

УДК: 620.62

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.010721.26.779

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН НЕЗАДОВІЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ ДОСЛІДНИХ ПОКОВОК З АУСТЕНІТНИХ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

ДЕЙНЕКО Л. М.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,
СУХОМЛИН Г. Д.², *докт. техн. наук, проф.*,
ДЕРГАЧ Т. О.³, *докт. техн. наук, провід. наук. співроб.*,
БОРИСЕНКО А. Ю.⁴, *канд. техн. наук, ст. наук. співроб.*

^{1*} Кафедра термічної обробки металів, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна
тел. +38 (095) 653-54-14, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

² Лабораторія експериментальних наукових досліджень, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,
вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. + 38 (050) 657-18-00, e-mail: g_suhomlin@ukr.net,
ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

³ Лабораторія експериментальних наукових досліджень, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,
вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. + 38 (050) 867-30-97, e-mail: ta_dergach@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-
0235-5342

⁴ Лабораторія проблем структуроутворення та властивостей чорних металів, Інститут чорної металургії НАН України,
пл. Акад. К. Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 694-18-46, e-mail: asbor@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-
2120-0944

Анотація. *Мета роботи* – встановити основні причини браку при ультразвуковому контролі (УЗК) дослідних поковок із високолегованої аустенітної сталі 08X18H10T на основі комплексних порівняльних досліджень зразків забракованих і придатних поковок. *Методики.* Хімічний аналіз поковок проводили на високочутливому спектрометрі «SPECTROMAX» фірми «SPECTRO», Німеччина; дослідження макро- і мікроструктури (лікваційної неоднорідності, зеренної й зернограничної структури, неметалевих включень, надлишкових фаз тощо) здійснювали методами: металографічним і електронномікроскопічним із мікрорентгеноспектральним аналізом; випробування поковок на тривкість проти міжкристалітної корозії (МКК) проводили методом АМУ, ГОСТ 6032. *Результати.* Встановлено, що забраковані за УЗК дослідні поковки, на відміну від придатних, характеризувалися: наявністю ділянок лікваційної неоднорідності сталі, в тому числі підвищеним умістом δ-фериту; аномальною різнозернистою мікроструктурою з величиною зерна від –2 до 8 балів за ГОСТ 5639; виділеннями карбідів хрому на границях аустенітних зерен; схильністю до міжкристалітної корозії (МКК). Вони містили неметалеві включення у допустимих межах за ГОСТ 1778, а також карбіди титану. *Наукова новизна.* Вперше на основі комплексних досліджень доведено, що імовірна причина незадовільних результатів УЗК дослідних поковок із високолегованої аустенітної сталі – це аномальна різнозерниста структура, пов'язана з нестабільним температурно-деформаційним режимом кування зливків. *Практична значимість.* Розроблено рекомендації для поліпшення структури і підвищення якісних характеристик промислових поковок із високолегованих аустенітних сталей в умовах промислового виробництва.

Ключові слова: високолегована аустенітна сталь; кування; поковки; ультразвуковий контроль; структура; міжкристалітна корозія

INVESTIGATION OF THE CAUSES OF UNSATISFACTORY RESULTS OF ULTRASOUND CONTROL OF EXPERIMENTAL FORGES FROM AUSTENITE HIGH-ALLOY STEEL

DEINEKO L.M.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
SUKHOMLYN H.D.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
DERHACH T.O.³, *Dr. Sc. (Tech.), Head Res.*,
BORYSENKO A.Yu.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Sen. Res. Ass.*

^{1*} National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Haharina Ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 653-54-14,
e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

² Experimental Research Laboratory. Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. + 38 (050) 657-18-00, e-mail: g_suhomlin@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-0790-6473

³ Experimental Research Laboratory. Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. + (050) 867-30-97, e-mail: ta_dergach@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0235-5342

⁴ Laboratory of Problems of Structure Formation and Properties of Ferrous Metals, Institute of Ferrous Metallurgy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Academician Starodubov Sq., 49107, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 653-54-14, e-mail: asbor@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-2120-0944

Abstract. *The purpose of the work* is to establish the main causes of defects by ultrasonic testing (UST) of experimental forgings made of high-alloyed austenitic steel 08Kh18N10T on the basis of comprehensive comparative studies of samples of defective and suitable forgings. **Techniques.** Chemical analysis of forgings was performed on a high-sensitivity spectrometer "SPECTROMAX" company "SPECTRO", Germany; studies of macro- and microstructure (liquation heterogeneity, grain boundary structure, non-metallic inclusions, excess phases, etc.) were carried by the methods: metallographic and electron microscopic with micro-X-ray spectral analysis; tests of forgings for durability against intergranular corrosion (IGC) were carried out by the methods of AMU, GOST 6032. **Results.** It was established that experimental forgings rejected by UZK, in contrast to suitable forgings, were characterized by: the presence of areas of liquation inhomogeneity of steel, including high content of δ -ferrite; local defects of the macrostructure in the form of flocs; areas with anomalous multi-grained microstructure with a grain size of -2 to 8 points according to GOST 5639; release of chromium carbides at the boundaries of austenitic grains; susceptibility to intergranular corrosion (ICC). All forgings contained non-metallic inclusions within the permissible limits according to GOST 1778, as well as titanium carbides. **Scientific novelty.** For the first time on the basis of complex researches it is proved that the main reason of unsatisfactory results of UZK of experimental forgings from high-alloyed austenitic steel, is the anomalous multigrain structure connected with the unstable temperature-deformation mode of forging of ingots. **Practical significance.** Recommendations for improving the structure and improving the quality characteristics of industrial forgings made of high-alloy austenitic steels in terms of industrial production have been developed.

