

ОСОБЛИВОСТІ АВАРІЙНОГО РУЙНУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТРУБОПРОВОДУ

М.Д. Рабкіна, В.А. Костін, Т.Г. Соломійчук

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Аналіз виходу з ладу технологічного трубопроводу, що включає дослідження властивостей, хімічного складу і структури металу зварних з'єднань, а також осередку руйнування і характеру поширення тріщини, дозволив встановити найбільш ймовірні причини, що призвели до його передчасної відмови. Припущено, що такими причинами є дефект в поздовжньому зварному шві; залишкові напруження в трубі, що виникли в результаті місцевої термообробки монтажного кільцевого шва, а також ймовірні поздовжні напруження, що виникають внаслідок прогину трубопроводу між опорами; режим експлуатації, при якому температура в трубопроводі змінюється від атмосферної до 500 °С. Бібліогр. 9, табл. 4, рис. 7.

Ключові слова: технологічний трубопровід; поздовжні і кільцеві зварні з'єднання; дефекти в зварних з'єднаннях; несплавлення; структурна неоднорідність; розшарування; руйнування

Можливі відмови, зупинки та аварії, а також розміри і наслідки позаштатних ситуацій на газонафтопроводах як магістральних, так і внутрішньо заводських, в значній мірі залежать від якості і властивостей металу труб [1, 2]. При проведенні комплексного опресування технологічного трубопроводу (після експлуатації в цілому близько 2,5 років) технічним азотом під тиском $P = 10^2$ МПа [3], відбулася його аварійна розгерметизація. Аналіз інформації дозволив припустити, що основними факторами, які могли призвести до руйнування трубопроводу, крім можливої невідповідності властивостей самого металу заявленим вимогам, ймовірні: термічна обробка монтажних кільцевих зварювальних з'єднань (високе відпускання – нагрівання до температури 760 ± 20 °С при трьохгодинній витримці), що проводиться при зварюванні трубних блоків; температурний режим технологічної лінії, при якому температура труби в зоні руйнування періодично варіювалася від температури навколишнього середовища до 500 °С; наявність згинальних напружень в зоні опір.

Попередній візуальний аналіз характеру руйнування показав, що руйнування пройшло як по основному металу, так і по зоні термічного впливу, а також по кільцевому монтажному зварному шву (рис. 1). При цьому осередок руйнування не був встановленим. Труби на монтаж поставлялися у вигляді блоків з декількох обичайок після зварювання на заводі-постачальнику. Потім ці блоки зварювалися монтажними кільцевими швами.

Мета досліджень – встановлення відповідності параметрів вихідного матеріалу заявленим (стандартним) значенням, виявлення осередку руйнування, характеру поширення тріщини, а також з'ясування можливих причин розгерметизації технологічного трубопроводу.

Методи досліджень. Із темплетів, вирізаних з дефектної ділянки труби технологічного трубопроводу діаметром 1020 мм і товщиною стінки 10 мм були виготовлені зразки для досліджень.

Визначення хімічного складу металу фрагментів проводилось на рентген-флуоресцентному спектрометрі СЕР-01 «Elvax Light» і аналізаторі вуглецю ГОУ-1. Результати спектрального аналізу ділянок труби наведені в табл. 1, де указано вміст хімічного елементу у відібраній пробі.

Визначення хімічного складу металу фрагментів проводилось на рентген-флуоресцентному спектрометрі СЕР-01 «Elvax Light» і аналізаторі вуглецю ГОУ-1. Результати спектрального аналізу ділянок труби наведені в табл. 1, де указано вміст хімічного елементу у відібраній пробі.



Рис. 1. Фрагмент демонтованої труби з ділянкою руйнування і позначками для вирізки темплетів для досліджень і механічних випробувань

Таблиця 1. Хімічний склад металу сталі X12CrMo5, мас. %

Проба	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti
Зовнішня сторона	0,13	0,27	0,48	0,008	0,020	4,6	0,30	0,13	0,55	<0,01
Внутрішня сторона	0,13	0,27	0,48	0,008	0,022	4,6	0,30	0,13	0,56	<0,01
Дані сертифікату EU	0,117	0,27	0,46	0,001	0,008	4,76	0,27	0,20	0,59	0,0061N
15X5M ГОСТ 20072-74	0,15	<0,5	<0,5	<0,025	<0,03	4,5...6,0	<0,6	<0,2	0,45...0,60	<0,03

