

УДК621.791.01.669

DOI: 10.18372/0370-2197.1(86).14496

В. Д. МАКАРЕНКО, Ю. Л. ВИННИКОВ, А. М. НОГІНА, О. О. ПЕТРЕНКО

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава***ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ШВА,
ЛЕГОВАНОГО МОЛІБДЕНОМ, НА СТАЛІ 20К**

Існуючі дотепер науково-технічні і технологічні розробки з підвищення якості металу зварювальних з'єднань трубних конструкцій містять протиріччя і невизначеність стосовно впливу легуючих елементів, зокрема молібдену, на механічні і в'язко-пластичні властивості, а також на металографічну складову швів. Все це вказує на необхідність системного вивчення зазначеної проблеми з розробки раціональних металургійно-технологічних заходів щодо значного покращення технологічних і корозійно-механічних властивостей наплавленого металу. Металографічними дослідженнями, з використанням лабораторного обладнання з високою ідентифікуючою здатністю, встановлено, що легування металу зварювального шва молібденом в кількості 0,2-0,4% визиває роздіблення ферито-перлітної структури, в тому числі карбідів Mn і Fe, а також сприяє зниженню кількості і розмірів неметалевих включень – сульфідів, оксидів і сілкатів. Причому, неметалеві включення мають дисперсний вид, що сприяє пластифікуванню структури, яка безпосередньо підвищує в'язко-пластичні характеристики і спротив метала швів тріциноутворенню. На базі отриманих результатів металографічних досліджень визначений оптимальний вміст в металі шва легovanого елемента – молібдену, який складає 0,2-0,4%.

Ключові слова: структура, руйнування, корозія, кристалічна решітка, неметалеві включення

Постановка проблеми. Відповідальні металеві конструкції аграрно-переробного і харчового виробництва, зокрема заводські і міські теплові трубопровідні мережі, що використовуються для водопостачання і транспорту водопарової суміші для технологічних потреб на підприємствах, часто працюють в екстремальних кліматично-баричних і напружено-деформованих умовах, контактуючи на протязі тривалого терміну експлуатації з корозійно-активними продуктами і середовищами. Їх руйнування супроводжується крупними матеріальними і екологічними наслідками, що наносить суттєві збитки підприємствам. Оскільки основу трубопровідного будівництва складають зварювально-монтажні роботи, в значній мірі визначаючи надійність об'єктів, які будуються, то в реальних трубопровідних конструкціях появлення тріщини найбільш часто обумовлено наявністю зварювальних з'єднань. Тому до якості зварювання при будівництві таких об'єктів пред'являються дуже жорсткі вимоги.

Існуючі дотепер науково-технічні і технологічні розробки з підвищення якості металу зварювальних з'єднань трубних конструкцій містять протиріччя і невизначеність стосовно впливу легуючих елементів, зокрема молібдену, на механічні і в'язко-пластичні властивості, а також на металографічну складову швів. Все це вказує на необхідність системного вивчення зазначеної проблеми з розробки раціональних металургійно-технологічних заходів щодо значного покращення технологічних і корозійно-механічних властивостей наплавленого металу.

Аналіз літературних даних. Відомо [1–17], що легування зварювального з'єднання, виконаного покритими електродами основного виду, дозволяє достатньо ефективно регулювати механічні властивості металу шляхом зміни морфо-

логії, розподілу і дисперсності структурних складових, а також зміною складу і стану границь зерен. Більшість дослідників розглядає вплив легуючих елементів на властивості металу при одинарному легуванні [5–7]. Встановлено [2; 9; 12; 15; 17], що найбільш оптимальною системою розкислювання і відновлення наплавленого металу являється система «марганець-кремній» з оптимальним вмістом марганцю 0,6-1,5%, та кремнію 0,3-0,6%. Автори [13-17] вважають, що для отримання високих механічних властивостей металу шва повинно виконуватися співвідношення: $Mn, \%/Si, \% \geq 2$ при вмісту $Mn = 0,6-1,5\%$.

Позитивний вплив молібдену на ударну в'язкість металу низьколегованих сталей (наприклад, марок 09Г2С, 17Г1С), автори робіт [3; 6; 15; 16] пов'язують з малою його абсорбцією на границях зерен і сильною абсорбцією на поверхні карбідів, що утруднює ріст останніх на границях зерен. Вплив молібдену, як відмічають автори [3; 6; 16], найбільш ефективний при спільному введенні в метал з карбідоутворюючими елементами. Крім того, виходячи з літературних джерел [3; 5; 7; 12; 15; 16], у авторів багатьох досліджень немає однозначної відповіді стосовно впливу молібдену на мікроструктуру, склад і стан неметалевих включень, які, в основному, визначають корозійно-механічні і технологічні властивості зварювального з'єднання. В додаток цього слід відмітити, що в літературі відсутні відомості про використання молібдену в якості легуючого модифікатора в електродних покриттях основного виду для зварювання низьковуглецевих сталей, що використовуються при будівництві трубопровідних конструкцій в якості транспортних комунікацій теплосилового господарства промислових виробництв та міських мереж тепловодопостачання. А тому дослідження впливу молібдену на характер мікроструктури, зокрема неметалевих включень, з ціллю підвищення надійності зварювальних швів, являє собою актуальну задачу.