Keywords: *high-alloy austenitic steel; forging; forgings; structure; ultrasonic testing; intergranular corrosion*

Вступ. Поковки з високолегованих аустенітних сталей знаходять широке застосування в різних галузях промисловості як товарна, а також переробна продукція, в основному, для виготовлення виробів відповідального призначення [1–5]. Тому до їх якісних характеристик ставляться високі вимоги, що передбачають оцінювання макро- і мікроструктури, ультразвуковий контроль (УЗК), випробування на тривкість проти міжкристалітної корозії (МКК) та ін. [4–8].

Для виготовлення якісних поковок із високолегованих аустенітних сталей, в основному зі сталей 08X18N10T (321), 03X18N11 (304 L) і 03X17N14M3 (316 L), на низці підприємств перед виготовленням промислових партій продукції проводять дослідно-промислове випробування технології з метою коригування деформаційно-термічних режимів обробки зливків і поковок для кожної марки сталі. При цьому для оперативного і надалі остаточного контролю якості поковок використовують УЗК як найбільш зручний та інформативний експрес-метод, що реагує на наявність внутрішніх дефектів,

мікроструктуру та розмір зерна сталі, які впливають на механічні, корозійні, технологічні та експлуатаційні властивості виробів. Згідно з діючими нормативно-технічними документами, ультразвуковий контроль є також одним із обов'язкових здавально-приймальних випробувань поковок з високолегованих сталей.

Можливими причинами незадовільних результатів УЗК поковок можуть бути дефекти як металургійного походження (які утворюються у процесі виплавки, розливання та кристалізації сталі), так і деформаційного походження – під час кування зливків. До першого типу належать в основному дефекти макроструктури (шлакові та крупні неметалічні включення, флокени, порожнини); ліквіційна неоднорідність сталі, підвищений вміст δ -фериту (більше бала 2 за ГОСТ 11878); наявність ділянок із підвищеними мікродеформаціями (напруженнями) і пов'язані з ними мікротріщини та інші дефекти макроструктури.

До другого типу дефектів належать: структурна і хімічна мікронеоднорідність металу поковок (аномально крупне зерно,

різнозернистість, виділення несприятливих надлишкових фаз тощо). Зазначені дефекти залежать як від якості сталі, так і від температурно-деформаційних параметрів кування і термічної обробки зливка під час виготовлення поковок [1; 2; 8].

Мета роботи – встановити основні причини браку при ультразвуковому контролі (УЗК) дослідних поковок із високолегованої аустенітної сталі 08X18H10T на основі комплексних порівняльних досліджень зразків забракованих і придатних поковок.

Матеріал і методи досліджень. Для досягнення поставленої мети від різних ділянок (придатних і забракованих по УЗК) двох дослідних поковок сталі марки 08X18H10T було відібрано пластини-заготовки і з них виготовлено зразки для визначення хімічного складу сталі, металографічних і електронно-мікроскопічних досліджень структури та випробувань на тривкість проти міжкристалітної корозії (МКК).

Хімічний аналіз зразків поковок здійснювали на спектрометрі "SPECTROMAX" фірми "SPECTRO", Німеччина. Макро- і мікроструктуру досліджували методами світлової та електронної мікроскопії з мікрорентгеноспектральним аналізом. Структурні дослідження включали оцінювання виду і кількості неметалевих

включень, особливостей мікроструктури, – наявності структурної неоднорідності, δ-фериту, виділень надлишкових фаз на границях і в тілі зерна та ін. Мікроструктурні дослідження проводили на нетравлених шліфах, на шліфах після електролітичного травлення в розчинах кислот: 10 % щавлевої і 3 % азотної.

Випробування на тривкість проти МКК проводили методом АМУ, ГОСТ 6032, – шляхом кип'ятіння протягом 8 годин плоских зразків у розчині сірчаної кислоти і мідного купоросу з оцінюванням результатів за наявністю або відсутністю характерних міжкристалітних тріщин на поверхнях Z-подібного вигину зразка після випробувань, а також електролітичним травленням металографічних шліфів протягом 1,5 хвилин у 10 % щавлевій кислоті за щільності анодного струму 1 А/см² з наступним аналізом структур травлення (метод ТЩК, ГОСТ 6032) [8–10].

Результати досліджень. Контрольний хімічний аналіз дослідних поковок показав (табл. 1), що за вмістом основних легуючих елементів (хрому, нікелю, титану), технологічних добавок (марганцю, кремнію) і домішок, що регламентуються (вуглецю, сірки, фосфору), поковки відповідають вимогам стандартів на сталь 08X18H10T і виробі із неї.

Таблиця 1

Результати контрольного хімічного аналізу дослідної поковки зі сталі 08X18H10T (рядок 1) і вимоги ГОСТ 5632 (рядок 2)

Вміст хімічних елементів, мас. частка (%)								
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti
0.073	0.28	1.68	9.87	0.008	0.038	17.31	0.27	0.50
до 0.08	до 0.8	до 2	9–11	до 0.02	до 0.040	17–19	до 0.3	5С–0.7

Металографічними дослідженнями у структурі зразків, відібраних від забракованих за УЗК дослідних поковок, виявлено різні характерні макро- і мікродефекти, представлені областями ліквідаційної та структурної неоднорідності (рис. 1 а, б), в яких ділянки з дрібнозернистою мікроструктурою сусідять із ділянками з аномально крупним зерном

[8; 10]. На границях аустенітних зерен спостерігається виділення карбідів хрому (рис. 1 б і 2 а, б), що підтверджено мікрорентгеноспектральним аналізом (рис. 2 в, г, д). Це може свідчити про завершення деформації кування зливок за температур виділення зазначених карбідів в аустенітних хромонікелевих і

хромонікельмолібденових сталях ($\leq 850^\circ\text{C}$) [11–13].

