УДК 621.643: 621.791

ДО ПРОБЛЕМИ ЗВАРЮВАЛЬНИХ РОБІТ НА ДІЮЧИХ ГАЗОПРОВОДАХ. Частина І

А.В. Василик, В.Б. Запухляк, М.І. Височан

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська,15, тел. (03422) 48090,
e-mail: z t k @ n u n g . e d u . u a

Описано види і технологічні проблеми зварювальних робіт на магістральних газопроводах під тиском газу. Вказано вплив різних параметрів на формування зварного з'єднання в таких умовах. Висвітлено підходи і практичні рекомендації дослідницьких організацій з безпечного проведення зварювальних робіт на діючому газопроводі.

Розглянуто схему термічного розкладання метану в приповерхневому шарі на нагрітій ділянці зони зварювання. Описано можливі процеси навуглецювання та наводнювання металу стінки труби в зоні зварювання.

Викладено термодинамічні розрахунки термічного розкладання метану.

Описано порядок розрахунку парціального тиску водню за різних тисків метану. Розраховано і побудовано графіки розчинності водню в залізі за різних парціальних тисків молекулярного водню в газовій суміші.

Розглянуто загальні процеси розчинності водню в металі і розвиток водневого окрихчення трубних сталей.

Ключові слова: газопровід, дугове зварювання, метан, термічне розкладання, навуглецювання, водень, розчинність

Описаны виды и технологические проблемы сварочных работ на магистральных газопроводах под давлением газа. Изложено влияние различных параметров на формирование сварного шва в таких условиях. Описаны подходы и практические рекомендации исследовательских организаций по безопасному ведению сварочных работ на действующем газопроводе.

Рассмотрена схема термического разложения метана в приповерхностном слое нагретого участка зоны сварки. Описаны возможные процессы науглероживания и наводороживания металла стенки трубы в зоне сварки.

Изложены термодинамические расчеты термического разложения метана.

Описан порядок расчета парциального давления водорода при разных давлениях метана. Рассчитаны и построены графики растворимости водорода в железе при разных парциальных давлениях молекулярного водорода.в газовой смеси.

Рассмотрены общие вопросы растворимости водорода в металле и развитие водородного охрупчивания трубных сталей.

Ключевые слова: газопровод, дуговая сварка, метан, термическое разложение, науглероживание, водород, растворимость

Types and technological problems of welding of pressurized gas transmission pipelines are described. The influence of various parameters on the forming of weld joint under such conditions is laid out. Approaches and practical recommendations from research organizations regarding save conduction of in-service welding on gas pipelines are given.

Concept of thermal decomposition of methane in near-surface layer of weld area is suggested. Potential processes of carburization and hydrogenation of pipe wall metal in weld area are described.

Thermodynamic calculations of thermal decomposition of methane are given.

Calculation procedure of values of partial pressure of hydrogen at different levels of methane pressure is provided.

Diagrams of hydrogen solubility in ferrum at various level of partial pressure of molecular hydrogen in gas mixture are calculated and plotted.

General processes of hydrogen embrittlement in tubes steels are considered.

Keywords: gas pipeline, arc welding, methane, thermal decomposition, carburization, hydrogen, solubility

Вступ. Підтримання технічного стану магістральних трубопроводів виконують традиційними методами капітального ремонту на відключених і повністю випорожнених від газу ділянках трубопроводу. В останні роки все частіше ремонтно-зварювальні роботи на магістральних газопроводах проводять без зупинки транспортування продукту. Це дозволяє економити фінансові, матеріальні і людські ресурси. Опис різноманітних видів ремонтно-зварювальних робіт на газопроводах під тиском та їх обґрунтування наведено в роботах[1–4].

Основними з них є відновлення несівної здатності лінійної частини трубопроводів з корозійно-механічними пошкодженнями шляхом заплавлювання локальних стоншених ділянок на зовнішній поверхні труб (рис. 1, *а*), під'єднання відгалужень (рис. 1, *б*). При накладанні бандажних кілець герметизація досягається кутовими зварними швами (рис. 1, *в*).

Під час проведення зварювальних робіт безпосередньо на діючому газопроводі виникають окремі ризики і певні технологічні складнощі.