Постановка завдання – дослідження впливу молібдену на мікроструктуру наплавленого металу зварювальних з'єднань, виконаних електродами основного виду на низьковуглецевій сталі.

Методика і матеріали досліджень. В якості об'єктів досліджень служили зразки, вирізані із зварювальних з'єднань, зокрема з різних зон – металу шва, зони сплавлення, зони термічного впливу і основного металу, прилягаючого до навколошовної зони. Основним матеріалом служила котельна сталь марки 20К, широко використовується для виготовлення труб [10; 11], призначених для трубопроводів водопостачання, пару високої температури і тиску і інших об'єктів на підприємствах аграрно-переробного і харчового виробництва. Зварювання виконували електродами з основним видом покриття діаметром 4 мм від випрямлювача ВДУ-504 на режимах: $U_d = 23-24V$; $I_{св} = 180A$ (постійний струм, зворотня полярність). Молібден вводили в шихту в кількості (в %): 1,0 (М1); 2,5 (М2); 3,0 (М3); 4,0 (М4) в процесі виготовлення електродів. Перед зварюванням, електроди прокалювали в термопечі при температурі 400°C на протязі 1 год. Хімічний склад наплавленого металу приведений в таблиці.

Структуру металу шва і навколошовної зони вивчали за допомогою растрового електронного мікроскопа моделі «JSM-35CF» (фірма «Джеол», Японія). Рентгеноспектральний мікроаналіз структури швів вивчали на мікроаналізаторі системи «ORTEC» (США). Фрактографічний аналіз зломів зразків проводили за допомогою мікроскопу «JSM-35CF». Склад неметалевих включень визначали на енергодисперсійному спектрометрі «Link-860» (фірма «Link», Великобританія). Визначення об'ємної долі і розмірів неметалевих включень проводили на кількі-

сному телевізійному мікроскопі «Квантимет -720» (фірма «Металс рисерч», Великобританія).

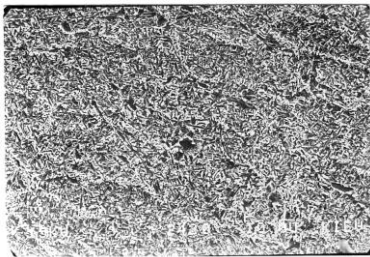
Результати досліджень і їх обговорення. Результати досліджень мікроструктури металу швів приведені на рис.1 - 10.

Результати досліджень показали, що структура основного металу (рис. 1, *a*) і металу шва (рис.1, *б*) електродів М1 (див. таблицю) характеризується наступними особливостями. Нерівновісні зерна верхнього бейніту (діаметром 200-600 мкм і довжиною 0,5-1,6 мм) оточені полікристалічною доевтектоїдною феритною оторочкою шириною 15-25 мкм, не утримуючої виділень фаз впровадження, але з неметалевими включеннями і перлітними колоніями по її границях. В тілі зерен спостерігаються пластинки карбідів (в основному, карбіди заліза) товщиною 10-15 мкм, невеликі перлітні колонії і неметалеві включення, як правило, сферичної форми діаметром 0,5-2,5 мкм.

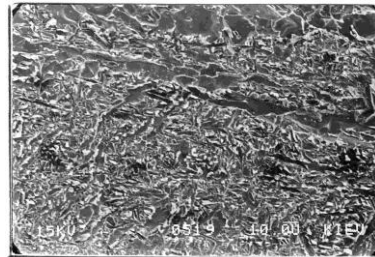
Таблиця

Хімічний склад наплавленого металу, %

Індекс електрода	C	Mn	Si	Ti	Mo	S	P
M1	0,18	0,98	0,38	0,017	0	0,034	0,037
M2	0,175	0,95	0,41	0,013	0,1	0,020	0,021
M3	0,189	1,04	0,43	0,014	0,2	0,016	0,018
M4	0,19	0,96	0,39	0,012	0,3	0,015	0,021



a



б

Рис. 1. Структура основного металу: *a* – сталь котельна марки 20К, $\times 400$; *б* – металу зварного шва на сталі 20К, $\times 500$.