У процесі детального дослідження мікроструктури дослідних поковок встановлено наявність двох принципово різних типів зеренної структури сталі (рис. 3). Перший з них характеризувався яскраво вираженою аномальною різнозернистістю – сполученням аномально крупних нерівновісних зерен (№ –2) з дрібними полігональними зернами (№ 8–9) (рис. 3 а, б). Такий тип структури спостерігався на забракованих при УЗК поковках (зокрема, на зразках, відібраних від ділянок, наближених до їх ребер і вершин, які під час кування піддаються пришвидшеному охолодженню).

Другий тип структури характеризувався відносно рівновісними дрібними аустенітними зернами № 8–9 (рис. 3 в) і був характерним для придатних за УЗК поковок.

Слід зазначити, що аномальну різнозернисту мікроструктуру спостерігали і раніше в металургійному і трубному виробництві: у забракованій за УЗК кованій трубній заготовці зі сталі 03X18H11 виробництва Дніпровського металургійного комбінату (ДМК) (рис. 4 а); у холоднокатаних трубах зі сталі 12X18H10Т і 03X18H11 (рис. 4 б, в), підданих критичній деформації та наступному високо-температурному відпалу [7; 11–13]. І такі дані зустрічаються також в інших літературних джерелах [14].

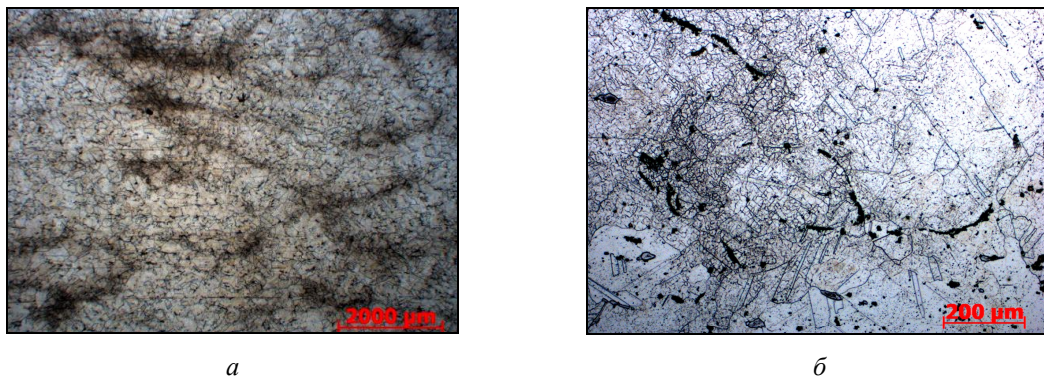


Рис. 1. Область ліквіційної (а) і структурної (б) неоднорідності у забракованому УЗК зразку дослідної поковки зі сталі 08X18H10T

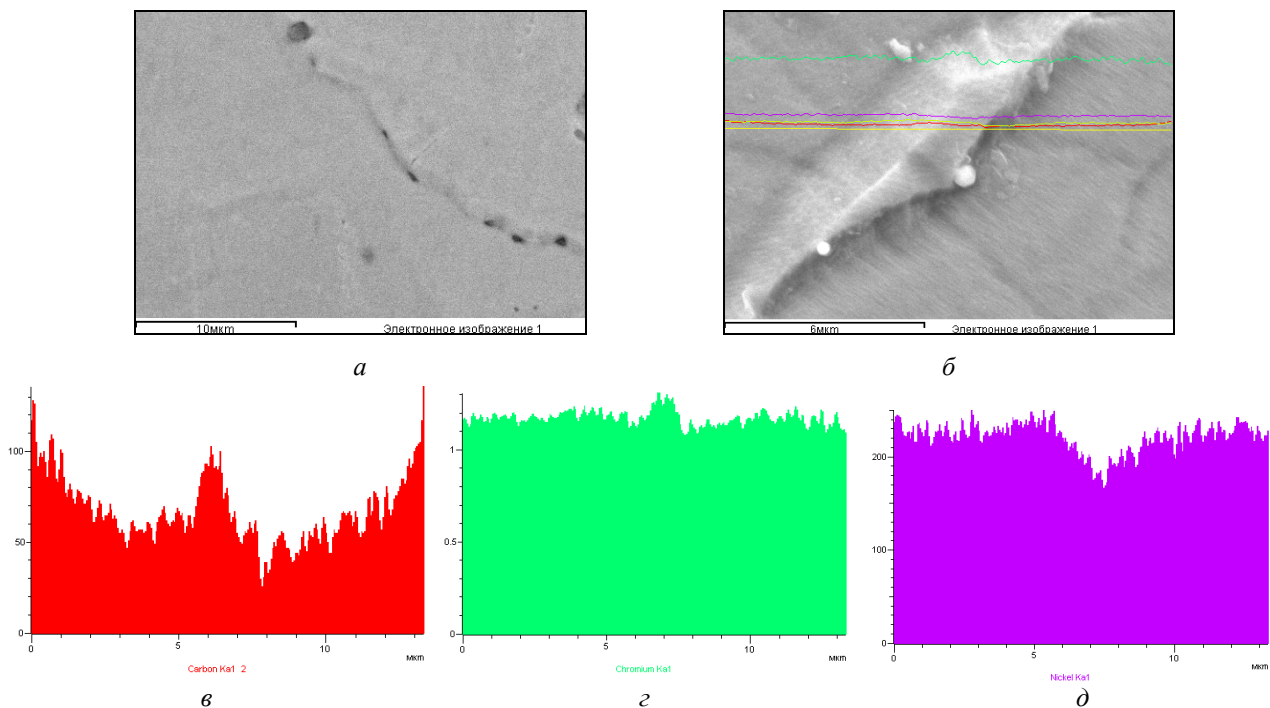


Рис. 2. Електронне зображення карбідів хрому на границях зерен (а, б) та їх спектрограми (в–д)

