

$$\tau_{зр} < [\tau_{зр}], \quad (32)$$

де  $[\tau_{зр}]$  — допустиме напруження зрізу матеріалу фланця і кришки — сталь 20 [2].

Таким чином, використовуючи наведену вище методику, можна провести розрахунки запасу міцності гвинтів, напружень змінання та зрізу бугельного з'єднання мобільних камер запуску та прийому очисних пристроїв.

УДК 621.791

## РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ МІЦНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ ТРУБОПРОВОДІВ

В.Ю.Чернов, Л.С.Шлапак

ІФІТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422)  
e-mail: public@ifdtung.if.ua

*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 оптимальные области для обеспечения ударной вязкости и кривые охлаждения с указанием достигаемой при этом твердости, что гарантирует получение необходимых механических свойств сварных соединений при отсутствии вероятности образования холодных трещин в широком интервале температур (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ).*

Забезпечення довговічності й надійності промислових трубопроводів значною мірою визначається раціональним вибором конструкційних матеріалів спільно з оптимальними варіантами технологічних умов монтажного зварювання.

Відсутність науково обґрунтованих критеріїв вибору технологічних варіантів зварювання при негативних температурах ускладнює розробку оптимальної технології і найчастіше призводить до невиправданого і значного подорожчання монтажу трубопроводів через здійснення додаткових заходів (попереднього і післязварювального нагрівання, теплоізоляції монтажних стиків та ін.).

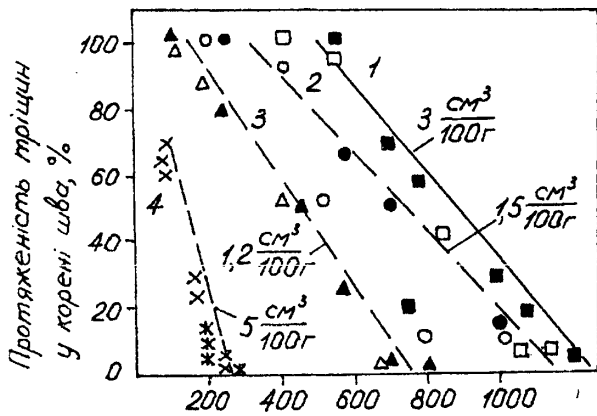
Аналіз літературних джерел і результати власних досліджень свідчать, що для оцінки технологічного варіанта зварювання і визначення обґрунтованих умов для попередження утворення тріщин варто застосовувати показник  $\sigma_{pmin}$ , що характеризує опір сталі утворенню холодних тріщин. Параметр  $\sigma_{pmin}$  залежить від хімічного складу основного і наплавленого металу, режиму зварювання і температури середовища. Його доцільно використовувати як критерій тріщиностійкості при виборі технології зварювання трубопроводів при низьких температурах повітря. Авторами даної ро-

### Література

1. Голубев А. И., Кондаков Л. А. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник. — М.: Машиностроение, 1986.
2. Анурьев В. И. Справочник конструктора машиностроителя. — М.: Машиностроение. — Т.1. — 1982.

*Developed scientifically proved practical recommendations for increase technological the durabilities of industrial pipelines, which consist in a product to optimum technical variant welding with use thermo-kinetics of the diagrams welded (cooked) steels, on which put optimum areas for maintenance of shock viscosity and curve coolings with a designation achieved thus of hardness, which guarantee receptions necessary mechanical from service properties welded connections because of absence of probability of formation (education) of cold cracks in a wide interval of temperatures (up to  $-60^{\circ}\text{C}$ ).*

