it, and created the mechanisms models of stated destruction appearances. Developed scientifically ground practical rise recommendations corrosive crack firm trumpet steels and their welding compounds, and also technological stoutness. Explored and set optimum chemical pipes storage of petroleum assortment, contents to hydrogen and realization methods, that provides high crack- and cold firm. Developed new recognitions steels for making of industrial pipes, seen out test of their properties, organized experienced-industrial verification and inculcation on trades. Developed and inculcated a new electrode for welding of root seams of assembly joints, seen out test of welding-technological indexes and compounds descriptions.

Key words: industrial conduits, corrosive steadiness, trumpet to steel, welding compounds, aggressive environment, mechanical properties and operational reliability.