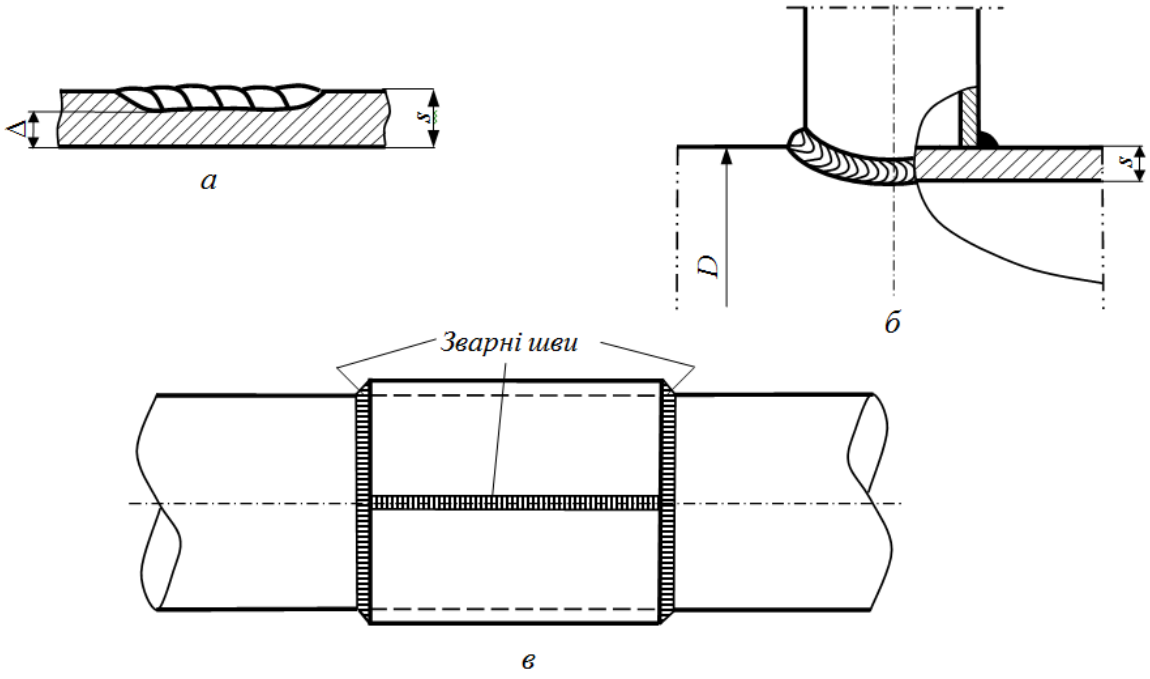
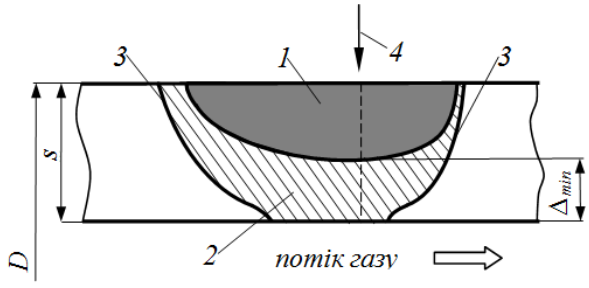


Рисунок 1 – Схема заплавлення ураженої ділянки (*а*), приєднання відводу (*б*) і герметизація зварного бандажа (*в*)

По-перше, при довільно вибраних режимах зварювання може відбутися наскрізне проплавлення металу стінки труби, а отже, існує небезпека загоряння газу.

В процесі зварювання в околі шва формується розігріта ділянка металу з пониженими міцнісними характеристиками (рис. 2). Розміри розігрітої зони визначаються насамперед зварювальними режимами і розмірами заплавлюваної ділянки, залежать від діаметра і товщини труби, а також швидкості потоку газу.



1– повздовжний переріз зварювальної ванни;
2– зона розігріву стінки труби;
3 – ізотерми допустимої температури;
4 – положення зварювальної дуги

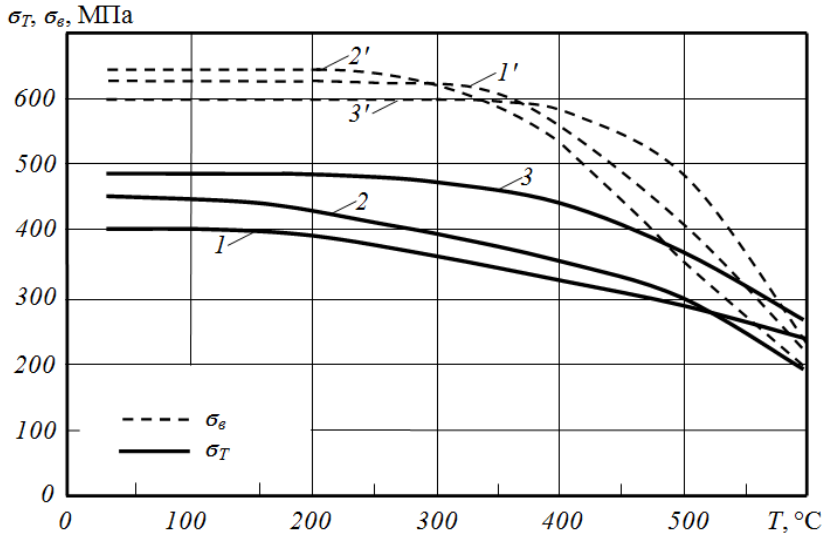
Рисунок 2 – Температурне поле у стінці труби

Найбільший ризик полягає в тому, що від дії внутрішнього тиску газу при виконанні зварного шва локалізована нагріта ділянка труби може зруйнуватися в місці з товщиною Δ_{min} внаслідок понижених міцнісних характеристик трубної сталі. Якщо тиск газу і температура достатньо високі, причому висока температура підтримується достатньо довго, то в нерозплавленій перемичці під дугою може відбутися інтенсивна пластична деформація (високотемпературна повзучість) з випинанням і подальшим руйнуванням металу. Ця обставина, безсумнівно, вимагає дотримання певних технологічних прийомів і практичних рекомендацій стосовно безпечного проведення зварювальних робіт на трубопроводах.

