

УДК. 621.79.92.

Б.Татарин, канд.техн.наук; В.Мастенко, канд.техн.наук

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ОСНОВНІ ПРИЧИНИ ВИНИКНЕННЯ ГАРЯЧИХ ТРІЩИН ПРИ АВТОМАТИЧНОМУ НАПЛАВЛЕННІ ПІД ФЛЮСОМ АНТИКОРОЗІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Досліджено природу виникнення гарячих тріщин у наплавленому металі при автоматичному наплавленні стрічковим електродом марки Св-04Х20Н10Г2Б під флюсом ОФ-10, з вмістом понад 2 % фериту. Показано, що виникнення тріщин у наплавленому металі пов'язано з утворенням протяжних плівок легкоплавких евтектик.

З метою підвищення надійності, безпеки і терміну роботи на внутрішній поверхні вузлів першого контура енергетичних установок за допомогою наплавлення, застосовуючи наплавлювальні матеріали з нержавіючих сталей, наносять захисні корозійностійкі покриття, причому, для наплавлення верхнього шару використовують електродну стрічку з нержавіючої сталі з вмістом ніобію для забезпечення стійкості проти міжкристалітної корозії. Значне перемішування основного металу, з якого виготовлений даний виріб, з наплавленням, а також наявність сильних карбідотворюючих елементів (Nb, Ti), у ряді випадків призводить до утворення гарячих тріщин. Небезпека таких дефектів полягає в тому, що їх дуже важко виявити після наплавлення в уже готовій конструкції.

В антикорозійному наплавленому шарі першого контура енергетичних установок наявність тріщин не допускається, у зв'язку з чим виникла необхідність вивчення причин утворення гарячих мікротріщин при антикорозійному наплавленні електродними стрічками з нержавіючих сталей, що містять ніобій. Основними причинами, що викликають появу гарячих тріщин, є тип первинної кристалізації при затвердінні розплавленого металу ванни і достатньо високий вміст у ньому легкоплавких домішок, що ліквують на границі кристалів [1,2].

Схильність металу наплавленого шару до утворення гарячих тріщин залежить від кількості первинного δ -фериту в металі [3,4]. Проте дослідники [5] стверджують, що схильність до гарячого розтріскування тісніше пов'язана з процесом кристалізації і морфологією структури металу шва, ніж з вмістом первинного δ -фериту при температурі +20 °С. Первинна кристалізація феритного типу позитивно впливає на якість наплавленого металу. Аустенітна нержавіюча сталь, з вмістом майже 2% первинного δ -фериту, відмінно чинить опір гарячому розтріскуванню через кристалізацію типу первинного фериту і евтектичного фериту-аустеніту [5].

При кристалізації металу за типом первинного аустеніту без евтектичного фериту границі зерен прямі й гладкі, легко змочуються легкоплавкою сегрегуючою рідиною, що містить шкідливі домішки сірки, що і сприяє утворенню гарячих тріщин при появі мінімальних залишкових напружень [5]. З появою певної кількості евтектичного фериту при твердінні схильність до розтріскування зменшується.

Для забезпечення стійкості до утворення гарячих тріщин, поряд із забезпеченням феритного типу кристалізації, вводяться додатково модифікатори. При наплавленні внутрішніх поверхонь енергетичного обладнання використовуються електродні стрічки з незначним вмістом ніобію, що дозволяє зв'язувати вільний вуглець і зменшити схильність до міжкристалітної корозії після різних видів термічного оброблення. Проте ніобій може бути однією із причин, яка призводить до виникнення

тріщин у результаті утворення між дендритами крихких легкоплавких виділень, що складаються з аустеніту і карбиду ніобію [6].

У наплавленому металі внаслідок нерівномірного розподілу легуючих елементів окремі мікроділянки можуть мати чисто аустенітну структуру, хоч основний об'єм металу наплавлень має аустенітно-феритну структуру. При наявності у металі наплавленого шару незначної кількості ніобію можуть виникати гарячі мікротріщини. Дослідження тріщин, виявлених при багатошаровому наплавленні електродною стрічкою, легованою ніобієм, під флюсом, встановлено, що причиною їх утворення є аустенітний тип кристалізації наплавленого металу і процеси сегрегації до границь зерен основних легуючих елементів (Nb, Cr) [4]. Проте ці висновки не завжди повністю підтверджуються результатами експериментів.

Тому метою даних досліджень стало з'ясування причин утворень мікротріщин у металі при багатошаровому наплавленні з вмістом ніобію біля 1% і при наявності первинного δ -фериту понад 2%.

У ряді випадків при наплавленні антикорозійного шару електродною стрічкою марки Св-04Х20Н10Г2Б перерізом (0,7×50) мм під флюсом марки ОФ-10 у ньому виникають мікротріщини, хоч хімічний склад стрічки і кількість δ -фериту в наплавленому металі повністю задовольняє технічні вимоги.