Легування металу шва молібденом в кількості 0,2-0,4 % визиває наступні зміни в мікроструктурі металу – рис. 2-4 (центральна зона шва):

а) значно зменшилися розміри як бейнітних зерен (рис. 2, *a*, *б*), так і його карбідів (рис. 4), зокрема: діаметр зерна — 100 – 200 мкм (0,2% Мо) і 200-300 мкм (0,4 % Мо);

б) зменшилася ширина доевтектоїдного ферита (рис. 3, *a*, *б*) – 4-6 мкм (0,2 % Мо) і 6-9 мкм (0,4 % Мо);

в) зменшилася товщина карбідів бейніту (рис. 4) – 3-6 мкм (0,2 % Мо) і 5-8 мкм (0,4 % Мо).

Крім того, при легуванні металу молібденом в кількості 0,25% встановлено роздрібнення доевтектоїдного фериту на субзерна – рис. 6 (діаметром 8-12 мкм).

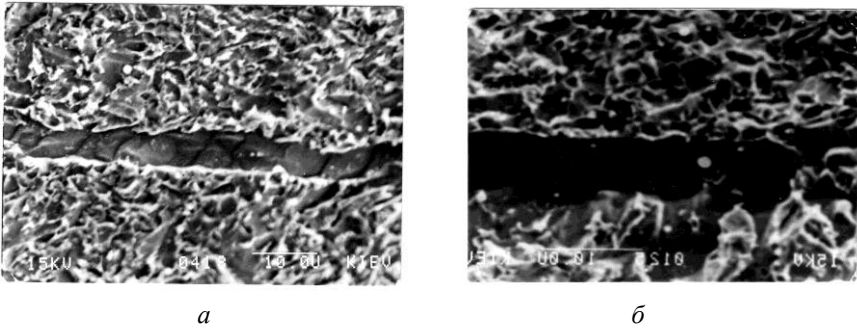


Рис. 2. Структура бейнітного зерна метала зварювального шва а - легованого молібденом 0,25%, $\times 540$; б – молібден відсутній, $\times 500$. Сталь 20К

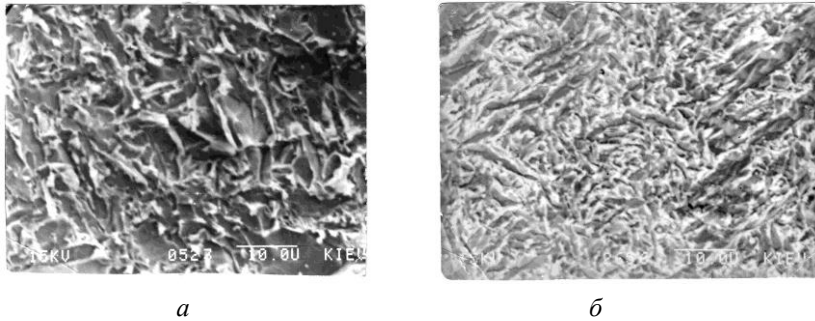


Рис. 3. Структура доевтектоїдного фериту зварювального шва: а – молібден відсутній, $\times 2000$; б – молібден 0,25%. $\times 2000$. Сталь 20К

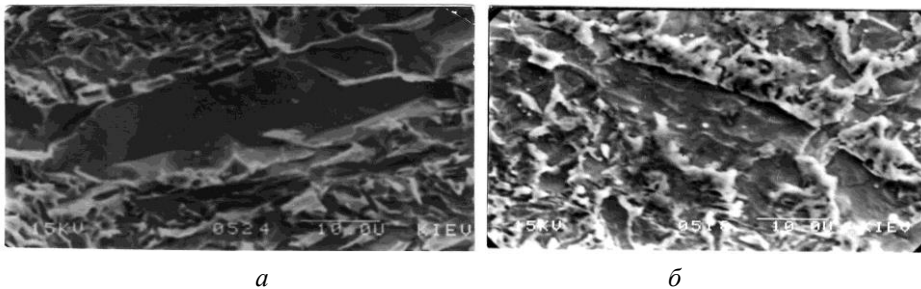


Рис. 4. Карбіди заліза в зварювальному шві: а – 0%Мо; б – 0,25%Мо; а, б – $\times 3000$

На рис. 5, а представлений поперечний переріз зварювального з'єднання на сталі 20К, а на рис. 5(б-з) – мікроструктура перехідних зон: від основного металу до центру метала шва (рис. 5, б, в); потім показана структура зони термічного впливу (рис. 5, д, е). Причому, на рис. 5, з показана відманштетова (стовбурна) структура, яка є продовженням такої ж структури навколошовної зони зварювального з'єднання. На рис. 5, з, е показана мікроструктура зони лінії сплавлення, тобто безпосереднього переходу від структури основного металу до структури шва. На рис. 5, ж показані перлітні зерна, оточені роздрібною феритною оточечкою, причому, як слідує з рис. 5, з, перлітний пакет складається із суміші дрібнодисперсних феритних і цементитних зерен, що свідчить про сприятливий вплив молібдену, як модифікатора, на мікроструктуру наплавленого металу. Це підтверджується також даними, приведеними на рис. 6, а, б, звідки видна дрібнодисперсна ферито-перлітна структура метала зварювального шва, легованого 0,25% молібденом.