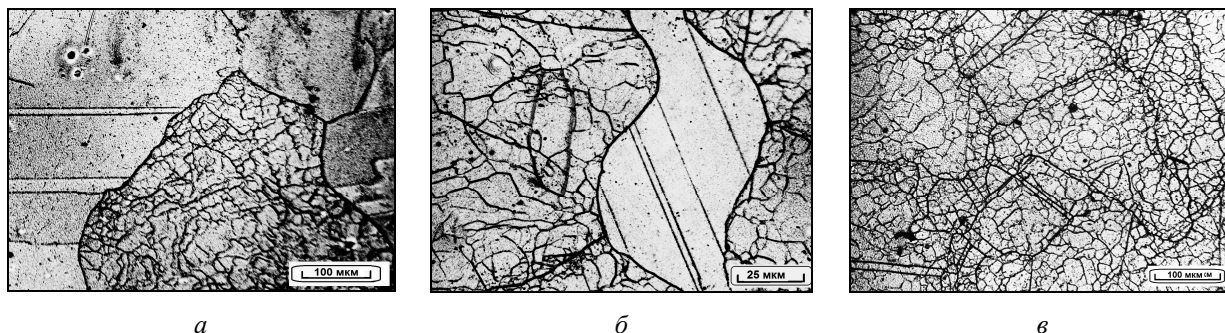


Рис. 3. Зеренна структура характерних ділянок дослідних поковок, які не витримали випробування УЗК (а, б, I тип) і структура придатної за УЗК поковки (в, II тип)

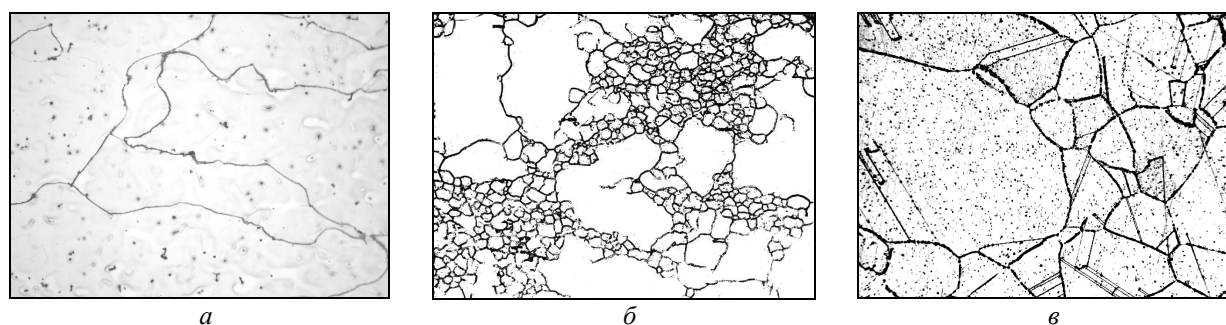


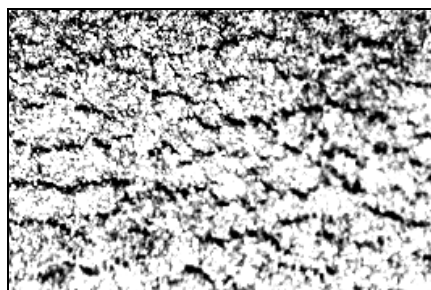
Рис. 4. Різномірні структури: трубної заготовки зі сталі 12Х18Н10Т ДМК (а) і холоднокатаних труб зі сталі 12Х18Н10Т (б) і 03Х18Н11 (в), $\times 200$

Звертає на себе увагу також наявність у аномально крупних аустенітних зернах забракованих по УЗК поковок значної кількості двійників відпалу (рис. 3 а, б), що характерно для структури сталі 08Х18Н10Т, підданій критичній деформації і наступному тривалому високотемпературному відпалу.

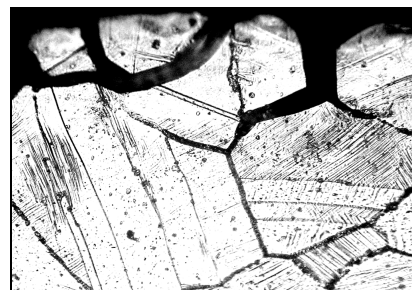
Отже, аномальна структура дослідних поковок, скоріш за все, зумовлена нестабільністю температурно-деформаційних параметрів кування зливків із завершенням проміжних і кінцевої деформацій за понижених температур.

З іншого боку, різномірність сталі може бути пов'язана також зі спадковим негативним впливом на неї утворення ліквіаційної неоднорідності литої структури зливків [8; 10], для зменшення якої необхідне коригування режимів гарячої деформації під час виготовлення поковок.

Зразки від дослідних поковок з аномальною структурою, на відміну від поковок із задовільною структурою, не витримали випробування на тривкість проти міжкристалітної корозії методом АМУ, ГОСТ 6032 (рис. 5).