Рабкіна М.Д. – <https://orcid.org/0000-0003-3498-0716>, Костін В.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>,

Соломійчук Т.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-3038-8291>

© М.Д. Рабкіна, В.А. Костін, Т.Г. Соломійчук, 2021

Для металографічних досліджень мікрошліфи були відполіровані за допомогою алмазних паст різної дисперсності. Виявлення мікроструктури здійснювалось хімічним травленням мікрошліфів в 4%-му розчині азотної кислоти. Аналіз типу мікроструктур, а також їхнє фотографування здійснювали на мікроскопі NEOPHOT-32 при різних збільшеннях із застосуванням цифрової фотокамери OLYMPUS.

Отримані результати та їх обговорення. Аналіз хімічного складу основного металу (табл. 1) показав, що метал труби відповідає сталі марки X12CrMo5, що відображає хімічний склад металу даної сталі виробництва різних зарубіжних фірм (Acroni, Böhler Welding group, Tien Tai Electrode Co Ltd і т. і). В цілому результати аналізів близькі між собою і відповідають вітчизняному аналогу середньохромової сталі 15X5M.

При цьому можна відзначити кілька занижений вміст хрому і міді, а також підвищений вміст вуглецю в металі в порівнянні з даними Сертифікату LAVIMONT BRNO. Наявність хрому в твердому розчині визначає формування фазових складових, а також впливає на підвищення міцностних властивостей, і, відповідно, на схильність металу до крихкого руйнування. Звертає на себе увагу значне перевищення сірки і фосфору, у порівнянні з даними Сертифікату. Крім того, за Стандартом EU вміст сірки не повинен бути вище 0,005 %. Також в сертифікаті не обумовлюється вміст титану, що прив'язаний до вмісту азоту, і який виявлено в представлених фрагментах.

Металографічний аналіз основного металу труби показав, що його структура складається з феритної матриці, легованої хромом і молібденом, та дисперсних карбідів. Як з боку зовнішньої, так і з боку внутрішньої поверхні труби спостерігаються сліди загальної корозії у вигляді іржавих островків. При інтенсивному травленні карбідна фаза стає більш помітною. Крім того, в середніх перетинах по товщині листа, особливо в поздовжньому напрямку, чітко проявляється структурна неоднорідність в металі у вигляді вузьких темних

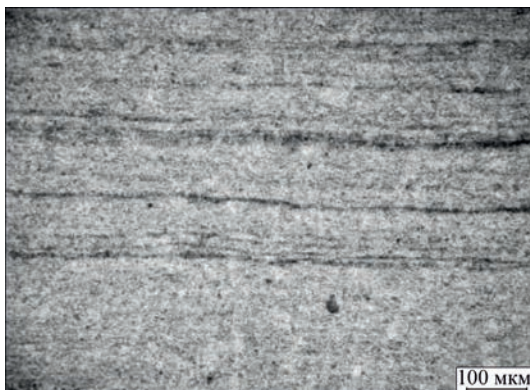


Рис. 2. Мікроструктура основного металу

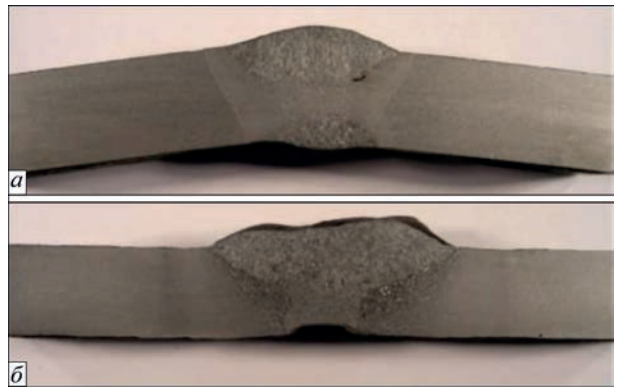


Рис. 3. Макроструктура зварних з'єднань: поздовжнього (а) та кільцевого (монтажного) (б)

і більш широких світлих смуг, що чергуються між собою, ймовірно пов'язаних з різним вмістом вуглецю (рис. 2).