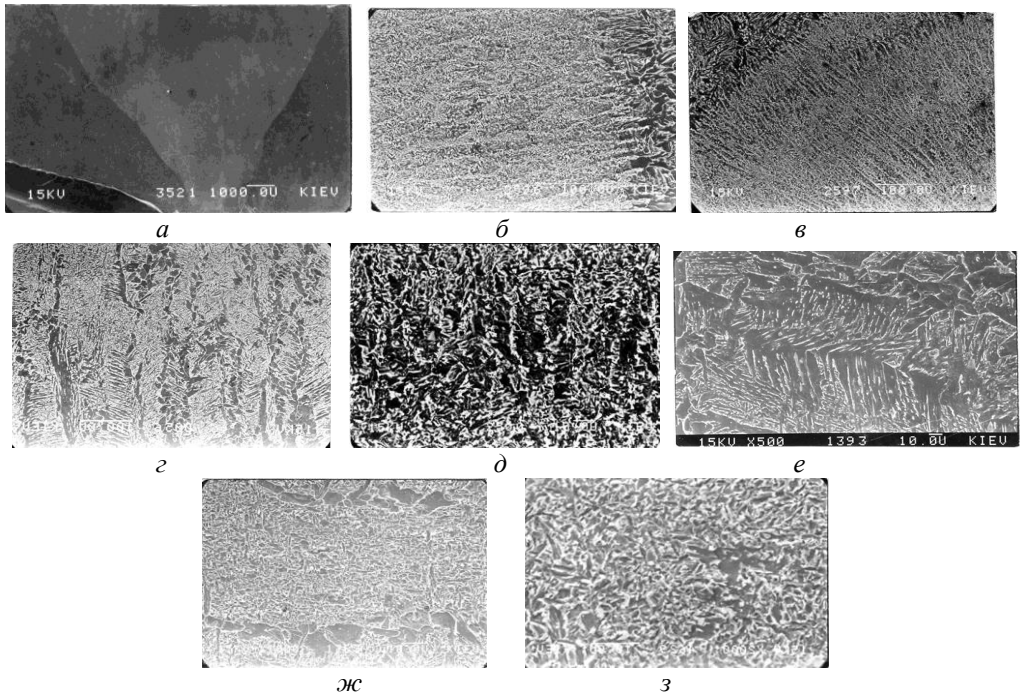


Рис. 5. Мікроструктура метала зварювального шва на сталі 20К, легованого 0,25% Мо; а – $\times 200$; б, в – $\times 450$; з, д, е – $\times 600$; ж, з – $\times 550$. Примітка: Пояснення до рис. 5 надаються в тексті.

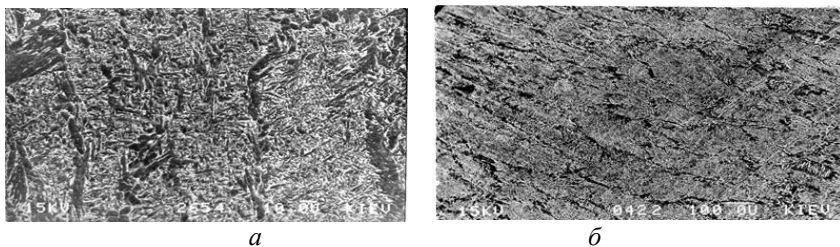


Рис. 6. Структура перлітного зерна метала зварювального шва на сталі 20К. Вміст молібдену 0,25%. $\times 400$

Встановлено також (рис.7), що сульфіди, оксисульфіди і сілікати в зварних швах, легованих молібденом, складаються із з'єднань сірки і кисню з марганцем, залізом і титаном, і мають глобулярну форму діаметром $\sim 4-6$ мкм. Отже, в даному випадку зв'язування сірки в з'єднання MnS знижує ймовірність утворення легкоплавкої евтектики Мо – МоS, що, як відомо, сприяє підвищенню стійкості зварних швів проти утворення гарячих тріщин [7; 12; 14; 17].

Рентгеноспектральний мікроаналіз, виконаний на мікроаналізаторі системи «ORTEC» (США), показав, що молібден майже не зв'язується з неметалевими включеннями, тобто утворення карбіду молібдену типу Mo_2C мало ймовірно, а утворює, переважно, твердий розчин з феритом. Спостерігаються також карбіди і оксисульфіди марганцю, в склад яких входить молібден. Крім того, було помічено істотний вплив молібдену на хімічну неоднорідність, які проявляються в розширенні ліквіаційних полос фосфору і марганцю і в зменшенні ступеню нерівномірного розподілу таких елементів, як кремній і сірка, що добре узгоджується з результатами робіт [1; 7; 12; 13 14].