Це особливо актуально, оскільки існує зростаюча тенденція до використання для магістральних газопроводів сталей підвищеної міцності з меншими товщинами стінки труби. Усі переваги використання таких труб за звичайних температур не реалізуються за підвищених температур.

Вплив температури на міцнісні характеристики деяких трубних сталей наведено на рис. 3 [1]. Як видно, характер зміни межі міцності сталей 14ХГС, 17Г1С і Х60 практично однаковий. За температури вище 450 °С міцність сталей різко знижується, а при температурі 600 °С складає лише 50 %. Це необхідно враховувати при виборі режимів зварювання на діючому трубопроводі в залежності від конкретної марки сталі і прагнути до мінімального тепловкладання в метал у процесі зварювання.

Стан вивченості проблеми. Найбільш ефективним інструментом для оцінки ризику про-палення стінки при зварюванні на поверхні труб є комп'ютерне моделювання температурних полів і аналіз напружено-деформованого стану металу. Комп'ютерне моделювання дозволяє оцінити поверхневі температури металу як функції зварювальних параметрів ($I_{зв}$, $U_д$, $v_{зв}$), розмірів труби (D, s), експлуатаційних параметрів газопроводу (тип продукту, тиск, швидкість потоку тощо).



1, 1′ – 14ХГС; *2, 2′* – 12Г1С; *3, 3′* – Х60

Рисунок 3 – Залежність міцнісних характеристик сталей від температури

Теоретичними і експериментальними дослідженнями температурних полів і напружено-деформованого стану металу, проведеними в ІЕЗ ім. Є. О. Патона [5–6], встановлено взаємозв'язок між руйнівними коловими напруженнями і розмірами зони розігріву до температури 700 °С, вище якої міцнісні характеристики металу знаходяться на рівні 4…10 % σ_T. Рекомендовано дугове зварювання виконувати на трубах з товщиною стінки більше 8 мм і напруженнях у них до 0,7 σ_T при обмеженому теплоуведенні (до 1,38 Дж/мм) в метал).

За результатами комп'ютерного моделювання температурних полів, напружено-деформованого стану, стендових досліджень, проведених дослідницькими організаціями Batelle Memorial Institute (BMI) і Edison Welding Institute (EWI) [7, 8], мінімальна товщина стінки труб газопроводів високого тиску, на яких виконуються зварювальні операції, може складати 4,0…4,8 мм. При цьому максимальна температура внутрішньої поверхні не повинна перевищувати 982 °С.

Деякі дослідники [9] вважають температуру 982 °С достатньо консервативною і допускають, що уникнути наскрізного пропалення металу можна і за температури на внутрішній поверхні труби 1260 °С.

Для запобігання можливості наскрізного проплавлення металу стінки труби процес зварювання виконують на достатньо жорстких режимах (зварювальний струм, погонна енергія). Такі роботи прийнято проводити при знижених робочих тисках газу. Однак, практика зниження тиску при виконанні зварювальних робіт є малоефективною, оскільки зменшення тиску газу зменшуватиме його охолоджувальну дію і сприятиме підвищенню поверхневої температури металу на ділянці зварювання [3]. Саме зменшення робочого тиску має радше психологічний вплив на ремонтний персонал, що виконує ці роботи. В роботі [10] показано можливість зварювання кільцевим кутовим швом муфти (бандажа) на трубу діаметром 762 мм та товщиною стінки 14,3 мм із сталі Х65 без зниження робочого тиску 7 МПа.

Другий важливий ризик пов'язаний з небезпекою виникнення у зварному з'єднанні холодних тріщин і тріщин, викликаних воднем. Ці дефекти виникають після завершення зварювання за температур в зоні зварного з'єднання нижче 200 °С. Такі тріщини можуть виникати в зоні термічного впливу (ЗТВ) і в металі шва. Вважається, що для утворення холодних тріщин в металі зварного з'єднання необхідні три умови [11, 12]:

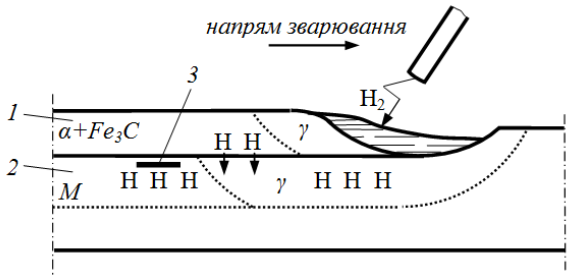
– наявність у металі гартувальних структур мартенситу (М) або структури нижнього бейніту;

– деякий визначений мінімум дифузійного водню, джерелом якого є переважно метал шва;

– наявність в зоні зварного з'єднання залишкових розтягувальних напружень.

На рис. 4 наведено схему структурних перетворень і насичення воднем металу зварного з'єднання. З металу зварного шва водень дифундує в зону термічного впливу головним чином під час γ→α-перетворення металу зварного шва. Зі схеми видно, що в металі зварного шва уже відбулося γ→α-перетворення, а в зоні термічного впливу структура металу залишається аустенітною. Оскільки при γ→α-перетворенні розчинність водню в металі шва різко знижується, його більша частина дифундує в зону термічного впливу. При зниженні температури приблизно нижче 200 °С водень може перейти на деяких вільних поверхнях з атомарного стану в молекулярний. При цьому виникає високий тиск газу у цих місцях.