Макроструктура зварних з'єднань представлена на рис. 3. Форма поздовжнього зварного шва має вигляд конусу – цілком ймовірно в процесі вальцювання труби з листа не здійснювалося попередньої подгибки кромки. З огляду на те, що поздовжні шви, що мають подібну форму, рознесені по кільцю при послідовному з'єднанні обичайок монтажним швом, через порушення спряженості зварювальних поверхонь виникають, як відомо, додаткові зварювальні напруження. Кільцеві монтажні шви (рис. 3, б) також мають певні дефекти. По-перше, висота валика посилення, яка не повинна перевищувати 2,5...4,0 мм, в ряді випадків перевищує ці значення як і в поздовжньому зварному з'єднанні. Крім того, має місце безліч непроварів і значна стяжка кореневого шару.

Слід зазначити, що при зіставленні поздовжніх зварних з'єднань, виконаних на заводі-виробнику і кільцевих зварних з'єднань, виконаних в монтажних умовах, спостерігається досить якісне виконання заводських з'єднань, в порівнянні з монтажними стиками. Проте, аналіз мікроструктури зварних з'єднань дозволив виявити зони несплавлення і в поздовжньому зварному шві. Так, на шліфі поперечного перерізу поздовжнього зварного з'єднання було виявлено дефект, який розташовується на кордоні заповнюючого шару, і за формою, що повторює контур валика в зварювальній ванні (рис. 4). Площа дефекту (в площині, представлений на світлині) досягає величини 0,3×2 мм.

Незважаючи на те, що головні проблеми при зварюванні високоміцних сталей пов'язані з тим, що зварні з'єднання схильні до утворення холодних тріщин [4], даний дефект зварного з'єднання відноситься до категорії дефектів міжваликового несплавлення. У той же час у монтажному зварному з'єднанні, в збереженій після руйнування частині труби, подібні дефекти відсутні (рис. 3, б).

Мікроструктура кільцевого металу шва аналогічна мікроструктурі поздовжнього шва, й також

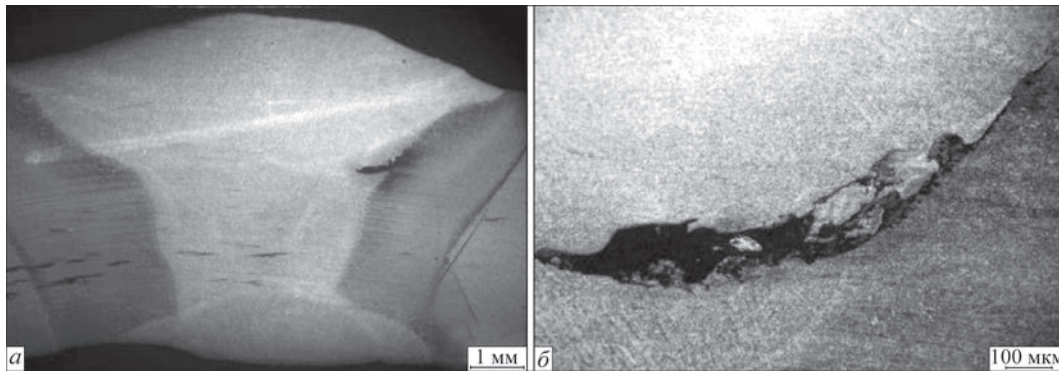


Рис. 4. Загальний вигляд поперечного перерізу поздовжнього зварного з'єднання (а) та міжваликове несплавлення (б)

складається з феритної матриці, легованої хромом і молібденом, і дрібнодисперсних карбідів.

Аналіз результатів механічних випробувань показав, що метал досліджуваних фрагментів труби має високі характеристики міцності при достатньому рівні пластичності (табл. 2). При цьому метал практично ізотропний в площині листа. Однак, як буде показано нижче, при випробуваннях зварних з'єднань на розтяг в шийці зразків виявлено розшарування (рис. 5), що, імовірно, обумовлено анізотропією в Z-напрямку [5–7].