Порівняння даних структурного і мікрорентгеноспектрального аналізів дозволяє передбачити, що покращення пластичних властивостей легованого молібденом метала пов'язано з тим, що молібден звужує ширину області $\gamma - \alpha$ перетворення, сприяючи, тим самим, отриманню достатньо дрібнодисперсної і однорідної структури нижнього бейніту з мінімальною шириною доевтектоїдної феритної оторочки. Як відомо [2; 6; 9; 16], така структура сприяє отриманню високих механічних властивостей метала шва, зокрема ударної в'язкості. Дані фрактографічного аналізу зразків на ударний згин (в інтервалі температур -30...+20°C) показали наступне. Зломи зразків метала шва, легованого молібденом, представляють собою в'язкі ділянки ямочного типу (рис. 8, б, з). При цьому доля в'язкої складової в таких зразках дорівнює 95% і більше, а зразки без вмісту молібдену – 45-50%.

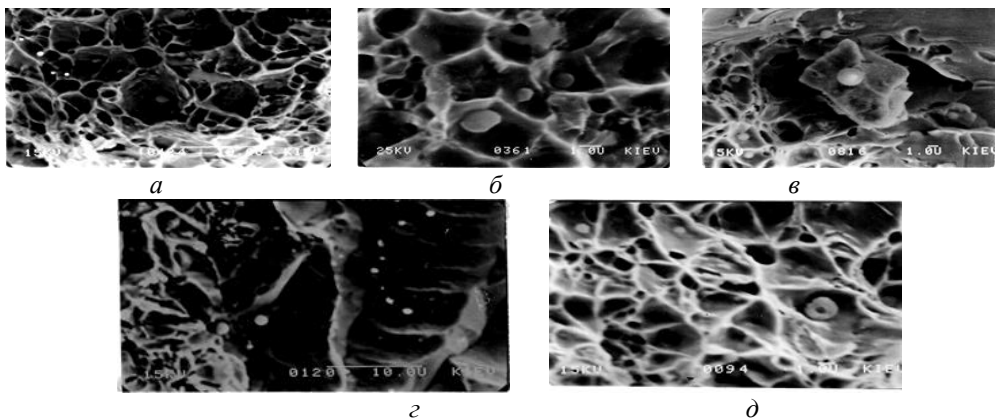


Рис. 7. Неметалеві включення в зломах зразків, виготовлених із зварювальних швів на сталі 20К; а, б – шви не леговані Мо; з, д – шви леговані 0,25%Мо; а, б – сульфідні і оксисульфідні Mn і Ti; в – сілікати Mn; з, д – сілікати і оксисілікати Mn і Ti; а, б, в – $\times 3000$; з – $\times 2500$; д – $\times 3400$

Для встановлення структур, відповідальних за руйнування, зломи зразків піддавали глибокому травленню в ніталі. В результаті удалося встановити, що метал зварювальних швів, не легований молібденом, руйнується по доевтектоїдному фериту, так як на фасетках сколу протравлюється феритна структура (рис. 8, а, в, е). Легований молібденом (0,25%Мо) метал швів руйнується по субзернах нижнього бейніту (рис. 8, б, з, д). Отже, завдяки такому типу руйнування, показники в'язкості метала шва різко зростають.

Мікроструктура руйнування зварювальних швів, легованих молібденом в об'ємі 0,1%, показана на рис. 9. Із наведеного рис. 9 видно, що мікротріщини зароджуються переважно від неметалевих включень – сульфідів, оксидів і сілікатів Fe і Mn, а їх ріст і розповсюдження відбувається по границях зерен (рис. 9, а, з).

Із даних, приведених на рис.10, видно, що легування метала шва молібденом в кількості 0,25% дозволяє різко знизити розміри і чисельність неметалевих включень, що сприяє покращенню механічних властивостей наплавленого метала, що підтверджується в роботах [3; 6; 15; 16].

Підвищення в'язко-пластичних характеристик зварювальних швів при легуванні їх молібденом обумовлено, на наш погляд, не тільки покращенням структури наплавленого металу, але і пластифікуючим впливом молібдену на властивості фази впровадження і матриці [3; 6; 15; 16].