боти встановлено, що технологічний варіант зварювання кореневих швів трубопроводів з низьколегованих сталей звичайної і підвищеної міцності, який забезпечує показник  $\sigma_{pmin} > 300 \text{ МПа}$ , дає змогу одержати зварні з'єднання з високою тріщиностійкістю (при  $[H]_{\text{диф}} < 5 \text{ см}^3/100\text{г}$ ). Для промислових і магістральних нафтопроводів  $\varnothing 114...512 \text{ мм}$  і з товщиною стінки до 16 мм критичне значення  $\sigma_{pmin}$  при низьких температурах (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ) дорівнює 360...400 МПа. Крім того, встановлено, що режим підігріву монтажних стиків, який виключає появу тріщин при зварюванні в зимовий період, необхідно вибирати, виходячи з тривалості охолодження металу шва від 300 до  $100^{\circ}\text{C} - t_{100}^{300}$  (рис. 1). Зі збільшенням тривалості охолодження металу шва від 300 до  $100^{\circ}\text{C}$  підвищується виділення водню в навколишню атмосферу і знижується його вміст у зварному з'єднанні. Так, підвищення температури підігрівання на 60...80 $^{\circ}\text{C}$  при зварюванні в умовах негативних температур порівняно зі звичайними умовами призводить до однакової тривалості охолодження наплавленого металу в інтервалі від 300 до  $100^{\circ}\text{C}$ , що сприяє зменшенню вмісту водню в зварних швах нижче критичного і запобігає утворенню холодних тріщин.



х ● ■ ▲  $T_{сер} = -40^\circ C$  ж ○ □ △  $T_{сер} = -20^\circ C$

Рисунок 1 — Вплив часу охолодження металу шва  $t_{100}^{300}$  на схильність зварних з'єднань до холодних тріщин.

Сталі: 1-3 — 17Г1С,  $\delta = 14$ мм; 4 — 09Г2С,  $\delta = 12$ мм. Електроди: 1,4 — УОНИ-13/55; 2 — АНО-ТМ; 3 — ОК53.40

Статистична обробка результатів випробувань, викладених у роботах [1, 2], дала змогу установити кореляцію між параметром  $\sigma_{pmin}$  і тривалістю охолодження зварного шва від 300 до 100°C ( $t_{100}^{300}$ )<sub>кр</sub>, перевищення якої запобігає процесу тріщиноутворення при зварюванні трубопроводів у трасових умовах

$$\left(t_{100}^{300}\right)_{кр} = 7000 - 2500 \lg \sigma_{pmin}, \text{ с, (1)}$$

(сталь 14Х2ГМР:  $g_{nor} = 1,2 \dots 2,1$  мДж/м,  $[H]_{доф} = 1,0 \dots 3,0$  см<sup>3</sup>/100г;  $\delta = 10 \dots 25$  мм);

$$\left(t_{100}^{300}\right)_{кр} = 5200 - 2000 \lg \sigma_{pmin}, \text{ с, (2)}$$

(для сталей 09Г2С; 10Г2С1; 17Г1С, 10ХСНД і 14Г2САФ:  $[H]_{доф} = 1 \dots 8$  см<sup>3</sup>/100г;  $g_{nor} = 1,2 \dots 2,1$  мДж/м;  $\delta < 20$  мм).

Співвідношення (1) і (2) дають можливість вибрати оптимальний варіант технології зварювання трубопроводів (без попереднього підігріву) шляхом підбору сталей і низьководневистих електродів, які забезпечують необхідну технологічну міцність зварного з'єднання за умови  $\sigma_{pmin} = \sigma_T$  (для високоміцної сталі) і  $\sigma_{pmin} \geq 350$  МПа або  $\sigma_{pmin} > 0,8\sigma_T$  (для сталей підвищеної міцності) (рис. 2, 3).