На даний час чутливість сталі до утворення холодних тріщин оцінюється за різними параметричними рівняннями, що враховують хімічний склад сталі, кількість дифузійного водню, рівень залишкових зварювальних напружень у зварному вузлі.



1 – зварний шов; 2 – зона термічного впливу; 3 – тріщина

Рисунок 4 – Схема структурних перетворень і дифузії водню в металі шва і зони термічного впливу

В роботі [13] ризик утворення тріщини в трубній сталі пропонується визначати показником чутливості

$$P_{тр} = 12 \cdot P_{см} + \lg H_{диф}, \qquad (1)$$

де $P_{см}$ – параметр Іто-Бессіо, який визначається за хімічним складом сталі з рівняння

$$P_{см} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B, \% \qquad (2)$$

$H_{диф}$ – вміст дифузійного водню в металі шва, см^3/100 г металу.

Вважається, що критичне значення $P_{тр}^{кр}$, при яком трубні сталі товщиною до 20 мм не схильні до утворення холодних тріщин, лежить в межах 3,1…4,0. Розрахунки показують, що при вмісті дифузійного водню в металі шва 10 см^3/100 г параметр $P_{тр}$ для сталі 17Г1С складе 3,65…4,72, а для сталі Х65 – 5,02 [5]. Отже, для більшості сучасних трубних сталей існує ризик утворення холодних тріщин в металі. Попереднє підігрівання до 100…150 °С перед зварюванням значно знижує такий ризик. Крім того, беручи до уваги, що заплавлення стоншених ділянок і кругові чи кільцеві зварні шви на трубах здійснюються кількома шарами, проявляється ефект відпуску ЗТВ попередніх валиків теплом наступних.

Водень є одним з головних чинників, що впливають на утворення холодних тріщин. Найбільш простим способом зниження вмісту водню в металі є застосування такої технології зварювання, яка забезпечує його низькі концентрації в металі зварного шва. Зокрема, для ручного дугового зварювання використовують електроди з покриттям основного типу з контрольованим вмістом водню (не більше 5…10 см^3/100 г металу). Газоелектричне зварювання рекомендується виконувати в суміші газів CO_2 або Ar. Особливу увагу приділяють при цьому підготовчим операціям (зберігання і прокалювання електродів, контроль вологості повітря, підготовка поверхні на ділянці зварювання, контроль зварювальних параметрів тощо.

Під час дослідження ремонтного зварювання магістральних трубопроводів під тиском Махненко В. І. із співробітниками [14] проаналізував можливість надходження дифузійного водню при проведенні ремонтного зварювання на діючому газопроводі безпосередньо з природного газу, який перебуває двофазовому стані. Як джерело дифузійного водню розглядалися різні вуглеводні сполуки (метан, пропан, етан, бутан, молекулярний водень). Припускалося, що розчинений в рідкій фазі атомарний водень дифундує в метал стінки труби. Показано, що за малих значень товщини стінки s_{min} може відбуватися суттєве насичення зони зварювального нагрівання дифузійним воднем в інтервалі високих температур. Натомість в процесі охолодження стінок труби відбувається вирівнювання концентрації дифузійного водню як в об'ємі металу стінки, так і у воденьмісному пристінному шарі з парціальним тиском p_{H_2}. За температур нижче 150 °С і $p_{H_2} < 0{,}75$ MPa вплив водню на утворення холодних тріщин невеликий. Проте при більш високих парціальних тисках дифузійного водню $p_{H_2} > 0{,}75$ MPa ризик утворення холодних тріщин суттєво зростає. В результаті проведених експериментальних вимірювань реального потоку водню через стінку труб магістральних газопроводів з допомогою гліцеринової проби автори дійшли висновку, що парціальний тиск дифузійного водню в газопроводах менше 0,1 МПа, а отже, підстав вважати значною роль дифузійного водню на утворення водневих тріщин при ремонтному зварюванні на поверхні труб нема.

Слід зазначити, що стендові дослідження, як правило, проводилось в умовах, коли внутрішній тиск створювався водою, азотом, інертним газом чи проточним повітрям [2, 3, 8–10]. Зрозуміло, що при цьому не враховувалася можлива реакційна здатність продуктів термічного розкладання метану в зоні зварювання та їх вплив на можливе окрихлення металу. Актуальність цього питання пов'язана з тим, що в останні роки в магістральних газопроводах транспортується природний газ з вмістом метану понад 90 %.