Для дослідження причин утворення гарячих мікротріщин у наплавленому металі при використанні електродної стрічки марки Св-04Х20Н10Г2Б, хімічний склад якої задовольняє технічні вимоги на їх виготовлення, виконали статистичний аналіз значної кількості плавок електродної стрічки з метою теоретичного визначення їх схильності до утворення даних дефектів. Хімічний склад електродних стрічок (виготовлених з різних плавок) і металу, наплавленого ними під флюсом марки ОФ-10, подано в таблиці 1.

Таблиця 1. Хімічний склад стрічок марки Св-04Х20Н10Г2Б (сертифікатні дані) і металу, наплавленого цією маркою стрічки під флюсом марки ОФ-10 (вхідний контроль)

№ плавки	Матер. хіміч. аналізу	Хімічний склад, %								Вміст δ -фериту
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	P	S	
473729	Стрічка	0,03	0,39	1,9	18,9	9,8	1,0	0,014	0,003	4,5
	Метал	0,033	0,88	1,45	18,43	9,76	0,91	0,015	0,004	4,3
477675	Стрічка	0,03	0,27	2,0	18,8	9,6	1,0	0,014	0,001	5,9
	Метал	0,03	0,77	1,5	18,1	9,6	0,9	0,016	0,003	5,25
476227	Стрічка	0,02	0,3	1,44	18,9	9,6	0,9	0,012	0,001	6,1
	Метал	0,03	0,71	1,9	18,33	9,7	1,0	0,014	0,002	5,4
474075	Стрічка	0,02	0,34	1,9	18,8	9,5	1,0	0,015	0,003	5,4
	Метал	0,02	0,76	1,4	18,35	9,6	0,87	0,015	0,004	5,0
473904	Стрічка	0,03	0,29	2,0	18,8	9,5	1,0	0,014	0,003	5,0
	Метал	0,03	0,71	1,53	18,38	9,6	0,91	0,015	0,004	4,7
474271	Стрічка	0,03	0,26	2,0	18,7	9,5	1,01	0,015	0,001	4,5
	Метал	0,043	0,65	1,38	17,7	9,45	0,78	0,016	0,005	5,2
4937	Стрічка	0,02	0,32	1,9	19,0	10,26	1,10	0,016	0,009	5,2
	Метал	0,03	0,73	1,45	17,93	10,26	0,95	0,014	0,010	4,6

На основі літературних даних і проведених розрахунків на діаграмі (рис.1) подані теоретичні можливості тріщиностійкості наплавленого металу.

З діаграми (рис.1) видно, що ряд плавок для електродних стрічок марки Св-04Х20Н10Г2Б схильні до утворення тріщин. Однак при використанні стрічок із плавок 473729, 477675, 476227 для наплавлення під флюсом марки ОФ-10 тріщин у наплавленому металі не виявлено, а при наплавленні стрічкою із плавки 4937 тріщини

виявлено. Тому при проведенні експериментальних досліджень використовували електродну стрічку марки Св-04Х20Н10Г2Б перерізом (0,7×50) мм із плавок 476227 і 4937.

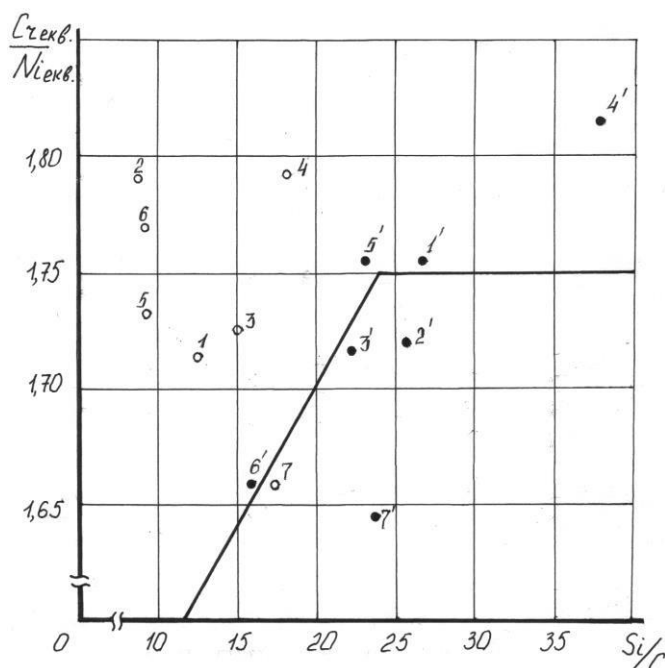


Рис.1. Ймовірність утворення гарячих тріщин у металі стрічок (різних плавок) марки Св-04Х20Н10Г2Б і відповідно у наплавленому металі при автоматичному наплавленні під флюсом марки ОФ-10 в залежності від хімічного складу (див.таб.1);
 1,2,3,4,5,6,7 - метал електродної стрічки;
 1',2',3',4',5',6',7' - наплавлений метал;
 1,1'- плавка №473729;
 2,2'- плавка №477675;
 3,3'- плавка №476227;
 4,4'- плавка №474075;
 5,5'- плавка №473904;
 6,6'- плавка №474271;
 7,7'- плавка №4937.