а



б

Рис. 5. Міжкристалітні тріщини на поверхні Z-подібного вигину зразка після випробувань методом АМУ (а, $\times 20$) та канавкова структура і розтравлювання границь зерен після ТЩК (б, $\times 400$)

На поверхнях Z-подібного вигину таких зразків після випробувань спостерігали

характерні міжкристалітні тріщини, видимі за збільшення 8–12 (рис. 5 а), а після

електролітичного травлення металографічних шліфів у 10 % щавлевій кислоті – розтрави і канавкову структуру на границях аустенітних зерен (рис. 5 б) [10; 13].

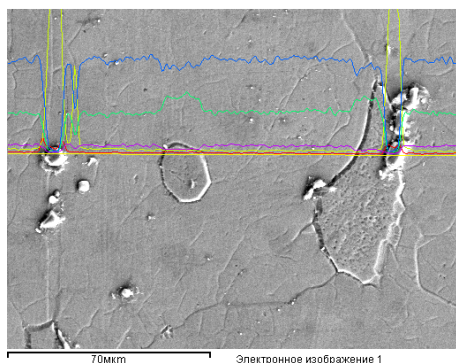
Неметалеві включення (НВ) у поковках, оцінені за шкалою Ш 6 ГОСТ 1778, були представлені крихкими силікатами (СН), нітридами і карбонітридами рядковими (НР) і точковими (НТ) та оксидами, у кількості 1,5...2 бали, що не суперечить вимогам НД.

Привертає увагу дещо підвищений (до 2 балів за ГОСТ 17878), але в межах вимог НД, вміст δ -фериту в забракованих за УЗК дослідних поковках порівняно з придатними поковками, існування якого було підтверджене електронно-мікроскопічними дослідженнями зразків поковок із застосуванням енергодисперсійного аналізу (рис. 6 а–г, табл. 2).

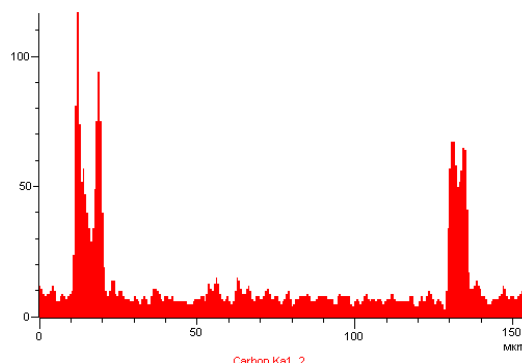
Видно, що δ -фаза характеризується підвищеним вмістом хрому (рис. 6 в) і пониженим нікелю (рис. 6 г, табл. 2), що є непрямым свідченням ліквідаційної

неоднорідності сталі за вмістом ферито- і аустенітотвірних елементів. Деякі нормативні документи обмежують уміст δ -фериту в поковках із високолегованих аустенітних сталей балом 1, щоб уникнути зниження технологічної пластичності, зокрема, при гарячій деформації суцільних трубних заготовок методом прошивання [8; 12], а також для запобігання перетворенню δ -фериту на шкідливу інтерметалідну σ -фазу в процесі тривалої експлуатації виробів за підвищених температур (≥ 650 °С) [15], зокрема, в енергетичній галузі.

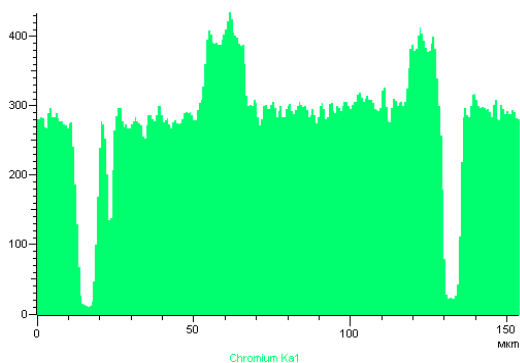
Мікрорентгеноспектральним аналізом також встановлено, що основними видами карбідів у придатних і забракованих при УЗК дослідних поковках зі сталі 08X18H10T були карбіди титану, розташовані як правило, в тілі зерна (рис. 7, табл. 3), що природно для стабілізованої титаном аустенітної сталі.



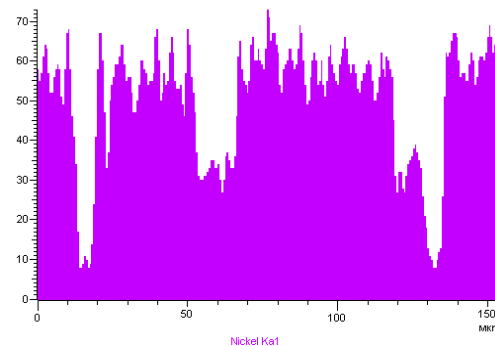
а



б



в

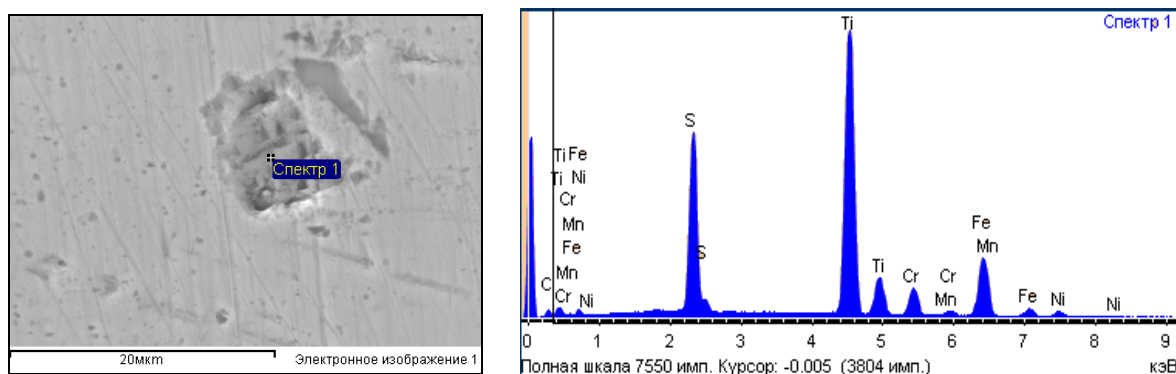


г

Рис. 6. Електронне зображення (а) і спектрограми (б–г) δ -фериту

Розшифровка спектрограми на рисунку 6

Елемент	Ваговий %	Атомний %
С К	1.89	8.06
Si K	0.20	0.37
Ti K	0.24	0.26
Cr К	27.02	26.65
Fe K	66.35	60.91
Ni К	4.29	3.75