Постановка задачі досліджень. Відомо, що термічне розкладання вуглеводнів починається при 380…400 °С. В результаті термічного розкладання вуглеводнів вихідного газу в атмосфері, що не містить кисню, утворюється сажа і дуже багато водню. Підтвердженням цього служать дані роботи [15], де вказується наявність на внутрішніх поверхнях труб зі значним терміном експлуатації відкладень сажі (вуглецю) як результату довгого ланцюга хімічних перетворень з утворенням вільних радикалів і проміжних продуктів. Аналізуючи аварійні руйнування магістральних газопроводів, автори відмічають, що, поряд з дією багатьох чинників (корозія, пульсація температури і тиску газу), одним з вагомих є наводнювання металу труб. Вміст водню в стінках аварійних труб на ділянці

Таблиця 1 – Термодинамічні величини речовин [16]

Речовина	Стан	ΔH°_{298}, кДж/моль	S°_{298}, Дж/(моль·К)	C°_{p298}, Дж/(моль·К)
CH_4	газ	-74,87	186,25	35,69
C	твердий	0	5,744	8,54
H_2	газ	0	130,68	28,84

руйнування газопроводу складає 9–12 см^3/100 г сталі, що в декілька разів перевищує вихідний вміст водню (до 3 см^3/100 г сталі). Джерелами надходження водню в метал можуть бути як наявна у газі волога, так і продукти розкладання вуглеводнів.

Нижче розглядається ситуація, коли на внутрішній поверхні труби від нагрівання зварюванням можуть досягатися температури, за яких у приповерхневому шарі газу протікатиме реакція термічного розкладання метану

$$CH_4 \rightarrow C_{(тв)} + 2H_2. \quad (3)$$

Схему термічного розкладання метану у пограничному шарі потоку газу і механізми насичення вуглецем і воднем металу стінки труби (зі сторони потоку газу) наведено на рис. 5.

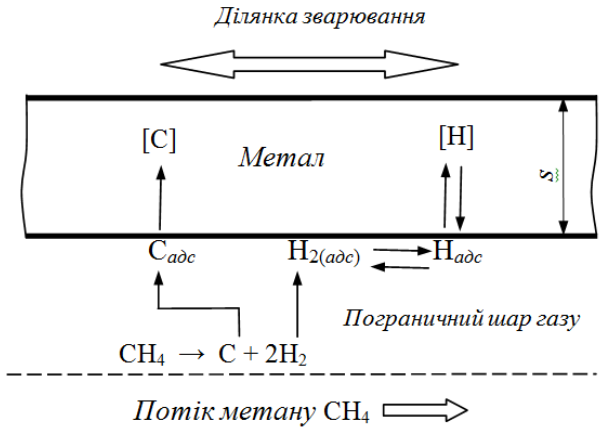


Рисунок 5 – Схема насичення металу воднем і вуглецем при термічному розкладанні метану

При проведенні зварювальних робіт на зовнішній поверхні труби під тиском газу за такою схемою може відбуватися локалізоване навуглецювання і наводнювання металу зі сторони внутрішньої поверхні труби.

Термодинамічні розрахунки. В табл. 1 наведено вихідні термодинамічні дані для компонентів реакції термічного розкладання метану.

Для розрахунків використаємо низку формул і рівнянь хімічної термодинаміки [16].

Енергію Гіббса розрахуємо за формулою Уліха

$$\Delta G^\circ_T = \Delta H^\circ_{298} - \Delta S^\circ_{298} \cdot T - \Delta C_{p298} \cdot T \cdot M_0, \quad (4)$$

де ΔH°_{298}, ΔS°_{298}, $\cdot \Delta C_{p298}$ – відповідно зміни ентальпії, ентропії і тепломності реакції в стандартних умовах

$$M_0 = \ln \frac{T}{298{,}16} - 1 + \frac{298{,}16}{T}. \quad (5)$$

Зміна ентальпії і ентропії реакції в стандартних умовах

$$\Delta H^\circ_{298} = \Delta H^\circ_{298(C)} + 2 \cdot \Delta H^\circ_{298(H_2)} - \Delta H^\circ_{298(CH_4)}; \quad (6)$$

$$\Delta S^\circ_{298} = S^\circ_{298(C)} + 2 \cdot S^\circ_{298(H_2)} - S^\circ_{298(CH_4)}. \quad (7)$$

Константа рівноваги реакції (3) визначається із співвідношення

$$K_p = \frac{a_c \cdot p^2_{H_2}}{p_{CH_4}}, \quad (8)$$

де a_c – активність вуглецю;

p_{CH_4} і p_{H_2} – відповідно парціальні тиски метану і молекулярного водню.

Прийнявши $a_c = 1$, запишемо

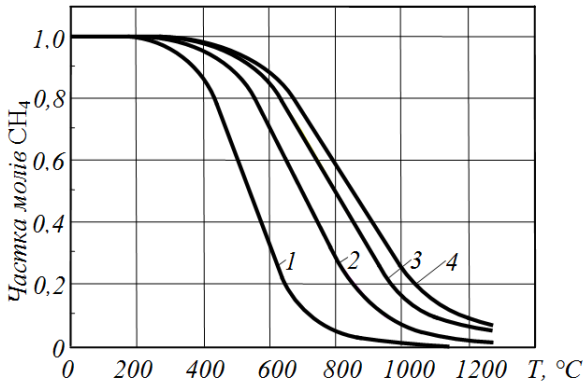
$$K_p = \frac{p^2_{H_2}}{p_{CH_4}}. \quad (9)$$

Для обчислення константи рівноваги реакції використано рівняння

$$\ln K_p = -\frac{\Delta G^\circ_T}{RT}, \quad (10)$$

де R – газова постійна (R = 8,31 Дж/(моль·К)).

