

National University of Water and Environmental Engineering. 2024. Т. 4, № 104. С. 22–43. URL: <https://doi.org/10.31713/vt420233>.

2. C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux, N. Gaudillière, J. Dirrenberger, P. Morel Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders *Mater. Des.*, 100 (2016), pp. 102-109,

3. I. Hager, A. Golonka, R. Putanowicz. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Proc. Eng.*, 151 (2016), pp. 292-299, [10.1016/j.proeng.2016.07.357](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357)

4. Shengwei Sun, Siqi Ding, Baoguo Han, Sufen Dong, Xun Yu, Debao Zhou, Jinping Ou, Multi-layer graphene-engineered cementitious composites with multifunctionality/intelligence, *Composites Part B: Engineering*, Volume 129, 2017, Pages 221-232, ISSN 1359-8368, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.07.063>.

5. Suvash Chandra Paul, Yi Wei Daniel Tay, Biranchi Panda, Ming Jen Tan, Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Volume 18, Issue 1, 2018, Pages 311-319, ISSN 1644-9665, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>.

6. Biranchi Panda, Ming Jen Tan, Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing, *Ceramics International*, Volume 44, Issue 9, 2018, Pages 10258-10265, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.031>.

7. Shoukat Alim Khan, Muammer Koç, Sami G. Al-Ghamdi, Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: *A systematic review for built environmental applications*, *Journal of Cleaner Production*, Volume 303, 2021, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127027>.

УДК 674

ВИПРОБУВАННЯ СЕКЦІЙНИХ ТРУБ В ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВАХ

Валерій Макаренко,

д-р техн. наук, професор кафедри технології будівельних конструкцій і виробів, професор,

Оксана Бердник,

PhD, доцент технології будівельних конструкцій і виробів, доцент,

Олексій Цапко,

PhD, старший дослідник, доцент кафедри будівельних матеріалів, доцент,

Єгор Павлов,

студент, КФКАБУ

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

Відомо, що фактичні руйнування трубопроводів, осередок яких знаходився в поздовжньому заводському шві трубних секцій, спостерігали випадки розповсюдження руйнування по зварювальному з'єднанню труб. В той

же час відомо, що при експериментальних дослідженнях розповсюдження руйнувань у якісно зварених швах прямо шовних труб із сталей контрольованої прокатки (СКП) і низьколегованих нормалізованих сталей не відбувалося.

Мета дослідження. Експериментальні дослідження кінетики руйнування в процесі полігонних випробувань зварних з'єднань секцій газопровідних труб різної в'язкості.

В полігонних випробуваннях використовували труби діаметром 1000x18мм, які пройшли контрольовану прокатку (сталь класу X70 – марки 06Г2БА) на робочий тиск $P_p = 10,5$ МПа (в північному – низькотемпературному виконанні). В заводських умовах були зварені 8 труб (по 4 на кожний варіант – I варіант – сталь 06Г2БА; II варіант – сталь нормалізована 17Г1С). При цьому середнє значення ударної в'язкості = (по трьом зразкам) металу шва КСУ₄₀ (I) = 0,435 МДж/м² – перший варіант; КСУ₄₀ (II) = 0,365 МДж/м² – другий варіант.

Випробування 1 (рис. 1). Труба з надрізом по металу зруйнувалася при $\sigma_p = 394$ МПа. Тріщина в металі шва розповсюджувалася крихко, а по зоні сплавлення – в'язко. Перед контейнером тріщина перейшла в крихку, розгалузилася і закілювалася, максимальна швидкість тріщини спостерігається на ділянці крихкого розповсюдження в складала 500 м/с; максимальне кінетичне розкриття при розповсюдженні по металу – 10 мм при температурі $T_m = 5^\circ\text{C}$. Температура переходу на ділянці в'язко-крихкого злому $x = 0.4$ м складала 7-8 $^\circ\text{C}$.

Випробування 2 (рис. 2). Труба (другий варіант) з надрізом по металу шва зруйнувалася при $\sigma_p = 345$ МПа. Тріщина від надрізу пройшла крихко 35 мм, потім відхилилася в зону сплавлення і розповсюджувалася в'язко на довжину 0,35 м. По лінії входження в зону від'ємних температур швидкість розповсюдження тріщини збільшилася і в металі шва складала 460 м/с, пластичне розкриття – 19 мм, а $T_m = -10^\circ\text{C}$ (рис. 2). Температура переходу на ділянці крихко-в'язкого злому ($x \approx 0.5$ м) складала -10°C (табл. 1).