Для більш глибокого і ретельного вивчення причин утворення тріщин у наплавленому металі з використанням електродної стрічки марки Св-04Х20Н10Г2Б, яка задовольняє всі технічні вимоги, на зразки із сталі 15Х2НМФА наплавляли два шари: перший - стрічкою марки Св-07Х25Н13, а другий – стрічкою марки Св-04Х20Н10Г2Б під флюсом марки ОФ-10. Варіанти виконання наплавлень подані у таблиці 2, а хімічний склад наплавленого металу – у таблиці 3.

Таблиця 2. Варіанти наплавлень, виконаних електродними стрічками різних марок перерізом (0,7×50) мм під флюсом марки ОФ-10 на сталь марки 15Х2НМФА

Варіант наплавлень		Режим наплавлення	Вміст δ-фериту в металі в %	Наявність тріщин
Марка стрічки першого шару	Марка стрічки другого і наступного шарів, № плавки			
Св-07Х25Н13	Св-04Х20Н10Г2Б Плавка 4937	I=600-650 А U=32-36 В V _н =10 м/год	3,8	є
Св-07Х25Н13	Св-04Х20Н10Г2Б Плавка 476227	I=600-650 А U=32-36 В V _н =10 м/год	5,8	нема
Св-07Х25Н13	Св-04Х20Н10Г2Б Плавка 474075	I=600-650 А U=32-36 В V _н =10 м/год	5,3	нема
Св-07Х25Н13	Св-04Х20Н10Г2Б Плавка 474075	I=600-650 А U=32-36 В V _н =10 м/год Температура попереднього шару перед накладанням наступного до 100° С	5,2	нема

Після наплавлення верхній шар зачищали і проводили контроль на наявність тріщин методом кольорової дефектоскопії. При цьому на зразках наплавлених стрічкою плавки 4937 виявлені поодинокі тріщини, а на зразках плавки 476227, тріщин не було. Після цього визначали хімічний склад (таб.3) наплавленого металу, отриманого з використанням режимів, поданих у таблиці 2, і вирізали зразки для дослідження макро- і мікроструктури з метою виявлення тріщин у глибині наплавленого металу між наплавленими шарами.

Таблиця 3. Хімічний склад наплавленого металу електродними стрічками (різних плавок) марки Св-04Х20Н10Г2Б під флюсом марки ОФ-10

№ плавки стрічки	Хімічний склад, %												
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb	Co	Cu	Pb 10 ⁻³	Sn 10 ⁻²	Sb 10 ⁻³
476227	0,03	0,71	1,44	0,014	0,001	18,4	9,91	0,87	0,03	0,09	0,004	0,04	0,0006
474075	0,025	0,71	1,53	0,015	0,002	18,38	9,65	0,91	0,015	0,020	0,12	0,35	0,8
4937	0,03	0,87	1,45	0,018	0,015	18,10	10,40	0,99	0,024	0,3	0,4	0,4	1,2

З метою виявлення тріщин, їх кількості і розміщення відносно границь наплавлених валиків проводились експериментальні дослідження на стереомікроскопі типу МВС-9 макроструктури наплавленого металу на зразках, вирізаних перпендикулярно по відношенню до напрямку наплавлення. Кількість феритної фази визначали контактним феритометром ФВД-2.

У зразках, наплавлених стрічкою плавки 4937, виявлено значну кількість тріщин (рис. 2). Причому тріщини виявлені у всіх шарах (валиках), а їх кількість зростає від першого шару наплавлення до останнього. Найбільше розкриваються ці тріщини у зоні сплавлення верхнього шару з нижнім. Вміст δ-фериту в межах 2÷5% і задовольняє технічні вимоги.

Електролітичне травлення мікрошліфів щавелевою кислотою з наступним вивченням структури з допомогою оптичного мікроскопа MeF-2 виявило, що тріщини проходять паралельно одна до одної на границях стовбчатих кристалів і розміщуються у нижній частині наплавлених валиків (рис.2а). Така картина спостерігається по всій товщині наплавленого шару. В зоні термічного впливу тріщини більш розкриті з тонким розгалуженням, що поширюється вгору і вниз від зони сплавлення. Довжина тріщин збільшується від нижніх шарів до верхніх. Так, довжина тріщини у 5 шарі у межах 0,2÷0,7 мм, 6-го - 0,2÷1,1 мм, 7-го - 0,2÷1,5 мм. У 7-му валику переважають тріщини більш розкриті, з боку попередньо наплавленого валика (рис.2 б).

У зонах тріщин характерний стрічковий ферит, який частково скоагульований і розчинився (рис.2 в), в середині шарів ферит має скелетну, або стрічкову форму (рис.2 г).

При дослідженні макроструктури протравлених зразків, наплавлених стрічками плавки 474075 і 476227 і вирізаних з наплавленого металу перпендикулярно до напрямку наплавлення тріщин, не виявлено.