а

б

Рис. 7. Карбід титану (а) і його спектр (б) (табл. 3)

Розшифровка спектрограми карбіду титану (рис. 7)

Елемент	Ваговий %	Атомний %
С К	7.85	25.42
Ti K	89.92	72.99
Cr K	0.80	0.60
Fe K	1.43	1.00

Знайдено також поодинокі складні карбіди титану, молібдену і вольфраму.

На рисунку 8 наведено металографічне (а) та електронне (б) зображення найбільш типової мікроструктури придатної за УЗК дослідної поковки зі сталі 08X18H10T, отриманої після електролітичного травлення металографічного шліфа протягом 1,5 хвилин у розчині 10 % щавлевої кислоти за $I_a = 1 \text{ A/cm}^2$. Видно, що структура сталі відносно дрібнозерниста і характеризується: рівновісними рекристалізованими зернами № 7–8 за ГОСТ 5639 (рис. 8 а) з підвищеним умістом у них спеціальних низькоенергетичних границь типу $\Sigma 3^n$ у теорії решіток співпадаючих вузлів (PCB), характерних для добре відпаленої

аустенітної хромонікелевої сталі [16]; відсутністю виділень карбідів хрому на границях зерен (тип структури – «ступінчаста») (рис. 8 а). Це свідчить про високу тривкість такої поковки проти міжкристалічної корозії [9–12] і підтверджує наведені раніше результати випробувань її на тривкість проти МКК методом АМУ, ГОСТ 6032.

Розшифровка спектрограм присутніх у структурі сталі надлишкових фаз (рис. 8 б) показує, що вони в основному являють собою карбіди титану (табл. 4, спектр 2) і незначну кількість δ -фериту (табл. 4, спектр 5). Спектри 4 і 6 відповідають хімічному складу аустенітної матриці.

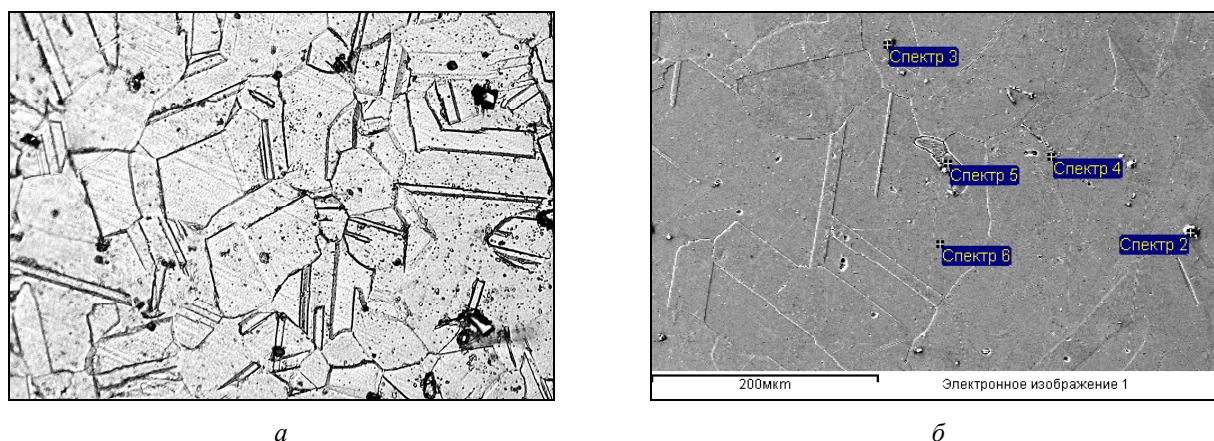


Рис. 8. Металографічне (а, $\times 400$) й електронне (б) зображення придатного за УЗК зразка поковки зі сталі 08X18H10T

Таблиця 4

Розшифровка спектрограм структури на рисунку 8

Спектр	C	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb	Mo	W	Ітог
2	15.89		77.00	0.89		2.00		1.13	0.66	2.43	100.00
3	13.31		81.91	0.94		2.06	0.40	0.34		1.05	100.00
4	1.74	0.14	0.80	18.06	1.83	67.31	9.66		0.46		100.00
5	2.04	0.18	0.22	26.08	1.33	65.53	4.61				100.00
6	1.56	0.27	0.94	18.00	2.00	67.70	9.52				100.00

Висновки. Комплексні дослідження придатних і забракованих при УЗК дослідних поковок зі сталі 08X18H10T показали таке.

1. Хімічний склад поковок відповідає вимогам нормативних документів (НД) і стандартів на зазначену сталь.

2. В аустенітній структурі сталі поковок присутня феритна δ -фаза у припустимих межах за НД, але її вміст у забракованих по УЗК поковках дещо вищий, ніж у придатних, що свідчить про більшу ліквідаційну неоднорідність сталі за вмістом ферито- й аустенітотвірних елементів.