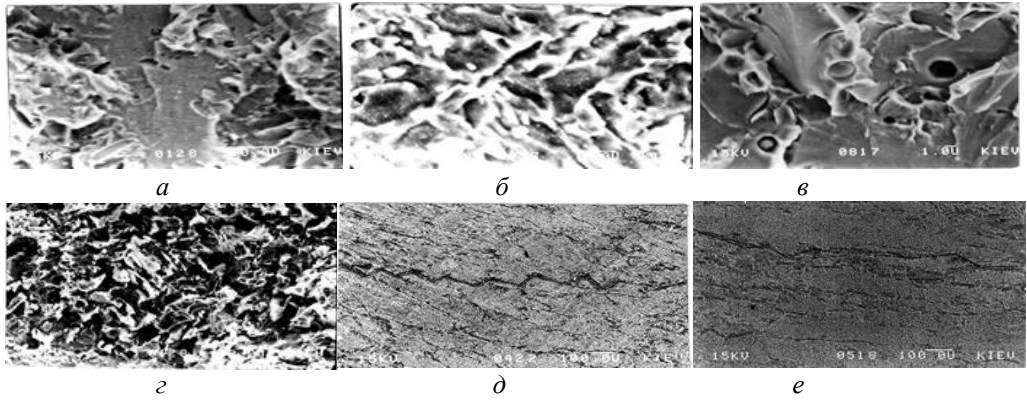


Рис. 8. Мікроструктура фасеток руйнування (а-з) і загальна картина руйнування зварювального шва (д, е); а, в, е – руйнування по доєвтектоїдному фериту (0%Mo); б, з, д – руйнування по субзернам бейніту (0,25%Mo); а, б – $\times 2000$; в – $\times 5400$; з – $\times 2000$; д, е – $\times 200$

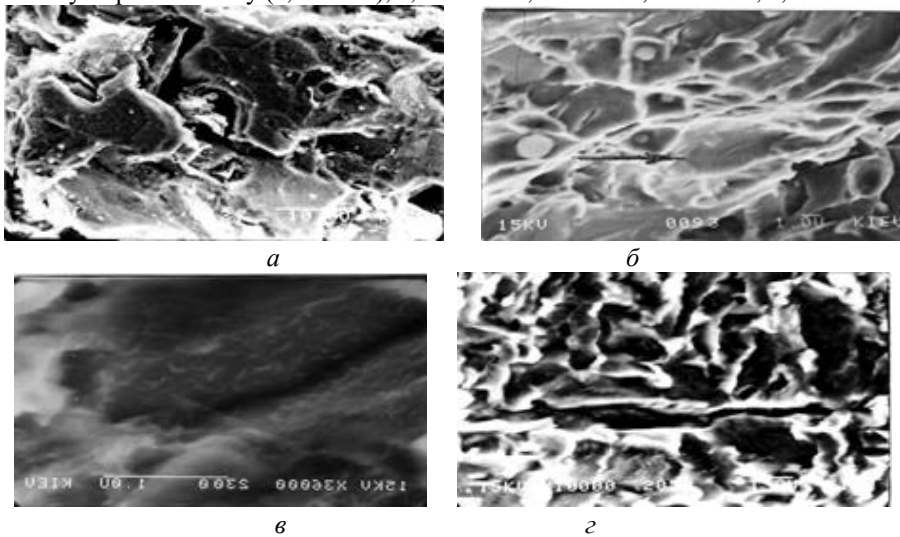


Рис. 9. Мікрокартина руйнування зварювального шва на сталі 20К (шов легований 0,1% Mo); а, б – джерела зародження мікротріщин знаходяться поблизу неметалевих включень (оксидів і сілікатів Mn і Ti); в, з – картина утворення мікротріщин і їх розповсюдження на границях зерен; а, б – $\times 3000$; в – $\times 4500$; з – $\times 2500$

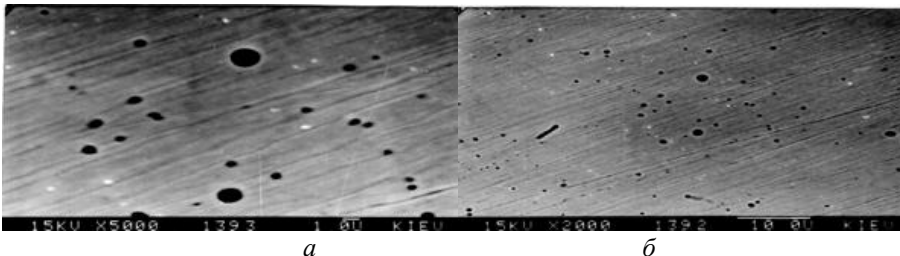


Рис. 10. Неметалеві включення в металі зварювального шва на сталі 20К; а – 0%Mo; б – 0,25%Mo; $\times 250$

Молібден, входячи в склад карбідів, знижує їх твердість внаслідок збільшення руху дислокацій, що визвано зменшенням енергії взаємодії його атомів з дислокаціями, тим самим облегшуючи пластичну деформацію [15; 16].