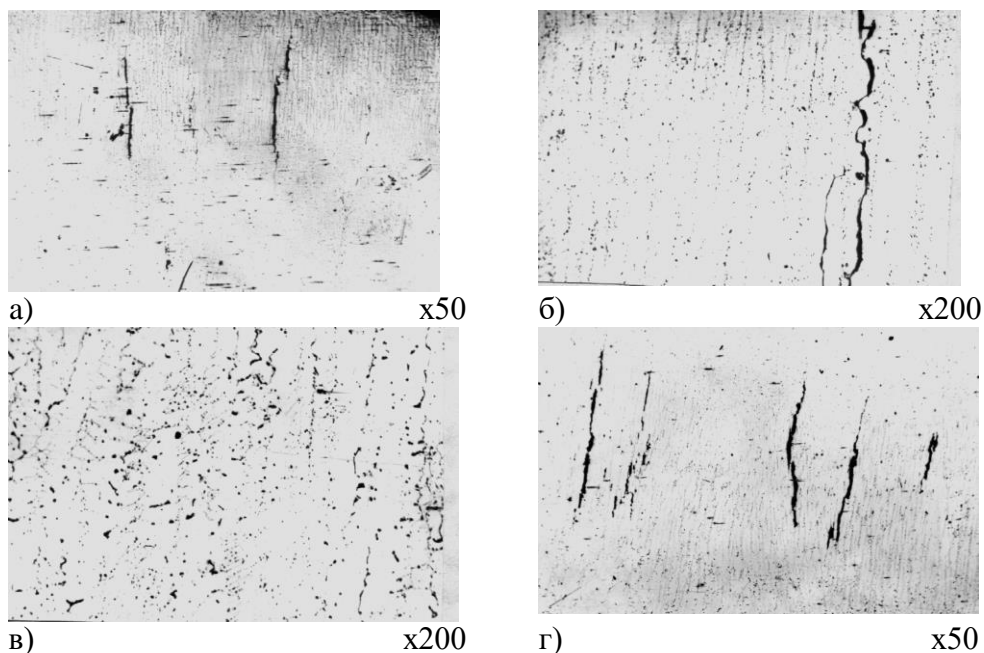


Рис.2. Мікроструктура наплавленого металу зразка стрічкою плавки 4937:
 а – розміщення тріщин на границях дендритів у зоні термічного впливу попередніх шарів;
 б – характер розміщення тріщин між шостим і сьомим шарами;
 в – характер фериту в зоні тріщин;
 г – характер фериту всередині шару.

З метою уточнення області знаходження тріщин і вияснення причин їх утворення проводили дослідження типу первинної кристалізації і характеру виділень в зоні їх утворення. Після хімічного травлення зразка у розчині NH_4F встановлено, що ферит знаходиться в середині комірок, що свідчить про первинну кристалізацію наплавленого металу в δ -ферит (рис.3 а, б, в). Крім цього, ферит трапляється і на границях дендритів, що утворюється по евтектичному механізмі (рис. 3 а).

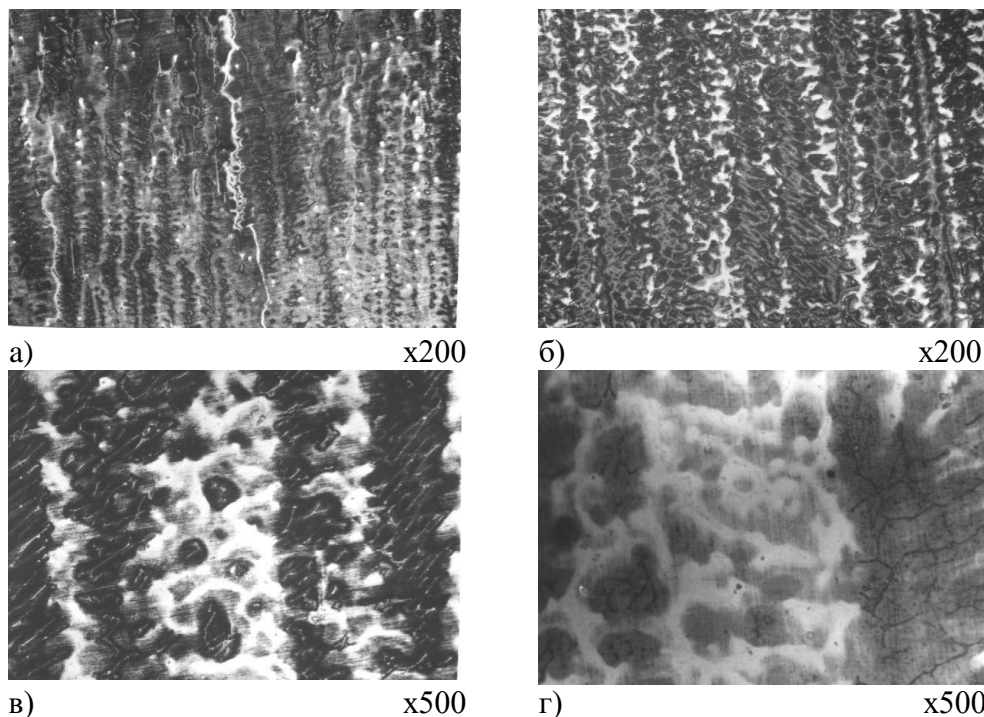


Рис.3. Мікроструктура наплавленого металу зразка стрічкою плавки 4937:
 а, б – розміщення фериту на границях дендритів;
 в – аустеніт, що утворився з рідини і знаходиться у міжкомірковому просторі;
 г – розміщення залишкової фази на границях дендритів у міжкомірковому просторі.