Температуру підігріву монтажних стиків можна розрахувати згідно з виразом

$$T_{під} = 2000 - 700 \lg \sigma_{pmin} \quad (3)$$

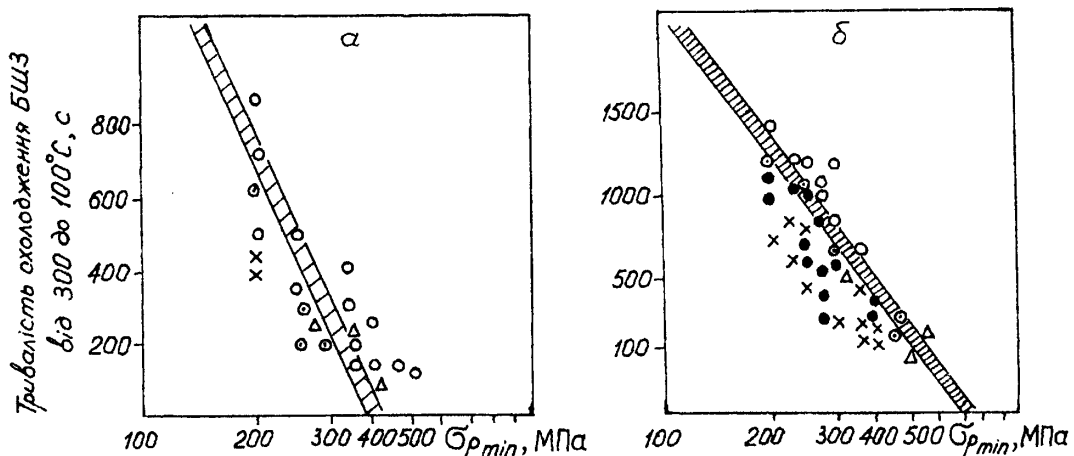
(для високоміцної сталі, наприклад, 14Х2ГМР);

$$T_{під} = 1700 - 6600 \lg \sigma_{pmin} \quad (4)$$

(для низьколегованих сталей підвищеної міцності).

Отже, на основі залежностей (1-4) при розрахунку значення параметра  $\sigma_{pmin}$  можна визначити критичний час охолодження зварного з'єднання в діапазоні 300...100°C і режим попереднього нагрівання сталі, які усувають виникнення холодних тріщин при монтажному зварюванні на морозі (до -50°C).

Приведені співвідношення можна використувати для низьколегованих сталей широкого класу, які відповідають за хімічним складом досліджуванім сталям. З огляду на те, що чимало авторів [3, 4] параметри ( $t_{100}^{300}$ )<sub>кр</sub> і  $\sigma_{pmin}$