Пластифікування матриці зерна молібденом підтверджується фрактографічними дослідженнями зломів зразків. Так, в металі шва, легованого молібденом (0,25%), спостерігається в'язке руйнування по механізму зародження і зливання мікропустот біля неметалевих включень (рис. 3, а, в, д і рис.4, б, з). Руйнування квазісколом, яке спостерігається в нелегованих молібденом зразках, відбувається, як правило, в тілі феритних оторочок поблизу крупних неметалевих включень (діаметром 1-2 мкм), служачих концентратором напружень (рис.4, а, в). Мікропустоти, шляхом зливання яких утворюється в'язка тріщина критичної довжини, від якої починається руйнування відколом, можуть виникнути як навколо неметалевого включення, так і в результаті розшарування по границях феритних зерен [4; 8; 9; 14].

Механічні випробування зразків показали, що найбільш високі і стабільні значення ударної в'язкості і характеристик спротиву розвитку тріщин металу шва котельної сталі 20К досягаються при концентрації молібдену в металі шва в межах 0,1-0,3%. Такий діапазон вмісту молібдену в металі зварювального шва забезпечується вводом в електродне покриття молібденового порошку в кількості 1,5-3,5% по масі. З урахуванням вищевикладеного, був вибраний оптимальний хімічний склад наплавленого металу (в %): C ≤ 0,17-0,19; Si 0,30-0,35; Mn 0,7-0,9; Mo 1,5-2,5.

Висновки:

1. Металографічними дослідженнями, з використанням лабораторного обладнання з високою ідентифікуючою здатністю, встановлено, що легування металу зварювального шва молібденом в кількості 0,2-0,4% визиває роздріблення ферито-перлітної структури, в тому числі карбідів Mn і Fe, а також сприяє зниженню кількості і розмірів неметалевих включень – сульфідів, оксидів і сілікатів. Причому, неметалеві включення мають дисперсний вид, що сприяє пластифікуванню структури, яка безпосередньо підвищує в'язко-пластичні характеристики і спротив металу швів тріщиноутворенню.

2. На базі отриманих результатів металографічних досліджень визначений оптимальний вміст в металі шва легованого елементу – молібдену, який складає 0,2-0,4%.

Список літератури

1. Браун М.П. (1962) Влияние легирующих элементов на свойства стали. Киев. Гостехлит.
2. Георгиев М.Н. (1973) Вязкость малоуглеродистых сталей. Москва. Металлургия.
3. Калинин Е.С. (1976) Хладостойкая низколегированная сталь. Москва. Металлургия.
4. Лангер Н.А., Фрумин И.И. (1952) Влияние молибдена на структуру и свойства швов при сварке под флюсом. Автоматическая сварка. 1. 30-34.
5. Макаренко В.Д., Грачев С.И., Прохоров Н.Н. и др. (1996). Сварка и коррозия нефтегазопроводов Западной Сибири. Киев. Сільгоспосвіта.
6. Походня И.К., Горпенюк В.Н., Миличенко С.С. и др. (1970). Металлургия дуговой сварки. Киев. Наукова думка.
7. Технология электрической сварки металла и сплавов плавлением. Под ред. Патона Б.Е. Москва. Машиностроение. (1974)
8. Evans G.M. (1980) Effect of manganese on the microstructure and properties of all-weld-metal Deposits. Welding Journal. 3. 67-75.
9. Evans G.M. (1980) Einfluss der Streckenergie auf Mikrogefüge und Eigenschaften von C- und Mn-haltigen reinen Schweißgutem Oericon- Schweißmitt. 92. 20-35.

10. Steinmote E., Windeberg T.(1976) Einfluß von Kohlenstoff, Silicium und Aluminium auf die Morphologie der sulfide in Eisenhüttenwesen Schw. u. Schn. 12. 713-718.

11. Макаренко В.Д. (2006) Надежность нефтегазопромысловых систем. Челябинск. ЦНТИ.

12. Migel R., Ruge V. (2011) Hydrogen as alloy element. Schw. u schn. 7. 250-252.

13. Marvin C.W. (2012) Determining the strength of Corroded Pipe. Materials protection and Performance. 11..38-40.

14. Vasilkovsky O., Rivard A. (2013) The effect of hydrogen sulfide in guide oil on fatigue crack growth in pipe line steel. Corrosion. V.38. 1. 19-22.

15. Makarenko V.D., Muravjev K.A., Kalyanov A.I. (2006) Special features of manual arc welding of root joints in nonrotating welds in pipelines in Western Siberia. Welding International. 10 (5). 64-71.

16. Makarenko V.D., Shatilo S.P., Astafev V.I.(1998). Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. Welding International. 12. 34-39.