Останнім кристалізується аустеніт, який утворений з останніх порцій рідкого металу (рис.3 в) і знаходиться в міжкомірковому просторі дендритів. Частково δ -ферит перетворюється на аустеніт (від світло-сірих до темно-сірих ділянок, рис. 3 а,б). Залишкова фаза знаходиться всередині світлих ділянок, що закристалізувалися останніми (рис. 3 г). Їх найбільше скупчення має вигляд ланцюжків і характерних евтектик на границях дендритів. Таким чином, можна передбачити, що кристалізація відбувалася спочатку з виділенням δ -фериту, а потім рідкий метал, що залишився у міждендритному і міжкомірковому просторі закристалізувався за евтектичним ($L \rightarrow \delta + \gamma$) або перетектичним ($\delta + L \rightarrow \gamma$) механізмом. Тріщини проходять по світлих ділянках, що закристалізувалися останніми і в яких спостерігається виділення залишкових фаз.

Пізніше проводили дослідження складу залишкових фаз, що знаходяться біля тріщин. Хімічний склад неметалевих включень і залишкових фаз у наплавленому металі, а також характер розподілу елементів біля тріщини визначалися методом кількісного мікроспектрального аналізу на растровому електронному мікроспектральному аналізаторі "Сamebax". Дослідження характеру розподілу фаз на поверхні тріщини, їх розмірів, форми та ідентифікація проводились з використанням електронного мікроскопа ЭМВ-100АМ й аналізатора "Сamebax".

Мікроспектральний аналіз на вміст Ca, Ni, Si, Mn і S виконували у зоні тріщини, а саме границі між дендритами, тіла дендрита та евтектик, що є продовженням утвореної тріщини. При аналізі розподілення хімічних елементів на границі між дендритами (рис. 4 а) виявлено чіткий пік ніобію, а у елементів хрому, нікелю, кремнію, марганцю піків немає. Вміст сірки у цій зоні мінімальний, відповідно ніобій не утворює з'єднань з перерахованими елементами. З розподілу вказаних елементів на тілі дендрита видно (рис. 4 б), що в центрі комірок, де розміщені частини фериту, підвищена концентрація хрому і занижений вміст нікелю.

Крім цього, у феритних комірках є підвищений вміст сірки, порівнянно з міжкомірковими ділянками, що підтверджує феритну кристалізацію наплавленого металу. Майже у всіх міжкоміркових і міждендритних ділянках є піки вмісту ніобію. Аналіз евтектик, що є продовженням поширення тріщин, виявив піки вмісту в них ніобію, при цьому піки вмісту сірки з ними не збігаються (рис.5 а). Виявлені неметалеві включення у коміркових ділянках дендриту ідентифіковані як сульфіди марганцю (рис.5 б).

Поряд з цим, сульфіди марганцю перебувають у безпосередній близькості від фази, що містить ніобій. Так можна зробити висновок, що в цьому випадку ліквідація сірки не отримала значного поширення порівняно з ліквідацією ніобію. Проте сульфіди практично завжди виявляються у зоні розтріскування на границях дендритів і часто перебувають разом з ніобієвими евтектиками і включеннями в міжкомірковому просторі. Ймовірно, сірка не є основною причиною утворення тріщин.

Таким чином, основна і суттєва відмінність структури зразків наплавлених стрічками плавок 474075, 476227 і 4937 полягає у тому, що в зоні між наплавленими шарами двох перших зразків не виявлено протяжних ланцюжкових включень, що містять ніобій, а в зразку плавки 4937 їх виявлено багато. Поряд з цим є короткі ланцюжкові і евтектичні скупчення у включеннях, зосереджених у внутрішніх зонах шару (рис.6 а, б).

Аналіз зони між наплавленими шарами (зразок, наплавлений стрічкою плавки 4937) з великою кількістю тріщин, що у цій зоні чітко виражені на границі дендритів, здебільшого вкритих включеннями, що містять ніобій (рис.7).

У міждендритних ділянках розміщуються фази, що містять ніобій, у вигляді евтектик і коротких ланцюжків. У зоні між наплавленими шарами розміщуються тріщини, що поширюються як у верхній, так і в нижній шарі наплавленого металу.