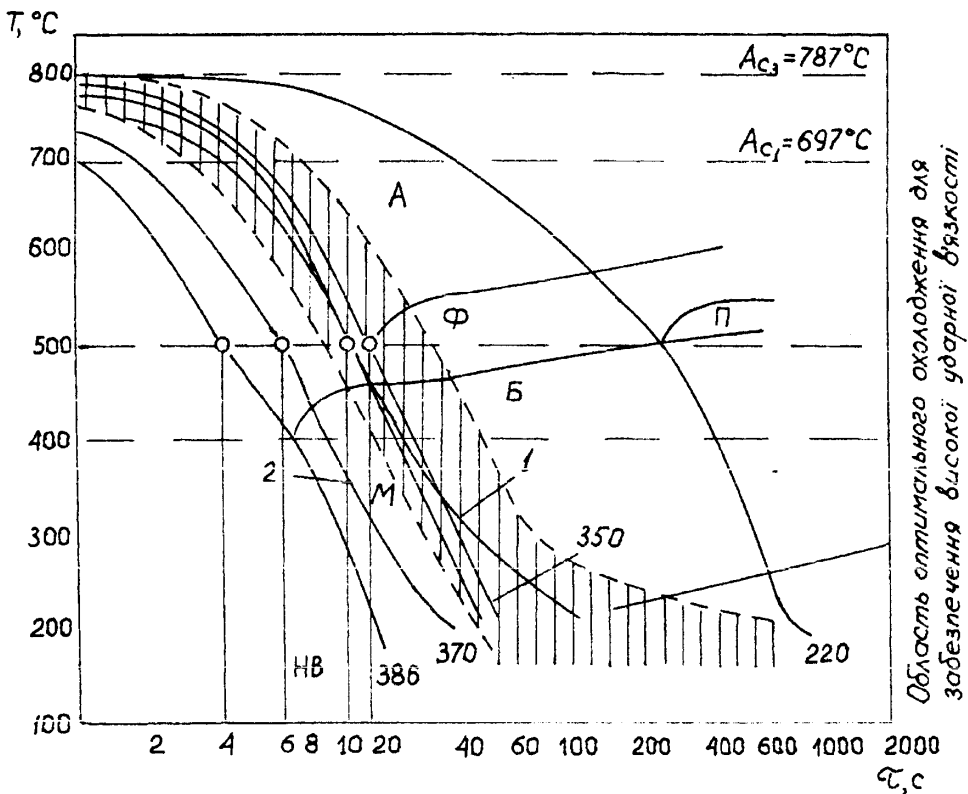


а — підвищена (17Г1С, 14Х2ГМР —  $\delta=12$ мм) міцність;

б — висока (17Г1СУ, 14Х2ГМР —  $\delta=14$ мм) міцність

Відсоток тріщиноутворення: ○ — 0%; ⊙ — 1...2%; △ — 3...10%; ● — 11...30%; х — 31...100%

Рисунок 2 — Співвідношення між параметром  $\sigma_{pmin}$  і критичною тривалістю охолодження ( $t_{100}^{300}$ ) для сталей різної міцності



А – аустеніт; Ф – ферит; Б – бейніт; П – перліт; М – мартенсит; НВ – твердість за Брінелем  
 1 – критична крива охолодження для попередження тріщин у корені шва й у ЗТВ;

2 – критична крива охолодження для забезпечення пластичності шва

Штрихування – область оптимального охолодження для забезпечення високої ударної в'язкості

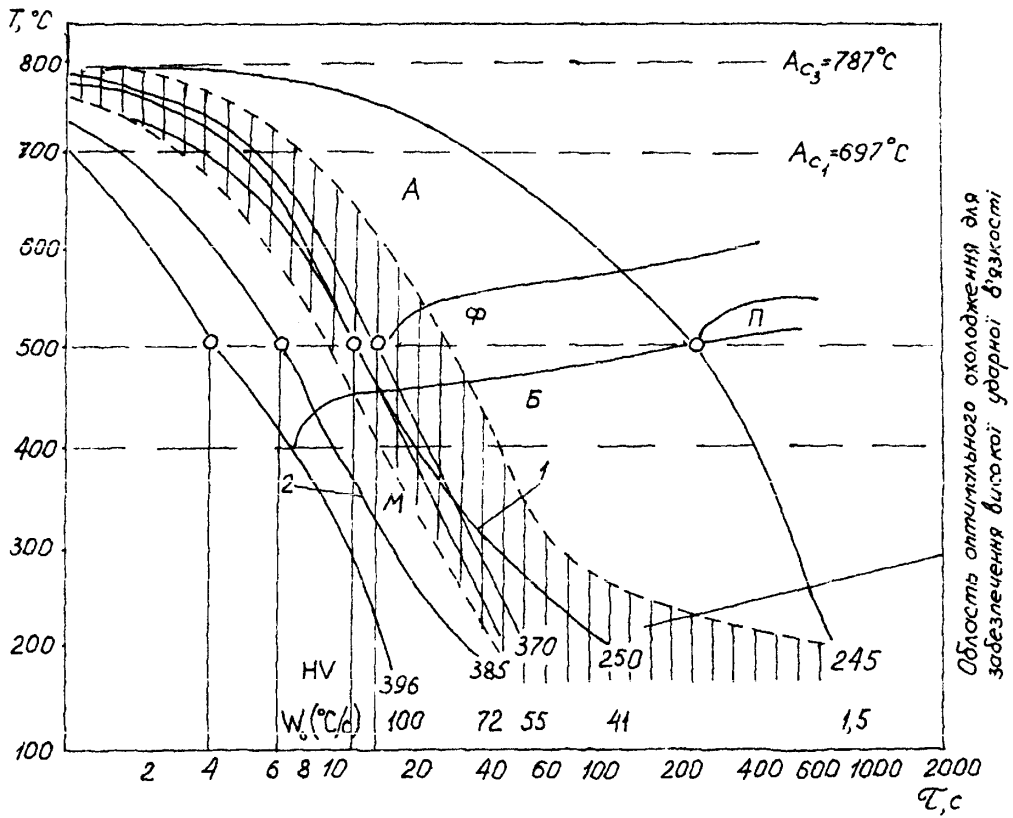
**Рисунок 3 — Типова термодинамічна діаграма розпаду аустеніта для сталі 17Г1С**