17. Makarenko V.D., Shatilo S.P. (1999) Increasing desulphurisation of the metal of welded joints in oil pipelines. Welding International. 12. 56-61.

Стаття надійшла до редакції .06.12.2019.

V. D. MAKARENKO, Yu .L. VINNIKOV, A. M. NOGINA, O. O. PETRENKO

RESEARCH OF THE MICROSTRUCTURE OF THE WELDING DOPED MOLYBDENUM ON STEEL 20K

The existing scientific and technological developments to improve the quality of metal welding joints of pipe structures contain contradictions and uncertainty about the influence of alloying elements, in particular molybdenum, on the mechanical and viscous-plastic properties, as well as the metallographic component of the joints. All this points to the need for a systematic study of this problem to develop rational metallurgical and technological measures to significantly improve the technological and corrosion-mechanical properties of weld metal. Metallographic studies, using laboratory equipment with high identifying ability, found that doping weld metal molybdenum in the amount of 0.2-0.4% causes fragmentation of ferrite-pearlitic structure, including carbides Mn and Fe, and does not reduce the number and size - sulfides, oxides and silicates. Moreover, non-metallic inclusions have a dispersed appearance, which promotes plasticization of the structure, which directly increases the visco-plastic characteristics and resistance of the metal joints to the crack. On the basis of the results of metallographic research, the optimum content in the weld metal of the alloyed element - molybdenum, which is 0.2-0.4%, is determined.

Keywords: structure, fracture, corrosion, crystal lattice, non-metallic inclusions

Reference

1. Braun M.P. (1962) Vlijanie legirujushchih jelementov na svojstva stali. Kiev. Gostehlit.
2. Georgiev M.N. (1973) Vjazkost' malouglerodistyh stalej. Moskva. Metallurgija.
3. Kalinnikov E.S. (1976) Hladostojkaja nizkolegirovannaja stal'. Moskva. Metallurgija.
4. Langer N.A., Frumin I.I. (1952) Vlijanie molibdena na strukturu i svojstva shvov pri svarke pod fljusom. Avtomaticheskaja svarka. 1. 30-34.
5. Makarenko V.D., Grachev S.I., Prohorov N.N. i dr. (1996) Svarka i korrozija neftegazoprovodov Zapadnoj Sibiri. Kiev. Sil'gosposvita.
6. Pohodnja I.K., Gorpenjuk V.N., Milichenko S.S. i dr. (1970) Metallurgija dugovoj svarki. Kiev. Naukova dumka.
7. Tehnologija jelektricheskoy svarki metalla i splavov plavleniem. Pod red. Pato-na B.E. Moskva. Mashinostroenie. (1974)
8. Evans G.M. (1980) Effect of manganese on the microstructure and properties of all-weld-metal Deposits. Welding Journal. 3. 67-75.

-
9. Evans G.M.(1980) Einfluss der Streckenergie auf Mikrogefuge und Eigenschaften von C-und Mn-haltigen reinen Schweissgutem Oeriicon- Schweissmitt. 92. 20-35.
 10. Steinmote E., Windeberg T.(1976) EinfluB von Kohlenstoff, Silicium und Aluminium aufdie Morphologic der sulfide in Eisenhüttenwesen Schw. u. Schn. 12. 713-718.
 11. Makarenko V.D. Nadezhnost' neftegazopromyslovyh sistem. Cheljabinsk. CNTI. (2006)
 12. Migel R., Ruge V. (2011)Hydrogen as alloy element. Schw. u schn. 7. 250-252.
 13. Marvin C.W. (2012)Determining the strength of Corroded Pipe. Materials propection and Perfomance. 11..38-40.
 14. Vasilkovsky O., Rivard A. (2013)The effect of hydrogen sulfide in guide oil on fatigue ckack growth in pipe line steel. Corrosion. V.38. 1. 19-22.
 15. Makarenko V.D., Muravjev K.A.,Kalyanov A.I. (2006) Special features of manual ars welding of root joints in nonrotating welds in pipelines in Westem Siberia.Welding International.10 (5). 64-71.
 16. Makarenko V.D., Shatilo S.P.,Astafev V.I.(1998). Methods of increasing the corrosion resistance of oil pipelines. Welding Internationa. 12. 34-39.
 17. Makarenko V.D.,Shatilo S.P. (1999) Increasing desulphurisation of the metal of welded joints in oil pipelines. Welding International. 12. 56-61.

Макаренко Валерій Дмитрович – доктор технічних наук, професор кафедри «Нафтогазової інженерії та технологій» Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка. E-mail: leotar@ukr.net

Винников Юрій Леонідович – професор, доктор технічних наук Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.;

Ногіна Анастасія Максимівна – студентка Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.;

Петренко Олександр Олександрович – студент Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.