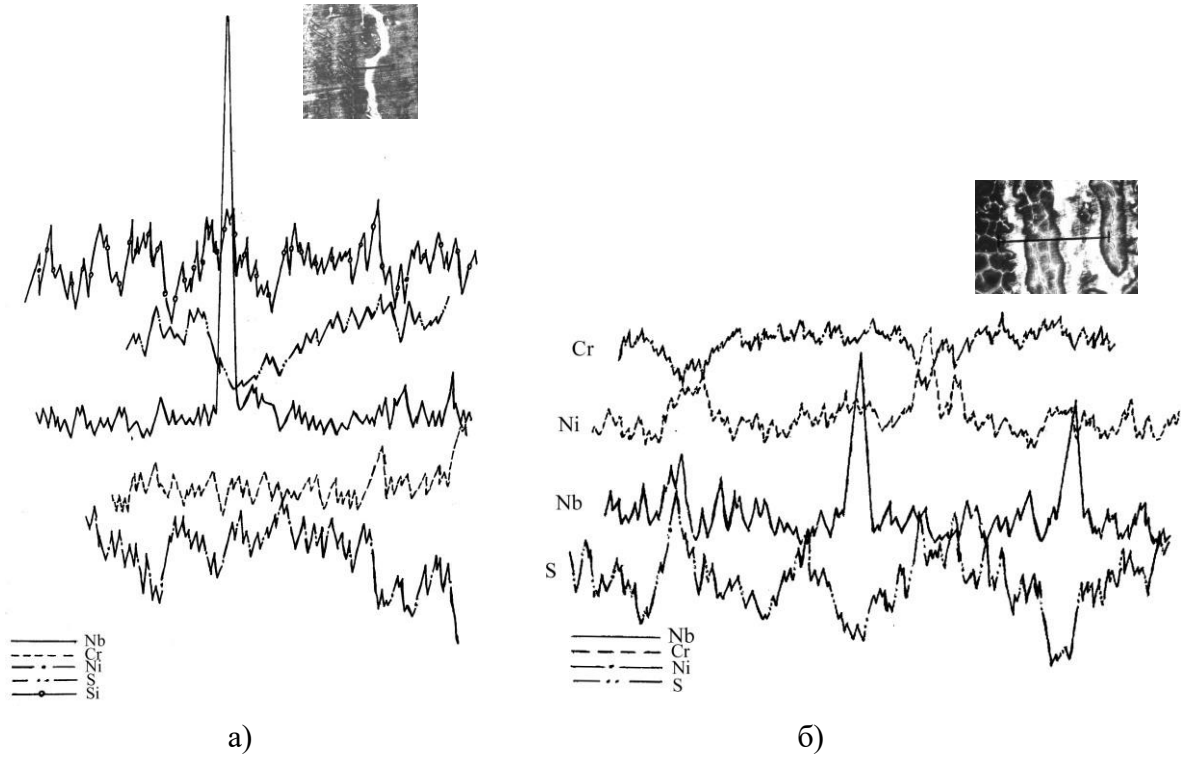


Рис.4. Розподіл хрому, нікелю, ніобію, кремнію й сірки у наплавленому металі:
 а – на границі між дендритами;
 б – на тілі дендриту.