відпрацьовували на високоміцних сталях, що використовуються для виготовлення газопроводів великого діаметра ( $\varnothing 1220 \times 12 \dots 20$  мм) з Х-подібним обробленням крайок, нами придатність запропонованого методу вибору оптимального варіанта технології перевірялася в процесі зварювально-монтажних робіт при спорудженні нафтопроводів у трасових умовах за температури  $-35 \dots -45^\circ\text{C}$ . Для цього виконували зварювання монтажних стиків промислових нафтопроводів зі сталей 09Г2С і 17Г1С діаметрами  $210 \times 12$  мм і  $320 \times 14$  мм відповідно. При цьому здійснювали підігрівання стиків труб до  $100^\circ\text{C}$  у відповідності зі співвідношенням (4). При зварюванні труб з цих сталей і в процесі вилежування й експлуатації трубопроводів тріщини в кільцевих швах і біляшовній зоні (БШЗ) не спостерігалися.

На нашу думку, для реалізації зварювання трубопроводів без попереднього підігріву необхідно застосовувати електроди, що формують метал шва з низьким вмістом дифузійно-рухливого водню і сталі з високою тріщиностійкістю. Умова вибору технологічного варіанта зварювання без підігріву:  $\sigma_{pmin} \geq \sigma_T$  (високоміцна сталь) і  $\sigma_{pmin} > 0,8\sigma_T$  (сталі підвищеної міцності).

Сталі 09Г2, 09Г2С, 17ГС, 17Г1С, 10Г2С1 при зварюванні низьководневистими електродами фтористо-кальцієвого виду (УОНИ-13/55, АНО-ТМ, АНО-26, ОК 53.70, ОК 73.68) характеризуються показником технологічної міцності  $\sigma_{pmin} = 480 \dots 520$  МПа. Тому зварювання труб з цих сталей із застосуванням вказаних електродів може здійснюватись без попереднього підігріву. В умовах низьких температур повітря холодні тріщини в зварних швах труб з названих сталей з товщиною стінки до 16мм не були виявлені.

Відомо, що оптимальні значення лінійної енергії зварювання і попереднього підігріву можуть бути визначені з аналізу діаграм анізотермічного розпаду аустеніту, приведених до термічного циклу зварювання. Такі діаграми для прогнозування структури, механічних властивостей, опірності БШЗ холодним тріщинам повинні бути доповнені результатами металографічного аналізу, виміру твердості, випробувань на уповільнене руйнування, визначення концентрації розчиненого водню в металі. Існує кількісний взаємозв'язок між різними факторами тріщиностійкості, який може бути використаний для вибору оптимальних режимів зварювання монтажних стиків трубопроводів в умовах від'ємних температур повітря, зокрема [5]



1 – критична крива охолодження для попередження тріщин у корені шва й у ЗТВ;

2 – критична крива охолодження для забезпечення пластичності шва

Штрихування – область оптимального охолодження для забезпечення високої ударної в'язкості

Рисунок 4 — Термокінетична діаграма сталі 09Г2С, доповнена даними про вплив швидкості охолодження утворення холодних тріщин, пластичність і ударну в'язкість біляшовної зони

$$M = 460C^2 + 455CH_{диф} + 216 + (H_{диф})^2 - 526C - 456H_{диф} + 169,$$

де:  $M$  – кількість мартенситу в структурі, %;  
 $C$  – зміст вуглецю в сталі, %;  
 $[H_{диф}]$  – концентрація дифузійного водню,  $см^3/100г$ .