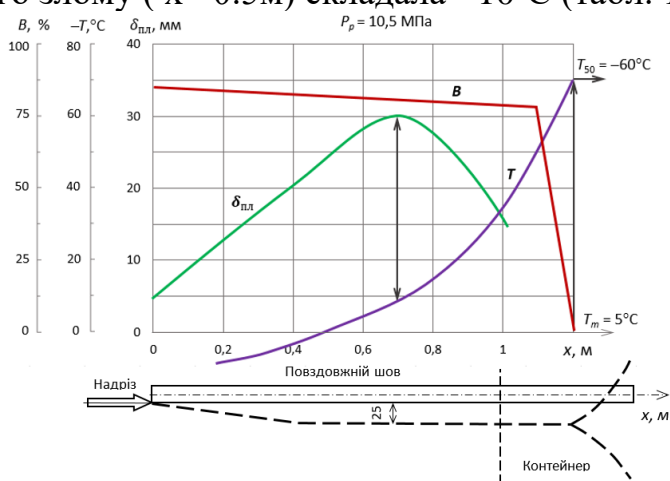


Рис. 1. Результати натурних пневматичних випробувань зварювальних з'єднань в експериментальних трубах з ініціюючим надрізом по зоні сплавлення. Варіант зварювання – I. Сталь – 06Г2БА Діаметр труби - 2010x18

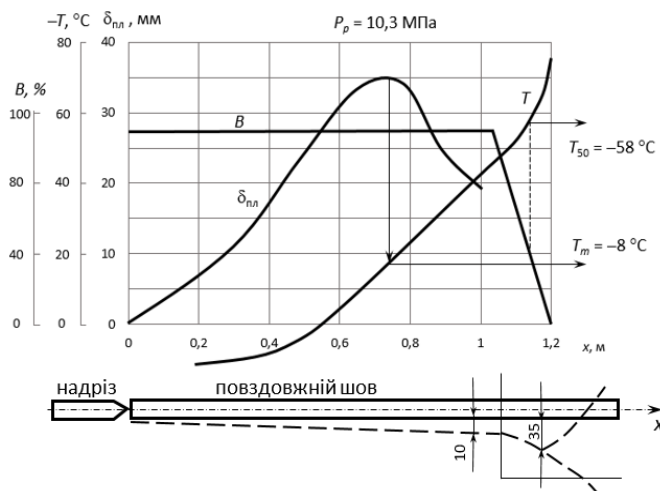


Рис. 2. Результати натурних пневматичних випробувань зварювальних з'єднань в експериментальних трубах з ініціюючим надрізом по зоні сплавлення Варіант зварювання – II.

Таблиця 1

Результати натурних пневматичних випробувань експериментальних труб діаметром 1000x18мм із СКП (06Г2БА)

Середнє руйнівне напруження σ_p , МПа	Об'єкт аналізу (варіант зварювання)	Характеристики спротиву розповсюдженню руйнування			
		Швидкість тріщини, м/с		Максимальне пластичне розкриття тріщини $\delta_{пл}$ мм	Температура максимального спротиву T_m , $^\circ\text{C}$
		в'язкої, V_{min}	крихкої, V_{max}		
394	зона термічного впливу (I)	135	-	20	-10...-15
345	те саме (II)	151	-	27	-7...-8
347	метал шва	-	265	10	-5
415	основний метал	195	-	30	-20

Отримані при натуральних випробуваннях характеристики спротиву розповсюдженню руйнувань в трубах зведені в табл. 1. Там же наведені результати випробування труби з ініціюванням тріщини в основному металі. Необхідно відмітити, що призупинення руйнування розгалуженням тріщини в полі мінусових температур, яке спостерігали у всіх випробуваннях виявляється закономірністю для даного методу полігонних випробувань.

Результати виконаних досліджень свідчать про слабку кореляцію в області малих значень ударної в'язкості з характеристиками спротиву розповсюдженню руйнування зварних з'єднань в умовах натурних випробувань труб. Характеристики отримані в результаті випробувань повно товщинних зразків DWTT більш близькі чим зразки Шарпі чи Менаже відповідають дійсним характеристикам працездатності зварювальних з'єднань в трубі.