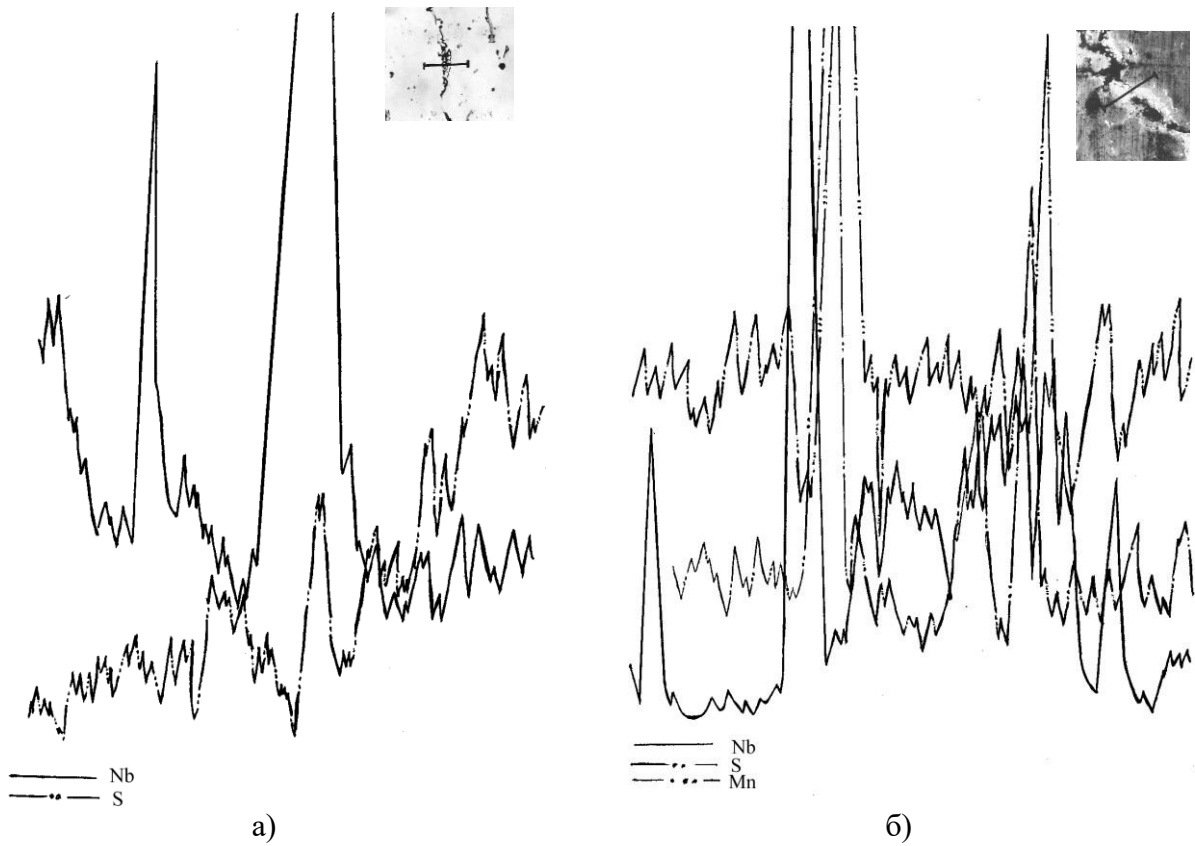


Рис.5. Розподіл ніобію, сірки, марганцю у наплавленому металі:
 а – в евтектиці;
 б – у неметалевих включеннях.

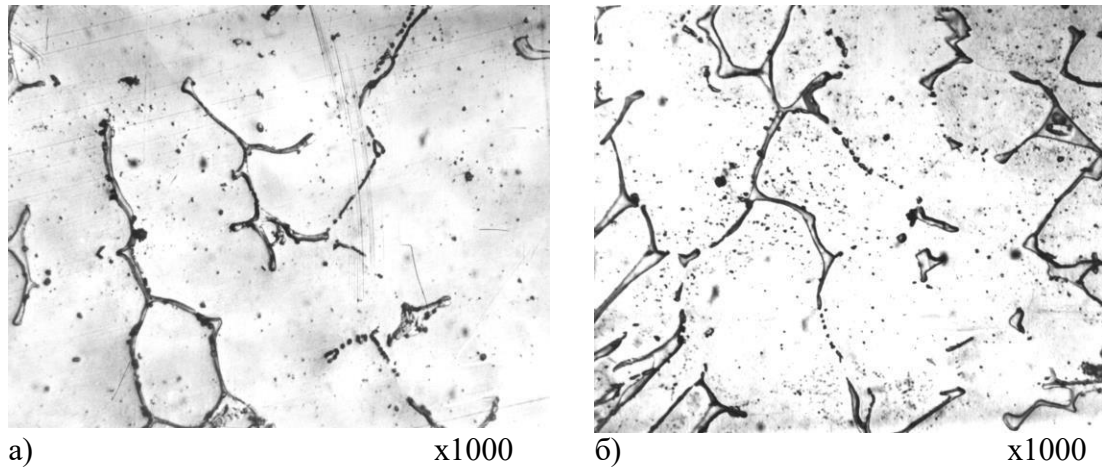


Рис.6. Мікроструктура металу, наплавленого електродною стрічкою марки Св-04Х20Н10Г2Б під флюсом марки ОФ-10 з первинно феритним типом кристалізації і з ланцюжковими і евтектичними скупченнями включень, що містять ніобій:

а – стрічка плавки 476227;
б – з плавки 474075.