Для визначення залежності між твердістю і швидкістю охолодження металу БШЗ, а також товщиною металу користуються методикою, в основу якої покладено зварювання клиноподібної проби [6].

Нанесення на термокінетичні діаграми сталей, що зварюються, кривих охолодження з вказівкою отриманої при цьому твердості дає можливість визначити структуру металу в різних зонах зварного з'єднання, його твердість і призначити припустимі швидкості охолодження.

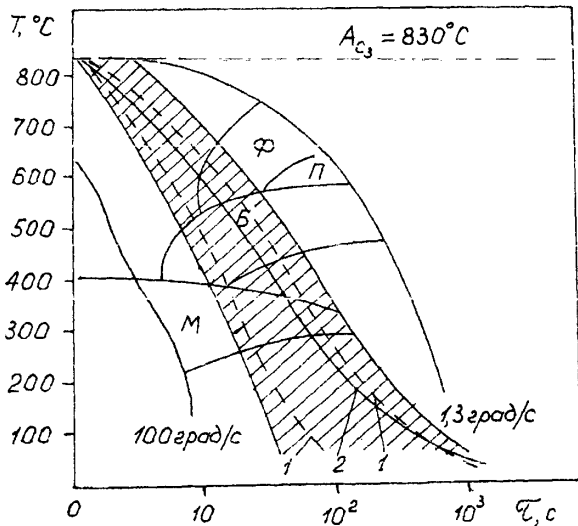
Практичні рекомендації з технології зварювання нами розроблялися з урахуванням всіх особливостей зварюваності трубних сталей. Найбільш повні відомості про зварюваність отримуються за допомогою термокінетичних діаграм сталей, доповнених даними, що дають змогу вибрати оптимальні умови зварювання і гарантують одержання необхідних механічних і

службових властивостей зварних з'єднань за відсутності імовірності утворення холодних тріщин. Деякі з таких діаграм представлені на рис. 3 і 4 для трубних сталей 17Г1С і 09Г2С. Область з оптимальною стійкістю проти крихкого руйнування і високою холодостійкістю металу БШЗ заштрихована: усередині знаходиться критична крива охолодження, нижче якої запобігається утворення біляшовних холодних тріщин у корені шва. Критична крива охолодження для забезпечення необхідної пластичності шва знаходиться на ділянці з більш низькими швидкостями охолодження. Однак зсув в області з малими швидкостями охолодження пов'язаний з ростом зерна, а, отже, зі зниженням холодостійкості зварних швів. З урахуванням цього варто застосовувати оптимальний тепловий режим зварювання.

Отже, запропонований метод вибору технологічного варіанта зварювання, апробований у трасових умовах на монтажі промислових нафтопроводів, може бути використаний для оптимізації технологічних режимів зварювання нафтопроводів в умовах низьких температур, які забезпечують підвищену технологічну міцність і експлуатаційну надійність.

Комплексними дослідженнями встановлено, що зниження вмісту водню у швах дає змогу істотно збільшити область оптимальних умов

зварювання для одержання зварних з'єднань без холодних тріщин. Наприклад, використання низьководневистих електродів з покриттям основного виду АНО-ТМ [16,17] для зварювання сталі 17Г1С допускає зварювання при низьких температурах трубопроводу з товщиною стінки до 12 мм без попереднього підігріву. У той же час, режим підігріву повинен вибиратися, виходячи з критичної тривалості охолодження металу шва в інтервалі 300...100°C, вище якої тріщини не утворюються (рис. 5). Ці оптимальні умови дають змогу забезпечити тріщиностійкість швів при зварюванні в зимовий період із застосуванням низьководневистих електродів ( $H_{диф} < 3 \text{ см}^3/100\text{г}$ ).