Зокрема встановлено, що значення $A_3(-15^\circ\text{C}) = 0,75$ кДж і $A_p(-15^\circ\text{C}) = 0,45$ кДж забезпечують задовільний спротив зародженню і розповсюдженню руйнувань в зварювальних з'єднаннях (на рівні основного металу). Такі характеристики відповідають $KCV_{-60} = 0,52$ МДж/м², що близько до вимог по ударній в'язкості для основного металу (0,55 МДж/м²). Тому можна вважати, що для труб із СКП (06Г2БА) великої в'язкості рівень ударної в'язкості зварювальних з'єднань повинен приблизитися до ударної в'язкості основного металу. Вимоги по ударній в'язкості і пластичності зварювальних з'єднань наряду з вимогами їх статичної рівномірності є визначальними з точки зору попередження руйнувань. Обов'язковим є також випробування труб на заводі під гідравлічним внутрішнім тиском, значення якого декілька вище випробуваного на трасі (в польових умовах будівництва)

Таким чином, із вище наведених прикладів достатньо, щоб прийти до висновку, що рівень проектування зварювальних трубопроводів в багатьох випадках не відповідає ще сучасним вимогам, а якість їх виготовлення повинна бути суттєво підвищена. Важливу роль в покращенні цього положення зобов'язані відіграти спеціалісти-зварювальники.

Випробування окремих труб і трубних секцій виконаних на полігоні показали, що труби із сталі 06Г2БА (СКП) прийнятої конструкції володіють тривалою статичною міцністю, не піддаються крихким руйнуванням в заданому інтервалі температур, малочутливі до поверхневих дефектів заводського і монтажного походження і, як правило, мають малу довжину (до 2-1,5 оболонки) руйнувань. Подальша експлуатація таких труб в газопроводах при робочому тиску 8-9,4 МПа підтвердила, що при існуючих методах будівництва трубопроводів місцева стійкість стінок труб діаметром 820-1020 мм з товщиною стінок 18-22 мм є достатньою, а тим більше заводський контроль на герметичність відповідає вимогам нормативно-регламентної документації, прийнятих в НАК «Укрнафгаз». В табл. 2 наведені механічні властивості сталі 06Г2БА (СКП).

Таблиця 2

Механічні властивості сталі 06Г2БА

Характеристики сталі	Сталь 06Г2БА - СКП	Вимоги ТУ 15-1-22-87-99 (не нижче)
σ , МПа	520	460
σ , МПа	620	560
δ , %	24	22
KCV_{-15} , Дж/см ²	125	90
KCV_{-15} , Дж/см ²	110	60
Кількість волокна (%) в зломі ТТ при -15°C	90	80

Висновки:

1. Проведені натурні випробування газопровідних труб з різною в'язкістю в умовах полігону які максимально наближені до натуральних умов експлуатації газопроводів.

2. Експериментально досліджена кінетика розповсюдження тріщин уздовж зварних з'єднань – їх траєкторія, перехід із зварювального шва в основний метал труби і на оборот, швидкість руху тріщин у в'язкому і крихкому металі та визначені зони пластичної деформації.

3. Отримані результати щодо кінетики руйнування натуральних труб в полігонних умовах закладають підґрунтя для розробки математичної моделі інженерного прогнозу залишкового (безаварійного) ресурсу діючих на нафтогазових родовищах трубопроводів

Список використаних джерел:

1. Berdnyk O. Yu., Lastivka O. V., Maystrenko A. A., Amelina N. O. Processes of structure formation and neof ormation of basalt fiber in an alkaline environment. – *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020).* – Vol. 907. – 012036.

2. Song J. Basalt fibre-reinforced PA1012 composites: Morphology, mechanical properties, crystallization behaviours, structure and water contact angle *J. Compos. Mater.* 2014. V. 49. № 4. pp. 415–424.

3. Ливч Д., Федчишин В., Хоменко І. Нове обличчя українського підприємництва. *Економічна правда.* від 29.08.2022. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2022/08/29/690937/> (дата звернення: 01.03.2024 р.).

4. Nathan Schwarz, Hieu Cam, Narayanan Neithalath, Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash, *Cement & Concrete Composites*, 2008, Vol.30, pp.486–496.