3. Дослідні поковки містять неметалеві включення: силікати, оксиди, карбіди і нітриди титану, кількість яких не перевищує допустиму НД величину.

4. Забраковані при УЗК поковки, на відміну від придатних, характеризуються:

- аномальною різнозернистою мікроструктурою;
- наявністю карбідів хрому по границях аустенітних зерен сталі;
- схильністю до міжкристалітної корозії.

5. За сукупністю отриманих результатів можна дійти висновку, що основна причина браку за УЗК дослідних поковок зі сталі 08X18H10T полягає у нестабільності температурно-деформаційних параметрів кування зливок, зокрема, завершених деформації кування переробних (перед високотемпературним відпалом) і готових поковок за пониженої температури та критичної деформації.

6. У розробленні промислової технології виготовлення поковок з аустенітних високолегованих сталей необхідно також урахувати структурну і хімічну неоднорідність вихідних зливок, пов'язану з особливостями металургійного виробництва сталі на конкретному підприємстві.

7. Розроблено рекомендації з поліпшення структури, підвищення якісних характеристик поковок та збільшення випуску придатної продукції із високолегованих аустенітних сталей в умовах промислового виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тюрин В. А. Теория и процессыковки на прессах. Москва : Машиностроение, 1979. 240 с.
2. Антощенко Ю. М. Развитие теории процессовковки с целью создания эффективных технологий производства сплошных и полых поковок из слитков : автореф. дисс. докт. техн. наук. Москва, 2002. 34 с.
3. Яковицкая М. В. Повышение физико-механических свойств аустенитных коррозионно-стойких хромоникелевых сталей для высокотемпературных технологических систем энергетического машиностроения : автореф. дисс. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2013. 36 с.
4. Sanyo Special Steel : матер. фирмы «Саньо Спешиэл Ко. Лтд». 1982. 67 с.
5. Нержавеющие трубы для химической и нефтехимической промышленности : матер. техн. симп. по бесшовным трубам из нержавеющей стали. «Кобэ Стіл ЛТД», Япония, 1985. С. 19–28.
6. Борисенко А. Ю., Левченко Г. В., Ткач В. М., Зайцева Т. О. Кристаллогеометричні особливості будови литої та нормалізованої сталі з ферито-перлітною структурою. *Металознавство та обробка металів*. 2019. № 2. С. 3–11.
7. Борисенко А. Ю. Формирование структурных зон в стальных отливках. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2014. № 2. С. 39–50.
8. Дергач Т. О. Вплив термічної обробки на структуру і стійкість проти міжкристалітної корозії труб з особливо низьковуглецевих аустенітних сталей : автореф. дис. канд. техн. наук. Дніпропетровськ, 2004. 19 с.
9. Дергач Т. А. Применение ускоренного метода испытаний на стойкость против МКК низко-углеродистых коррозионностойких сталей. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2003. № 1. С. 50–61.
10. Дергач Т. О., Сухомлин Г. Д., Балев А. Є., Сухомлин Д. А. Прискорені електрохімічні методи випробування аустенітних корозійнотривких сталей на тривкість проти міжкристалітної корозії. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 3. С. 46–56.
11. Дергач Т. А., Сухомлин Г. Д., Дейнеко Л. Н. Исследование процессов структурообразования при термической обработке труб из аустенитных коррозионностойких сталей с целью повышения стойкости против межкристаллитной коррозии. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2003. № 2. С. 18–26.
12. Дергач Т. А., Дейнеко Л. Н. Структура и стойкость против межкристаллитной коррозии труб из низкоуглеродистой аустенитной стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2003. № 6. С. 76–83.
13. Дергач Т. О. Теоретичні та технологічні основи підвищення корозійної стійкості труб з низьколегованих і високолегованих сталей : автореф. дис. докт. техн. наук. Дніпро, 2018. 36 с.
14. Shimada M., Kokawa H., Wang Z. J., Sato Y. S., Karibe I. Optimization of grain boundary character distribution for intergranular corrosion resistant 304 stainless steel by twininduced grain boundary engineering. *Acta Materialia*. 2002. № 50. Pp. 2331–2341.
15. Панченко С. А., Балев А. Е., Большаков В. И., Дергач Т. А. Исследование образования интерметаллидных фаз в структуре труб из хромоникельмолибденовой ферритно-аустенитной стали. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2013. № 4 (63). С. 43–47.
16. Сухомлин Г. Д. Будова й властивості великокутових спеціальних внутріфазних і міжфазних границь у металах і сплавах промислового виробництва: автореф. дис. докт. техн. наук. Дніпропетровськ, 2007. 36 с.

REFERENCES

1. Tyurin V.A. *Teoriya i protsessy` kovki na pressakh* [Theory and processes of press forging]. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1979, 240 p. (in Russian).
2. Antoshhenkov Yu.M. *Razvitie teorii protsessov kovki s czel`yu sozdaniya e`ffektivny`kh tekhnologij proizvodstva sploshny`kh i poly`kh pokovok iz slitkov : avtoreferat diss. dokt. tehn. nfuk* [Development of the theory of forging processes in order to create effective technologies for the production of solid and hollow forgings from ingots : Abstract Diss. Doctor of Tech. Sc.]. Moscow, 2002, 34 p. (in Russian).
3. Yakoviczkaya M.V. *Povyshenie fiziko-mekhanicheskikh svojstv austenitny`kh korroziionno-stojkikh khromonikelevy`kh stalej dlya vysokotemperaturny`kh tekhnologicheskikh sistem e`nergeticheskogo mashinostroeniya. avtoreferat dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the physical and mechanical properties of austenitic corrosion-resistant chromium-nickel steels for high-temperature technological systems of power engineering : Abstract of the Diss. of Cand. Tech. Sc.]. Saint-Petersburg, 2013, 36 p. (in Russian).
4. Sanyo Special Steel. *Materialy` firmy` "Sanio Speshiel Ko. Ltd* [Sanyo Special Steel. Materials of the company "Sanio Special Co. Ltd"]. 1982, 67 p. (in Russian).
5. *Nerzhaveyushhie truby dlya khimicheskoy i neftekhimicheskoy promyshlennosti : materialy tekhnicheskogo simpoziuma po besshovnym trubam iz nerzhaveyushhej stali* [Corrosion-proof pipes for the chemical and petrochemical industry : Proceedings of the Technical Symposium on Seamless Stainless Steel Pipes]. "Kobe` Stil LTD", Japan, 1985, pp. 19–28. (in Russian).