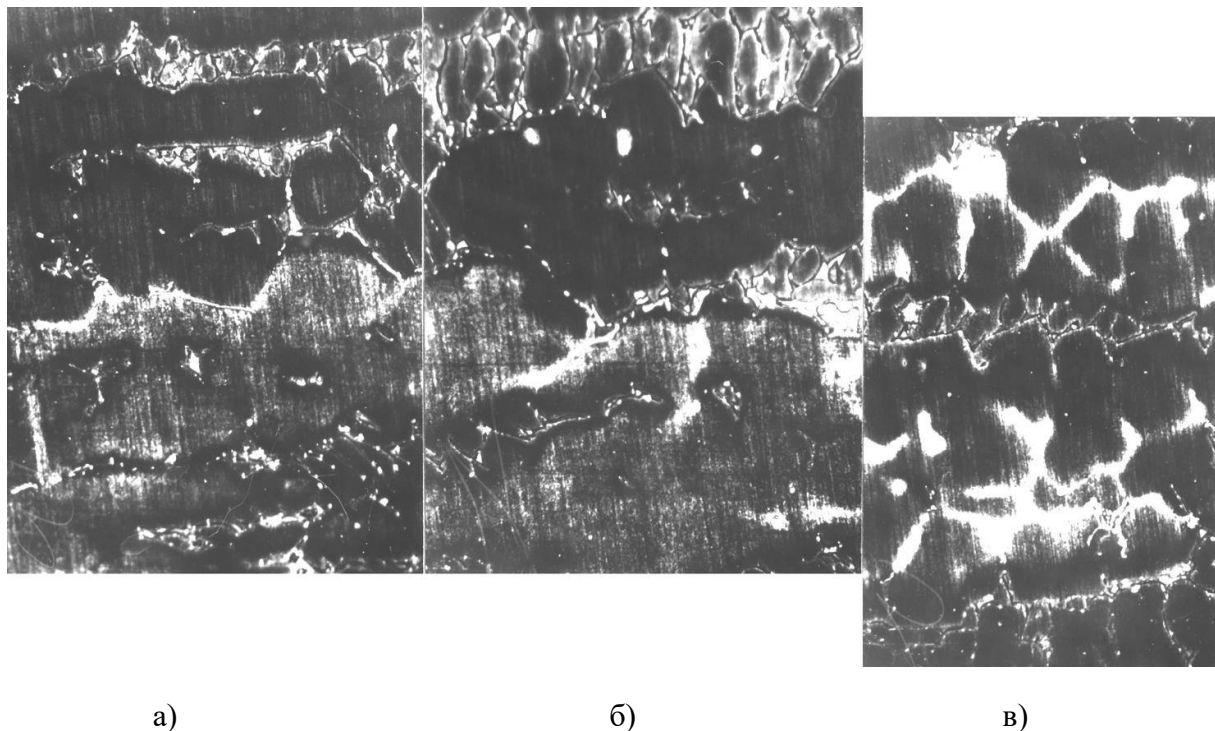


Рис.7. Мікроструктура границь дендритів, які проходять через міжшарову зону наплавленого металу:

а – границя між шарами;
б,в – границя у верхньому шарі;

Дослідження поверхні тріщини в металі, наплавленому електродною стрічкою марки Св-04Х20Н10Г2Б перерізом (0,7×50)мм під флюсом марки ОФ-10 показали, що на ній виявлено евтектичні утворення у вигляді фериту і з'єднань ніобію, а також тонкі плівки карбиду ніобію і дрібнодисперсну легкоплавку (плавиться під електронним променем) фазу, ідентифіковану як складний оксид $MnO \cdot FeO \cdot Al_2O_3$.

У місцях відсутності тріщин злам має в'язкий характер, а на поверхні виявлені плівки карбиду ніобію з шлаковими включеннями типу SiO_2 . Евтектичних утворень і легкоплавких фаз складного окислу типу $MnO \cdot FeO \cdot Al_2O_3$ не виявлено.

При наплавленні електродними стрічками марки Св-04Х20Н10Г2Б під флюсом марки ОФ-10, незважаючи на феритну первинну кристалізацію наплавленого металу і

значну кількість в ньому δ -фериту, в ряді випадків тріщини утворюються по всій товщині валиків. Очевидно, що у всіх випадках при феритній первинній кристалізації ніобій сприяє утворенню тріщин. Таким чином, поява тріщин пов'язана з утворенням протяжних легкоплавких евтектик, що містять ніобій плівкового типу на границях зерен. При цьому ці евтектики виділяються в останній момент кристалізації. Можливо, що однією з причин виникнення тріщин є технологічні особливості виготовлення наплавлювальних матеріалів і сам процес автоматичного наплавлення під флюсом електродною стрічкою.

Висновки

1. Встановлено, що однією з причин виникнення гарячих тріщин у наплавленому металі є утворення протяжних легкоплавких евтектик, що містять ніобій плівкового типу на границях зерен.
2. Можливо, однією із причин виникнення тріщин також є технологічні особливості виготовлення наплавлювальних матеріалів і сам процес автоматичного наплавлення під флюсом електродною стрічкою.

Investigations of the hot cracks innitiation appearance in the filler metal while the automatic surfacing by the strip С6-04Х20Н10Г2Б electrode under ОФ-10 flux with maximum 2% Fe contense are presented. It is shown that the cracks innitiation in the filler metal is caused by the appearance of the draw film fusible eutectics.

Література

1. Медовар Б.И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. –М.: Машиностроение, 1966. – 428с.
2. Любовский В.И., Тимофеев М.Н. Дуговая сварка аустенитных жаропрочных сталей. – М.: Машиностроение, 1968. – 62 с.
3. Brooks J.A., Thompson A.W., Williams J.C. A fundamental study of the beneficial effects of delta ferrite in reducing weld cracking. – Welding Jornal, 1984, 63, 3. p.71-83.
4. Рунов А.Е., Любовский К.В. О влиянии ферритной фазы на свойства наплавленного и основного металла сварных соединений хромоникелевых аустенитных сталей//Сварочное производство.-1969.- №9.- С.15-19.
5. Kataijma S., Fujimoto T., Matsunawa A. Correlation among colidification procese, microstructure, microsegregation and solidification cracking susceptibility in stainless steel weld metals. – Trans JWR y, 1985, 14, 1. p. 123-138.
6. Бор, кальций, ниобий, цирконий в чугунах и сталях /Перевод с английского под. ред. С.М.Виноградова. – М.: Металлургиздат, 1961. - С.21-30.
7. Killing U., Killing K., Thien H. Betragsung Frage der Erstarrung ein lagigor austenitischer Banaplattirungen. –DVS-Berichte, Bd.75, s. 21-26, DVS-Verlag, Dusseldorf.

Одержано 19.02.01 р.