Для оцінки опору зварних з'єднань статичним і динамічним навантаженням зразки вирізали як з поздовжніх, так і з кільцевих зварних з'єднань (табл. 3). Оскільки при випробуваннях на розтяг зварних з'єднань у всіх випадках руйнування проходить далеко від наплавленого металу шва, на ділянці переходу зони термічного впливу в основний метал, то механічні характеристики (табл. 3) швидше відображають властивості основного (табл. 2), а не наплавленого металу. При цьому межа плинності, тимчасовий опір і віднос-

не подовження в поздовжніх зварних з'єднаннях на 15...20 % вище, ніж в кільцевих.

Отримані результати показали, що на відміну від випробувань на розтяг (табл. 3), при випробуваннях на ударну в'язкість основного металу явище анізотропії виявляється також і в площині прокату (табл. 4). Це позначається, перш за все, на різних значеннях ударної в'язкості уздовж і поперек прокату при кімнатній температурі, а також – на розкиді значень, при різних температурах випробувань [7].

Аналіз впливу місця розташування надрізу на значення ударної в'язкості показав, що при температурі випробування 20 °С при розташуванні надрізу по центру шва значення ударної в'язкості поздовжнього шва в 5 разів перевищують аналогічні значення кільцевого шва, а при температурі випробування –10 °С більше ніж в 9 разів (табл. 4).

Необхідно відзначити неприпустимо низькі значення ударної в'язкості монтажного зварного шва, особливо при мінусовій температурі. Так, наприклад, згідно з [8] величина ударної в'язкості зварних з'єднань на зразках з гострим надрі-

Таблиця 2. Результати випробувань основного металу на розтяг

Орієнтація зразків	Межа плинності σ_p , МПа	Тимчасовий опір σ_b , МПа	Відносне подовження δ_5 , %	Відносне звуження ψ , %
Вздовж осі труби	516,8...518,6	677,1...678,8	24,1...24,7	77,5...77,9
В кільцевому напрямку	515,1...516,8	674,3...676,4	24,8...25,3	73,3...77,5

Таблиця 3. Результати випробувань зварних з'єднань на розтяг

Зварне з'єднання	Межа плинності σ_p , МПа	Тимчасовий опір σ_b , МПа	Відносне подовження δ_5 , %	Відносне звуження ψ , %
Кільцеве	451,5...485,5	590,4...629,6	18,9...19,7	72,0...75,1
Поздовжнє*	520,1...560,9	667,0...672,5	23,5...24,0	73,0...73,1

Примітка: * – в місці розриву спостерігається розшарування.

Таблиця 4. Результати випробувань зразків Шарпі (КШ) на ударний вигин

Номер п/п	Місце вирізки зразків	Місце нанесення надрізу	КШ, Дж/см ²	
			–10 °С	20 °С
1	Кільцевий зварний шов	Зона сплавлення	15,0...60,0	22,9...32,4
		Центр шва	8,3	25,9...29,4
2	Поздовжній зварний шов	Зона сплавлення	29,3...50,8	59,1...95,2
		Центр шва	36,0...78,6	157,6...157,7
3	ОМ в поздовжньому напрямку	-	34,2...54,5	139,5...149,1
4	ОМ в кільцевому напрямку	-	32,7...34,5	159,7...280,2

Примітка. Надріз по товщині стінки труби.



Рис. 5. Розшарування в зламі зразків при випробуванні поздовжніх зварних з'єднань на розтяг

зом (*KCV*) по центру шва і лінії сплавлення при мінімальній температурі експлуатації повинна бути не менше 29,4 Дж/см² для труб діаметром 610...1020 мм та 39,2 Дж/см² для труб діаметром 1067...1420 мм.

Оскільки при нанесенні надрізу на зону сплавлення слід враховувати її криволінійну форму, то розкид результатів можна вважати закономірним. Однак і в даному випадку звертають на себе увагу більш високі і стабільні значення ударної в'язкості поздовжнього з'єднання, і нестабільні значення ударної в'язкості монтажного з'єднання, особливо при температурі випробування –10 °С (табл. 4).