6. Borisenko A.Yu., Levchenko G.V., Tkach V.M. and Zajczeva T.O. *Kristalogeometrični` osoblivosti` budovi litoyi ta normali` zovanoyi stali z ferito-perli`tnoyu strukturoyu* [Crystal geometric features of cast and normalized steel structure with ferritic-pearlitic structure]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv* [Metallurgy and Metal Processing]. 2019, no. 2, pp. 3–11. (in Ukrainian).

7. Borisenko A.Yu. *Formirovanie strukturnykh zon v stalnykh otlivkakh* [Formation of structural zones in steel castings]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metal]. 2014, no. 2, pp. 39–50. (in Russian).

8. Dergach T.O. *Vpliv termi`chnoyi obrobki na strukturu i` sti`jki`st` proti mi`zhkristali`tnoyi korozi`yi trub z osoblivo niz`kovugleczevikh austeni`tnikh stalej : avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Influence of heat treatment on the structure and resistance against intergranular corrosion of pipes made of especially low-carbon austenitic steels : Abstract Dis. Cand. Tech. Sc.]. Dnipropetrovsk, 2004, 19 p. (in Ukrainian).

9. Dergach T.A. *Primenenie uskorenogo metoda ispy`tanij na stojkost` protiv MKK nizkouglerodisty`kh korroziionnostojkikh stalej* [Application of the Accelerated Test Method for Resistance to MCC of Low-Carbon Corrosion-Resistant Steels]. *Metaloznavstvo ta termi`chna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metal]. 2003, no. 1, pp. 50–61. (in Russian).

10. Dergach T.O., Sukhomlin G.D., Balyev A.Ye. and Sukhomlin D.A. *Priskoreni` elektrokhi`mi`chni` metodi viprobuvannya austeni`tnikh korozi`jnotrivkikh stalej na trivki`st` proti mi`zhkristvli`tnoyi korozi`yi* [Accelerated electrochemical methods for testing austenitic corrosion-resistant steels for strength against intergranular corrosion]. *Vi`snik Pridni`provs`koyi derzhavnoyi akademi`yi budi`vnicztva ta arkhitekturi* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, no. 3, pp. 46–56. (in Ukrainian).

11. Dergach T.A., Sukhomlin G.D. and Dejnego L.N. *Issledovanie prozessov strukturoobrazovaniya pri termicheskoy obrabotke trub iz austenitny`kh korroziionnostojkikh stalej s chel`yu povy`sheniya stojkosti protiv mezhkristallitnoj korrozii* [Investigation of the processes of structure formation during heat treatment of pipes made of austenitic corrosion-resistant steels in order to increase the resistance against intergranular corrosion]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metal]. 2003, no. 2, pp. 18–26. (in Russian).

12. Dergach T.A. and Dejnego L.N. *Struktura i stojkost` protiv mezhkristallitnoj korrozii trub iz nizkouglerodistoy austenitnoj stali* [Structure and resistance to intergranular corrosion of low carbon austenitic steel pipes.]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promy`shlennost`* [Metallurgical and Mining Industry]. 2003, no. 6, pp.76–83. (in Russian).

13. Dergach T.O. *Teoretichni` ta tekhnologi`chni` osnovi pi`dvishhennya korozi`jnoyi sti`jkosti` trub z niz`kolegovanikh i` visokolegovanikh stalej : avtoreferat dis. dokt. tekhn. nauk* [Theoretical and technological bases of increase of corrosion resistance of pipes from low-alloy and high-alloy steels : Abstract Dis. Dr. Tech. Sc.]. Dnipro, 2018, 36 p. (in Ukrainian).

14. Shimada M., Kokawa H., Wang Z.J., Sato Y.S. and Karibe I. Optimization of grain boundary character distribution for intergranular corrosion resistant 304 stainless steel by twininduced grain boundary engineering. *Acta Materialia*. 2002, no. 50, pp. 2331–2341.

15. Panchenko S.A., Balev A.Ye., Bolshakov V.I. and Dergach T.A. *Issledovanie obrazovaniya intermetallidnyh faz v strukture trub iz hromonikel`molibdenovoj ferritno-austenitnoj stali* [Study of the formation of intermetallic phases in the structure of pipes made of chromium-nickel-molybdenum ferritic-austenitic steel]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metal]. 2013, no. 4 (63), pp. 43–47. (in Russian).

16. Sukhomlin G.D. *Budova j vlastivosti` velikokutovikh speczi`al`nikh vnutri`faznikh i` mi`zhfaznikh granicz` u metalakh i` splavakh promislovogo virobnicztva : avtoref. dis. dokt. tekhn. nauk* [Structure and properties of large-angle special intraphase and interphase boundaries in metals and alloys of industrial production : abstract dis. Dr. Tech. Sc.]. Dnipropetrovsk, 2007, 36 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції : 28.05.2021.