Штрихування – область одержання рівномірних і холодостійких з'єднань;  
1 – критична крива при низьких температурах;  
2 – те ж саме в звичайних умовах

**Рисунок 6 — Узагальнена діаграма сталі 17Г1С для визначення оптимальних умов зварювання**

Системне дослідження зварюваності низьколегованих трубних сталей при низьких температурах повітря і багаторічний досвід впровадження, накопичений при виготовленні нафтопроводів в умовах Самотлорського родовища, дають можливість сформулювати основні положення технології зварювання, яка знижує водневу крихкість і підвищує тріщиностійкість зварених з'єднань:

- зменшення рівня дифузійного водню в металі шва різними технологічними способами, викладеними вище.
- зменшення швидкості охолодження, що дає змогу 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 супутного підігріву (до 100...200°C), що знижує водневу крихкість, викликану дифузійним і молекулярним воднем;

- проведення “відпочинку” зварних з'єднань безпосередньо після зварювання при підвищеній температурі, у процесі якого виділяється дифузійний водень;

- режим зварювання варто вибирати з урахуванням того, що на кожні 10 градусів підвищення температури повітря варто зменшувати лінійну енергію зварювання на 3...5% за рахунок зниження величини зварювального струму. Так, зварювання низьколегованих сталей класу С52/40, С60/45, С70/50 варто виконувати фтористо-кальцієвими електродами з лінійною енергією 1.3...2.5 мДж/м;

- застосування для виготовлення труб холодостійких сталей, що характеризуються підвищеною стійкістю до водневого окрихчування при від'ємних температурах повітря.

Конкретні відомості про технологію зварювання при низьких температурах викладені в розроблених авторами спільно з фахівцями ВАТ «НижнесвартівськНДПНафта» рекомендаціях з виконання зварювально-монтажних робіт при виготовленні і ремонті зварених металоконструкцій нафтогазових об'єктів, призначених для роботи в складних природно-кліматичних умовах.

### Висновок

Розроблені науково обґрунтовані практичні рекомендації для підвищення технологічної міцності промислових трубопроводів, які полягають у виборі оптимального технологічного варіанта зварювання з використанням термокінетичних діаграм сталей, що зварюються, і на яких нанесені криві охолодження з вказівкою забезпеченої при цьому твердості, що гарантує одержання необхідних механічних властивостей зварних з'єднань за відсутності ймовірності утворення холодних тріщин у широкому інтервалі температур (до -60°C).

### Література

1. Ларионов В.П., Слепцов О.И. О критериях оценки склонности к образованию холодных трещин низколегированных сталей при сварке в условиях низких температур. В кн.: Сварка и хрупкое разрушение. – Якутск: Изд-во ЯФСО АН СССР, 1980. – С.3-9.
2. Слепцов О.И. Исследования образования холодных трещин и разработка технологии сварки низколегированных сталей при низких температурах воздуха // Автореф. канд. дисс. – К., 1981. – 20 с.
3. Слепцов О.И., Тулохолов К.П. О сопротивляемости низколегированных сталей 17Г1С и 10Г2С1 образованию холодных трещин при сварке в условиях низких температур. В кн.: Хрупкое разрушение металлов при низких температурах. – Якутск: Изд-во ЯФСО АН СССР, 1976. – С. 68-74.
4. Тарлинский В.Д., Капинос Д.Б. Экспериментальное изучение влияния водорода на работоспособность трубных сталей и зоны термического влияния сварных соединений. В кн.:

Устойчивость против коррозионного растрескивания сварных соединений трубопроводов и роль водорода при электродуговой сварке. – М.: ВНИИСТ, 1969. – С. 150-181.

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

6. Тарлинский В.Д., Капинос Д.Б., Сбарская Н.П. Применение пробы Теккен для оценки трубопроводных сталей классов X-60, X-65 к образованию холодных трещин при сварке // Автоматическая сварка. – 1976. – №8. – С. 26-29.