Таким чином, виконані лабораторні дослідження, що включають визначення хімічного і структурного складу металу, дозволяють стверджувати, що метал труби відповідає середньохромовій сталі марки X12CrMo5. При цьому слід зауважити, що в результаті механічних випробувань виявлені деякі ознаки анізотропії прокату при переході до зони термічного впливу, які проявляються, перш за все, в типовому розшаруванні основного металу, що узгоджується з уявленнями, які наведено в роботі [5]. Що стосується металу шва, при випробуваннях на ударний вигин встановлені надзвичайно низькі і нестабільні значення ударної в'язкості монтажних зварних з'єднань, особливо при мінусовій температурі. У той же час, в поздовжньому зварному шві виявлено дефект у вигляді

міжваликового несплавлення. Як буде показано нижче, саме подібний дефект міг виявитися одним з тригерів, які призвели до руйнування досліджуваного технологічного трубопроводу.

Дослідження поверхні руйнування. Візуально-оптичний аналіз фрагмента зруйнованої труби показав, що область максимального розкриття тріщини знаходиться на ділянці перетину поздовжнього шва із зоною термічного впливу кільцевого шва (рис. 6). При цьому виявлено, що характерні макроскопічні ознаки проходження тріщини – «шевронний візерунок», саме в цій ділянці змінює один напрямок на протилежний, що було класифіковано як місце початку руйнування труби.

Зіставлення макро- і мікроструктури поздовжнього зварного з'єднання (рис. 3, а; рис. 4) і морфології поверхні зламу (рис. 6, б) дозволило виділити три основні області в осередку руйнування: 1 – облицювальний шар з наповнюючими шарами; 2 – кореневий шар; 3 – навколошовна зона.

Для облицювального шару характерна дендритна структура в зламі (рис. 6, б), що сформувалася в процесі кристалізації рідкого металу при зварюванні. Поряд з руйнуванням по первинній дендритній структурі, в зламі спостерігаються також фасетки відколу і двійники, властиві вторинній структурі [9]. В обох випадках має місце утворення вторинних тріщин (рис. 7, а, в), які перетинають поверхню зламу. Слід також відзна-

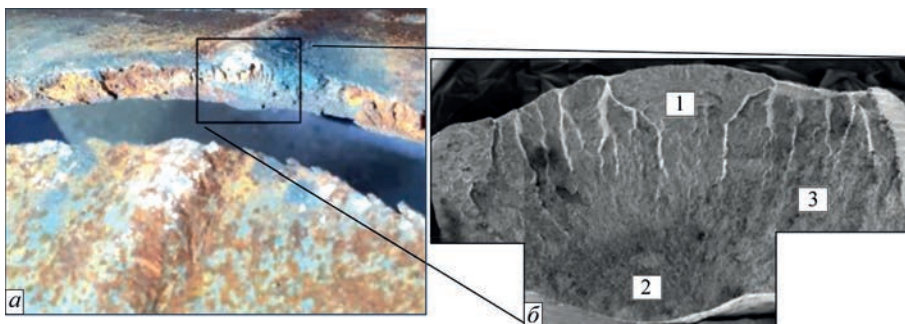


Рис. 6. Зовнішній вигляд зразка з ділянкою початку руйнування труби в поздовжньому зварному шві (а) та ділянки зародження тріщини (б); б – ×10

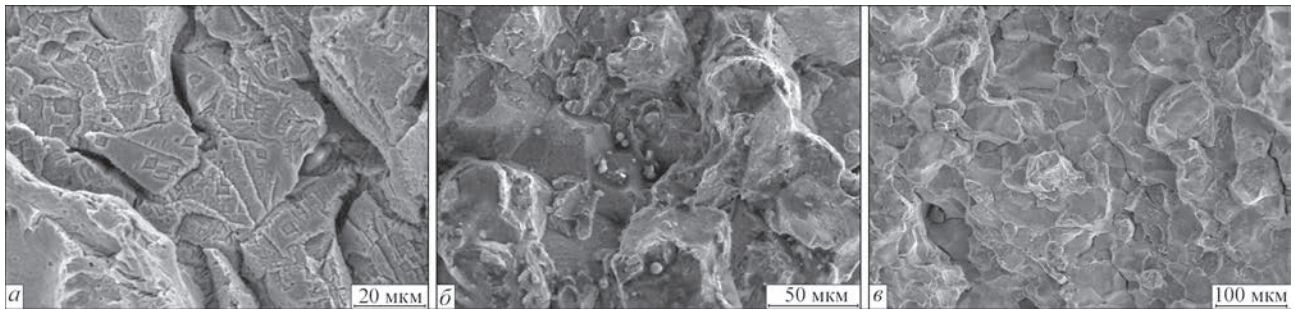


Рис. 7. Характер руйнування: а – облицювальний шов; б – кореневий шов; в – навколошовна зона

чити наявність в'язкої складової в зламі у вигляді струмкового візерунка. Наявність вторинних тріщин в поєднанні з в'язкими ділянками на тлі загальної крихкості свідчить про нестабільність поширення тріщини.