За результатами розрахунків на рис. 6 наведено рівноважну діаграму термічного розкладання метану.



1– 1; 2– 10; 3– 30; 4– 50

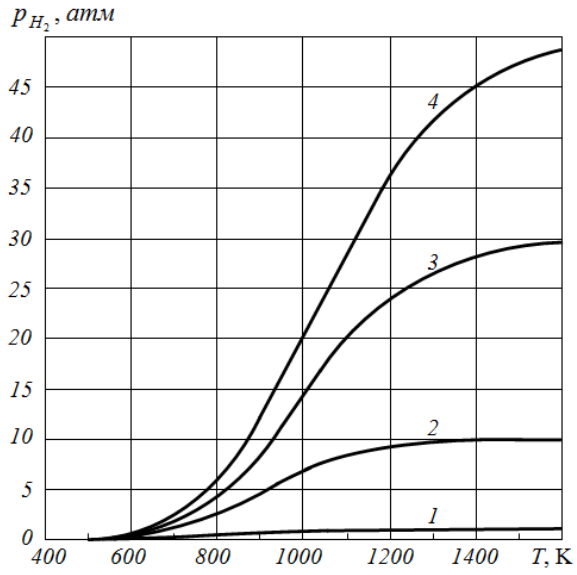
Рисунок 6 – Рівноважна діаграма розкладання метану $CH_4 = C + 2H_2$ за різних тисків, *атм*

При загальному тиску газової суміші

$$P = p_{CH_4} + p_{H_2} \quad (11)$$

з рівнянь (9) і (11) легко визначити парціальний тиск водню.

На рис. 7 побудовано графіки залежності парціального тиску молекулярного водню при термічному розкладанні метану за різних тисків газової суміші.



1–1; *2–10*; *3–30*; *4–50*

Рисунок 7 – Залежність парціального тиску H_2 від температури за тисків метану, *атм*

Таким чином, при термічному розкладанні метану в приповерхневому шарі газу в локальній області підвищених температур парціальний тиск молекулярного водню може досягати 10…15 атм. При такому тиску водню слід очікувати значного наводнювання металу в зоні термічного впливу, сформованої зі сторони внутрішньої поверхні труби. Це підтверджує результати досліджень [17], згідно яких при парціальних тисках молекулярного водню вище 7,5 атм ризик виникнення холодних (водневих) тріщин у цій зоні, може суттєво зрости.

Проаналізуємо окремі аспекти розчинності водню в залізі і низьковуглецевих сталях.

За законом Сівертса розчинність водню в металі описується формулою

$$[H] = K_p \cdot \sqrt{p_{H_2}} \,. \qquad (10)$$

Для розрахунку розчинності водню в чистому залізі або низьковуглецевих сталях можна використати залежності константи рівноваги реакції розчинення водню від температури для різних модифікацій вигляді [18]:

Модифікація заліза	$K_p = f(T)$, T, K
α	$\lg K_p = -1418/T + 1{,}628$
γ	$\lg K_p = -1182/T + 1{,}626$
δ	$\lg K_p = -1418/T + 1{,}628$
рідина	$\lg K_p = -1900/T + 2{,}423$

На рис. 8 побудовано графіки розчинності водню в залізі за різних тисків молекулярного водню. Вміст розчиненого водню в $см^3/100$ г отримано шляхом множення результатів розрахунку за рівнянням (10) на коефіцієнт 1,12.