УДК 622.289

## ВИГИН БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ ТА ВИБІР ТРАЄКТОРІЇ БУРІННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО БІЧНОГО СТОВБУРА СВЕРДЛОВИНИ

В.Г.Глушич

ДАТ "Чорноморнафтогаз", АР Крим, м. Сімферополь, пр-т. Кірова, 52,  
тел. (0652) 533620

Приводятся результаты аналитических исследований изгиба бурильной колонны в горизонтальном стволе скважины. Установлено, что определяющим фактором продольного изгиба бурильной колонны является кривизна самой скважины. Если кривизна оси ствола скважины приближается к максимальной кривизне участка выпучивания бурильных труб, то возможен резкий изгиб бурильной колонны, приводящий к ее распору в стволе скважины.

Предложен метод определения критических значений параметров искривления горизонтального ствола скважины. Впервые при анализе траектории ствола скважины учитывается кручение, определяющее пространственное отклонение оси в конкретной точке от соприкасающейся плоскости.

Метод был использован при выборе параметров траектории горизонтальных боковых стволов скважин 21 и 22 Штормовая, расположенных на шельфе Черного моря.

За певних умов бурильна колона, яка розташована в горизонтальному стовбурі, може втратити стійкість, вигнутись і впертись у стінку свердловини. Різне збільшення площі контакту бурильної колони зі стінкою свердловини і сил реакції призводить до відповідного збільшення сил тертя. Причому подальше збільшення проштовхувальної сили з метою збереження осьового навантаження на долото сприяє зростанню сил тертя аж до заклинювання бурильної колони в стовбурі свердловини і повного припинення процесу буріння.

Розглянемо умови, за яких може виникнути прогин ділянки бурильної колони в горизонтальному стовбурі свердловини та його відрив в раніше невідомому місці.

Математичне дослідження форми ділянки відриву бурильної колони, розташованої в горизонтальному стовбурі свердловини, зводиться до розв'язування крайової задачі для лінеаризованого диференціального рівняння згину пружного стрижня під дією стискаючої сили і поперечного навантаження під дією власної ваги (2)

In the paper are given results of analytical investigations of drill string buckling in the horizontal borehole. It is determined that the crucial factor of drill string buckling is a tortuosity of the well bore itself. If the tortuosity of s borehole axis approaches the maximal tortuosity of the buckling section of the drill pipe, then a sharp bend of drill string is possible, which leads to a force impact on the walls in the well bore.

A method is put forward for determining critical values of horizontal drill string buckling parameters in the borehole. For the first time while analyzing a trajectory of the borehole torsion is taken into consideration. The torsion determines a spatial deviation of the well bore axis at a particular point from an osculating plane.

$$EJ \cdot Y^{(4)} + P \cdot Y^{(2)} = -q, \quad (1)$$

де:  $EJ$  – жорсткість бурильної труби на згин,  $\text{кН} \cdot \text{м}^2$ ;

$q$  – вага лінійного метра,  $\text{кН/м}$ ;

$P$  – осьова стискаюча сила,  $\text{кН}$ .

Відповідно до розрахункової схеми (рис. 1) граничні умови мають такий вигляд:

$$Y_{(0)} = Y_{(0)}^{(1)} = Y_{(0)}^{(1)} = 0 ; \quad (2)$$

$$Y_{(2L)} = Y_{(2L)}^{(1)} = Y_{(2L)}^{(1)} = 0 .$$

Аналітичний розв'язок рівняння (1), який задовольняє граничним умовам (2), може бути записаний у вигляді

$$Y = -\frac{qEJ}{P^2} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{P}{EJ}} \cdot X\right) - \frac{qL\sqrt{EJ}}{P\sqrt{P}} \times \times \sin\left(\sqrt{\frac{P}{EJ}} \cdot X\right) - \frac{q}{2P} \cdot X^2 + \frac{qL}{P} \cdot X^2 + \frac{qEJ}{P^2} . \quad (3)$$