Аналіз зламу в кореновому шарі показав, що руйнування відбувалося по межах вторинних зерен і має «кам'яноподібний» характер (рис. 7, б). Дана ділянка виявилася сильно окисленою. Поява продуктів корозії очевидно пов'язана з результатом дифузійного проникнення активних елементів (кисню, водню, вуглецю) в кореневий шов з внутрішньої поверхні труби в процесі експлуатації.

Для поверхні зламу в навколошовній зоні (рис. 7, в) також характерний «кам'яноподібний» характер руйнування із збагаченням меж зерен сіркою і фосфором.

Таким чином, з огляду на можливість появи підваликових дефектів у поздовжньому зварному з'єднанні (рис. 3, а; рис. 4), не виключено, що подібні несплавлення або кристалізаційні мікротріщини могли спровокувати зародження крихких тріщин на початковій стадії руйнування. Їхньому подальшому поширенню, ймовірно, сприяла низка інших причин: наприклад, наявність залишкових зварювальних напружень внаслідок порушення термічної обробки після зварювання; недотримання режиму опресування; невдала конструкція об'язки трубопроводу та ін. При цьому макротріщина з осередку руйнування поширювалася в обидві сторони по кільцю труби, що свідчить про те, що осьові напруження в трубі при дії внутрішнього тиску значно більше за кільцеві. Це припущення потребує подальших досліджень.

Висновки

1. Визначено, що основний метал зруйнованого трубного фрагмента за хімічним складом відноситься до середньохромової сталі, що відповідає вітчизняному аналогу 15Х5М, з типовою мікроструктурою, яка складається з рівноосної, легуваної хромом і молібденом феритної основи і дисперсних карбідів.

2. Показано, що поширення тріщини від початку її зародження в обидві сторони по кільцю проходить по крихкому механізму, про що свідчить

типовий шевронний рельєф поверхні руйнування, який може бути пов'язаний з наявністю високих залишкових напружень, обумовлених скоріш за все порушенням технології їх зняття.

3. Встановлено, що початок руйнування знаходиться в місці перетину поздовжнього шва з зоною термічного впливу кільцевого (монтажного) шва, поштовхом до якого послужили дефекти в зварних швах, зокрема, міжваликові несплавлення. При цьому виявлено перевищення нормативних значень висоти валиків посилення, властиве обом видам з'єднань. Крім того, має місце безліч несправів що, в більшій мірі, характерно для монтажного кільцевого шва.

Список літератури

1. Girgin Serkan, K. (2015) *Elisabeth Lessons Learned from Oil Pipeline Natch Accidents and Recommendations for Natch Scenario Development – Final Report*. ©EU. Abstract, Published.
2. Кушнарева О.В., Голубаев Д.В. (2018) Анализ причин аварий на объектах магистрального транспорта нефти и газа: проблемы и решения. *Master's journal*, 1, 37–43.
3. Кузнецова Т.В., Краснокутский А.Н. (2012) Опыт расчета и проектирования трансферных трубопроводов. *Технологии нефти и газа*, 3, 54–59.
4. Лобанов Л.М., Позняков В.Д., Махненко О.В. (2013) Образование холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей с пределом текучести 350...850 МПа. *Автоматическая сварка*, 7, 8–13.
5. Лобанов Л.М., Гиренко В.С., Рабкина М.Д. (2001) Анизотропия характеристик трещиностойкости как одна из причин возникновения трещин в пролетных строениях сварных мостов. *Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій*: Зб. наук. пр. Львів, Каменяр, Вип. 3, сс. 138–147.
6. Farber, V.M., Khotinov, V.A., Belikov, S.V. et al. (2016) Separations in steels subjected to controlled rolling, followed by accelerated cooling. *Physics of Metals and Metallography*, 117, 407–421.
7. Усов В.В., Гиренко В.С., Рабкина М.Д. и др. (1993) Влияние кристаллографической текстуры на анизотропию характеристик разрушения низколегированной стали контролируемой прокатки. *Физико-химическая механика материалов*, 2, 47–52.
8. ТУ 1381-003-47966425–2006 Трубы стальные электросварные прямошовные наружным диаметром 610...1420 мм.
9. Феллоуз Дж. (1982) *Фрактография и атлас фрактограмм*. Москва, Металлургия.