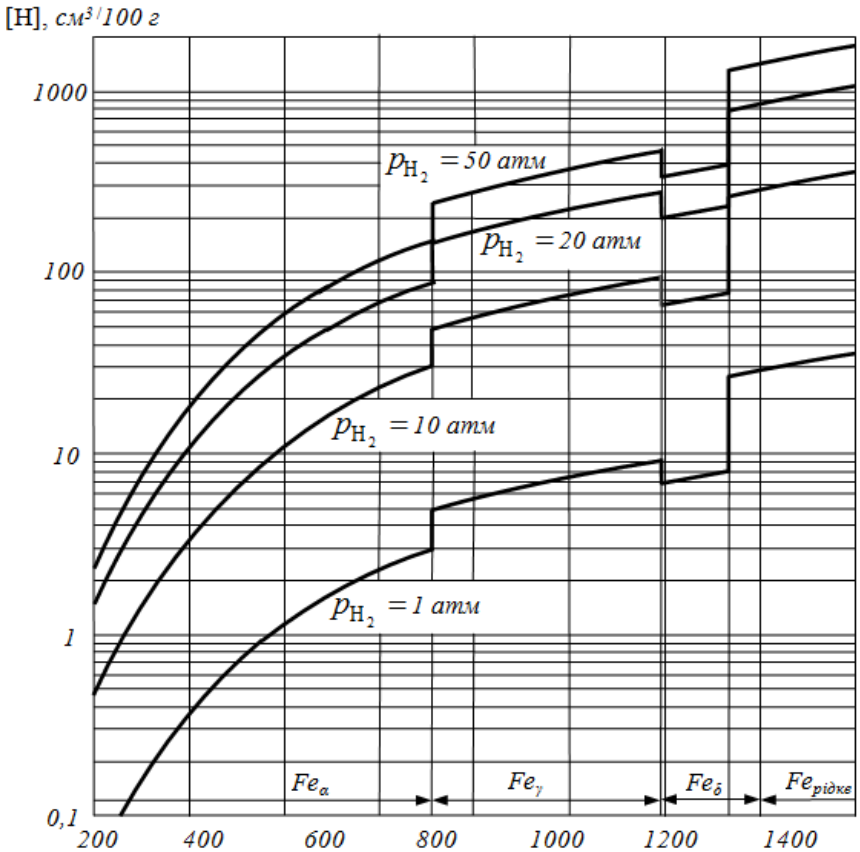


Рисунок 8 – Розчинність водню в залізі за різних тисків водню

З рисунка видно, що з ростом тиску молекулярного водню концентрація розчиненого водню в залізі суттєво зростає.

Згідно з сучасними уявленнями поглинання водню металом (окклюзія) визначається розташуванням атомів у міжвузольних пустотах кристалічної гратки (граткова розчинність), накопиченням у мікро- і макропустотах, адсорбцією на внутрішніх і внутрішніх поверхнях. За високих температур визначальною є граткова дифузія, за низьких – дефектність структури металу.

Розрізняють такі види внутрішніх пустот: а) пастки субмікроскопічних розмірів (скупчення вакансій і дислокацій, площини зсуву, границі зерен та ін.) і пори або колектори мікроскопічних розмірів (газові пори, пустоти в околі неметалевих включень і карбідів тощо). При переході в пастки водень залишається в атомарному стані. Процес зворотний, тобто можливий перехід водню у міжвузловий простір гратки. Перехід водню в колектори супроводжується його молізацією і здебільшого є незворотним процесом. В результаті захоплення водню пустотами його абсорбція в металі у багато разів більша, ніж граткова розчинність. Іншими словами, значна кількість водню, окрім дифузійно рухомого, закріплюється в різних пастках, наприклад дислокаціях, порах та інших мікропустотах. В більші пустоти, розташовані, наприклад, в околі неметалевих включень, зокрема сульфідів, дифузійний водень стікає, де молізується. Тиск дифузійного водню при переході в молекулярний стан проявляється в області перегріву зони термічного впливу в основному тоді, коли в ній утворюється мартенсит або тверда фаза розпаду типу нижнього бейніту.

В оглядовій статті [18] основоположним чинником водневої деградації вважається *прагнення водню в металах до локалізації*. Локалізація водню уможливлює значні зміни в матеріалах навіть за дуже малої загальної концентрації водню. Ефектів, що виникають при концентраціях водню в металах порядку 0,1…0,01 at.%, взагалі не існувало б за його рівномірного розподілу. Поведінку матеріалів визначає водень, локалізований у дефектах будови, а його середня концентрація (макроконцентрація) в металі загалом не відповідає мірі небезпеки водневої деградації. В зонах концентрації водню в металах його декогезійну дію можна розцінювати як руйнівну. Оскільки даний ефект дуже локалізований, то це ще не буде катастрофою, але створить передумови для несприятливого протікання в металах фізико-механічних процесів водневої деградації.

Як вже відмічалося вище, утворенню холодних тріщин у зварному з'єднанні сприяє дифузійний водень, який накопичується в зоні передруйнування і полегшує розвиток тріщини. Проте, окрихленню металу може сприяти водень, який накопичується в різних пастках-уловлювачах металу. Як показано в огляді [19], водень у вуглецевій сталі активно взаємодіє з вуглецем твердого розчину, утворюючи при цьому вуглець-водневі сполуки . Така взаємодія найбільш можлива в дефектах гратки (границі зерен і блоків, дислокації, вакансії тощо), де сегрегація і активність вуглецю найвища. В умовах деформування (локальна пластична деформація розтягуванням та ін..) або за наявності сильно спотвореної гратки, наприклад міжзеренної зони, відбувається посилене захоплення вуглецю скопиченнями дефектів (дислокаціями, вакансіями) і більш глибока хімічна взаємодія водню з вуглецем твердого розчину з виділенням вільних радикалів та вуглеводнів (при понижених чи кімнатних температурах).

Необхідно додати, що на даний час започатковуються нові дослідження закономірностей фізичного старіння низьколегованих сталей, які супроводжуються, зокрема, утворенням карбогідридоподібних наносегрегацій на дислокаціях і границях зерен [20].

Беручи до уваги, що ремонтно-зварювальні роботи проводяться на газопроводах зі значним ступенем фізичного старіння, яке, за класичним трактуванням, "зумовлено термодинамічною нерівноважністю вихідного стану і поступовим наближенням структури до рівноважного стану в умовах достатньої дифузійної рухливості атомів" [21], процес наводнювання сталей магістральних газопроводів відбувається в умовах розвитку в металі на структурному рівні пасток-уловлювачів водню.

Наступним етапом роботи передбачається математичне моделювання дифузійних процесів для аналізу кінетики насичення металу вуглецем і воднем в результаті термічного розкладання метану в пристінній зоні ділянки зварювання.