References

1. Girgin Serkan, K. (2015) *Elisabeth Lessons Learned from Oil Pipeline Natch Accidents and Recommendations for Natch Scenario Development – Final Report*. ©EU. Abstract, Published.

2. Kushnareva, O.V., Golubaev, D.V. (2018) Analysis of accident causes on objects of main gas-and-oil pipelines: Problems and solutions. *Master's J.*, **1**, 37–43.
3. Kuznetsova, N.V., Krasnokutsky, A.N. (2012) Experience of calculation and design of transfer pipelines. *Tekhnologii Nefti i Gaza*, **3**, 54–59 [in Russian].
4. Lobanov, L.M., Poznyakov, V.D., Makhnenko, O.V. (2013) Formation of cold cracks in welded joints from high-strength steels with 350-850 MPa yield strength. *The Paton Welding J.*, **7**, 8–13.
5. Lobanov, L.M., Girenko, V.S., Rabkina, M.D. (2001) Anisotropy of crack resistance characteristics as one of the causes of crack initiation in welded bridge spans. In: *Diagnostics, life and reconstruction of bridges and building structures*, Transact., Lviv, Kamenyar, Issue 3, 138-147 [in Russian].
6. Farber, V.M., Khotinov, V.A., Belikov, S.V. et al. (2016) Separations in steels subjected to controlled rolling, followed by accelerated cooling. *Physics of Metals and Metallography*, **117**, 407–421.
7. Usov, V.V., Girenko, V.S., Rabkina, M.D. et al. (1993) Influence of crystallographic texture on anisotropy of fracture characteristics of low-alloyed steel of controlled rolling. In: *Fizikokhimicheskaya Mekhanika Materialov*, **2**, 47–52 [in Russian].
8. TU 1381-003-47966425–2006: *Steel longitudinal welded pipes with an outer diameter of 610...1420 mm* [in Russian].
9. Fellous, J. (1982) *Fractography and atlas of fractograms*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

PECULIARITIES OF EMERGENCY DESTRUCTION OF THE TECHNOLOGICAL PIPELINE

M.D. Rabkina, V.A. Kostin, T.G. Solomiychuk

E.O.Paton Electric Welding Institute of NASU, 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv. E-mail: office@paton.kiev.ua

Analysis of failure of process pipeline, including a study of the properties, chemical composition and structure of the metal of welded joints, as well as the site of fracture and nature of crack propagation, made it possible to establish the most probable causes that led to its premature failure. It is assumed that such reasons are: a defect in a longitudinal weld; residual stresses in the pipe resulting from local heat treatment of the assembly circular weld; as well as longitudinal stresses arising from deflection of the pipeline between the supports. Ref. 9, Tabl. 4, Fig. 7.

Key words: technological pipeline; longitudinal and circular welded joints; defects in welded joints; lacks-of-fusion; structural heterogeneity; lamellar tearing; destruction

Надійшла до редакції
01.02.2021



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Десята міжнародна конференція

ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ в ЗВАРЮВАННІ та ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ

6 – 11 вересня 2021 р.
Україна, Одеса

Голова програмного комітету
академік І.В. Кривцун

Тематика конференції

- Лазерне та електронно-променеве зварювання, різання, наплавлення, термообробка, нанесення покриттів
- Електронно-променева плавка та рафінування
- Гібридні процеси
- 3D технології
- Моделювання променевих технологій
- Неруйнівний контроль
- Матеріалознавчі проблеми лазерних та електронно-променевих технологій

ОБЛАДНАННЯ ♦ ТЕХНОЛОГІЇ ♦ МОДЕЛЮВАННЯ



АДРЕСА ОРГКОМІТЕТУ
Україна, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Тел./факс: (38044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2021>