Висновки

1. Проаналізовано основні ризики і технологічні складнощі при виконанні зварювальних робіт на газопроводах під тиском газу. Описано реакцію металу трубних сталей на термічний цикл зварювання і чутливість низьколегованих трубних сталей до утворення холодних тріщин у зварному з'єднанні.

2. Розглянуто схему термічного розкладання метану в пристінній зоні труби при проведенні ремонтно-зварювальних робіт на поверхні газопроводів. Термодинамічним аналізом обґрунтовано, що утворюваний при розкладанні метану водень можна розглядати як джерело наводнювання металу зварного з'єднання.

3. Описано порядок розрахунку парціального тиску молекулярного водню за різних тисків метану. Показано, що в залежності від внутрішнього тиску газу трубопроводі в нагрітій зоні зварювання парціальні тиски молекулярного водню як продукту термічного розкладання метану можуть складати 1,0…1,5 МПа. При цьому ризик утворення холодних тріщин в металі суттєво зростатиме.

Література

1 Бут В. С. Присоединение дуговой сваркой отводов к магистральным нефтепроводам под давлением. / В. С. Бут – М.: ВНИИОЭНГ, 1991. – 89 с.

2. Kiefner J. F., Fisher R. D. Models aid pipeline repair welding procedures//Oil & Gas Journal.– 1988.–86(10).– P. 41–47.

3 Updated pipeline repair manual.Final Report R 2269-01R. Pipeline research counsil internacional, Inc. Arlington, Virginia. 2006 196 p.

4 Бут В. С. Обоснование применения дуговой сварки при ремонте магистральных трубопроводов под давлением / В. С. Бут, А. В. Щербак // Экспозиция. Нефть. Газ. – 2007. – 17(37). – Август. – С. 38–40.

5 Махненко В. И. Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций / В. И. Махненко. – Киев: Наукова думка, 2006. – 618 с.

6 Бут В. С. Стратегія розвитку технологій ремонту діючих магістральних трубопроводів. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд і машин / В. С. Бут, О. І. Олійник // Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2004–2006 рр. – Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2006. – С. 491–496.

7 Kiefner J. F. Effects of flowing product on line weldability/ aid pipeline repair welding procedures / Oil & Gas Journal. – 1988. – 86(29). – P. 49–54.

8 Cola M. Development of simplified weld cooling rate models for in-service gas lipelines / M. J. Cola, W. A. Bruce, J. F. Kiefner, R. D. Fisher et al. // Report Numbers AGA-93007083/ – 1992. – 155 p.

9 Bruce W. A. Guidelines for pipeline repair by direct deposition of weld metal / W. Bruce, W. Amend // Presented at WTIA/APIA Welded Pipeline Symposium [J]. Welding Institute of Australia. – Sydney, Australia, April 3, 2009.

10 Bang I.-W., Son Y.-P., OH K. H., Kim Y.-P., Kim W.-S. Numerical simulation of sleeve repair welding of in-service gas pipelines // Welding Journal. – 2002. – No 2. – P. 273–282.

11 Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей / Э. Л. Макаров. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.

12 Гривняк И. Свариваемость сталей / И. Гривняк; Пер. со словац. – М.: Машиностроение, 1984. – 216 с.

13 Welding Handbook. Vol. 4: Materials and Applications. Part 2. – 8th ed. – Miami, AWS, 1998. – 621 p.

14 Махненко В. И. Поведение водорода при ремонтной сварке магистральных трубопроводов под давлением / В. И. Махненко, О. И. Олейник, А. П. Пальцевич // Автоматическая сварка. – 2011. – № 9. – С. 5–9.

15 Кузюков А. Н. Водородное разрушение сталей в условиях транспортировки природного газа / А. Н. Кузюков, В. А. Борисенко и др. // Тр. V Международ. конф. “Водородная экономика и волородная обработка материалов”. – Донецк, Украина, 2007. Т. 2. – С. 861–865.

16 Рябин В. А. Термодинамические свойства веществ: Справочник / В. А. Рябин, М. А. Остроумов, Т. Ф. Свит – Л.: Химия, 1977. – 392 с.

17 Timmins P. F. Solutions to hydrogen attack in steels. AMS. Asm Intl. 1997. – 225 p.

18 Ткачов В. І. Проблеми водневої деградації металів / В. І. Ткачов // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2000. – № 4. – С. 7–14.

19 Миндюк А. К. Об углерод-водородном влиянии на прочностные и коррозионно-механические свойства стали. – Львов: ФМИ АН УССР, 1978. – 44 с. – (Препринт № 12 / АН УССР. ФМИ).

20 Нечаев Ю. С. Актуальные проблемы старения, водородного охрупчивания и стресс-коррозионного поражения сталей и эффективные пути их решения / Ю. С. Нечаев // Альтернативная энергетика и экология. – 2007. – № 11 (55). – С. 108–117.

21 Скаков Ю. А. Старение металлических сплавов / Ю. А. Скаков // Металловедение (материалы симпозиума). – М.: Металлургия, 1971. – С. 118–132.

Стаття надійшла до редакційної колегії 17.10.14
Рекомендована до друку професором ***Грудзом В.Я.*** *(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*
канд. техн. наук ***Костівим В.В.*** *(УМГ «Прикарпаттрансгаз», м. Івано-Франківськ)*