

## *Структурні зміни в аустенітній сталі під час тривалої експлуатації за підвищених температур*

О. Д. Сміян, доктор технічних наук

Г. Н. Гордань, кандидат технічних наук

Т. Г. Соломійчук

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

*Встановлено існування і дається опис процесу руйнування, який діє за умов тривалої експлуатації. Процес вивчався на аустенітних сталях типу 12Х18Н12Т труб пароводяного тракту котлів теплових електростанцій.\**

Для виготовлення деяких елементів пароводяного тракту труб теплових електростанцій, наприклад, пароперегрівачів (ПП), в котлах високого (ВТ) та надкритичного (НКТ) тиску, використовують аустенітні сталі типу 12Х18Н12Т. Структура цих сталей у вихідному стані після відповідної термічної обробки є стабільною, дрібнозернистою (бал 14), частково зберігаються сліди прокату. По всьому полю зразка рівномірно розподілено неметалеві включення (оксиди, силіциди та карбіди) діаметром (0,5 – 1,0) мкм. Вже після 55 тис. годин експлуатації за температур 810 – 830 К в зразку зерна стають більшими (середній бал 3 – 4), проте ознак перегріву металу немає. Спостерігаються полігонізаційні межі, відносно великі неметалеві включення (НВ) (10 – 15 мкм), які розташовані переважно на межах зерен та в зонах їх стику. Залишається й певна кількість первісних дрібних включень, яка тяжіє до цих меж. Центральна частина тіла зерен або зовсім не має неметалевих включень, або має значно меншу їх кількість. Після тривалої експлуатації в металі труб в деяких місцях на межах зерен виявлено оксидні прошарки – міжзеренне (внутрішнє) окислення, сліди міжкристалітної корозії (МКК) та втомного руйнування. Спостерігалось також активне насичення металу воднем у кількостях, які на порядок-два перевищують його вміст у вихідному металі [1], що свідчить про можливість водневого окрихчення металу [2, 3]. Отже, руйнування аустенітної сталі в результаті експлуатації може бути зумовлено одночасною дією термічної втоми, повзучості, міжкристалітної корозії, водневого окрихчення. Це співпадає з існуючими уявленнями про руйнування металу ПП в котлах ВТ та НКТ [3 – 6], але не дає відповіді про зв'язок згаданих процесів з тривалістю експлуатації металу. Тому не можна виключати й можливість існування інших процесів, наприклад, пов'язаних з локальною зміною хімічного складу металу під час експлуатації, розвиток яких теж може привести до руйнування металу.

Мета роботи – дослідження змін у локальному розподілі хімічних елементів між окремими структурними складовими в результаті тривалої експлуатації та в структурі металу, які можуть привести до його руйнування.

\*Робота виконувалась за ДЦП “Ресурс” у 2006 – 2009 рр.

## Структура, зношування, руйнування

Для досліджень було взято зразки металу з місць пошкоджених ділянок труб ПП блочних котлів НКТ. Використовували світлову (мікроскоп Neophot-32) та електронну (SEM-515, JEOL-840) мікроскопію, локальний маспектральний аналіз з лазерним мікрозондом-екстрактором (установка „ЭХО-4М”), вимірювання мікротвердості, мікрорентгеноспектральний аналіз (Comebax-50).

Вивчення зразків металу, взятих із зон руйнування труб ПП на різних електростанціях України показало, що іноді спостерігається руйнування металу цих труб і без ознак перебігу перелічених вище відомих механізмів [5, 6]. Зокрема, під час виконання комплексних досліджень за програмою „Ресурс” встановлено [7], що на деяких ділянках металу труб з аустенітних сталей, на певній відстані від внутрішньої поверхні спостерігається формування ланцюжків з неметалевих включень, які утворюють контури нових зерен (рис. 1 а – г). Зафіксовано випадки викришування окремих зерен металу та їх блоків (рис. 1 к), хоча ознак МКК та прошарку оксидів

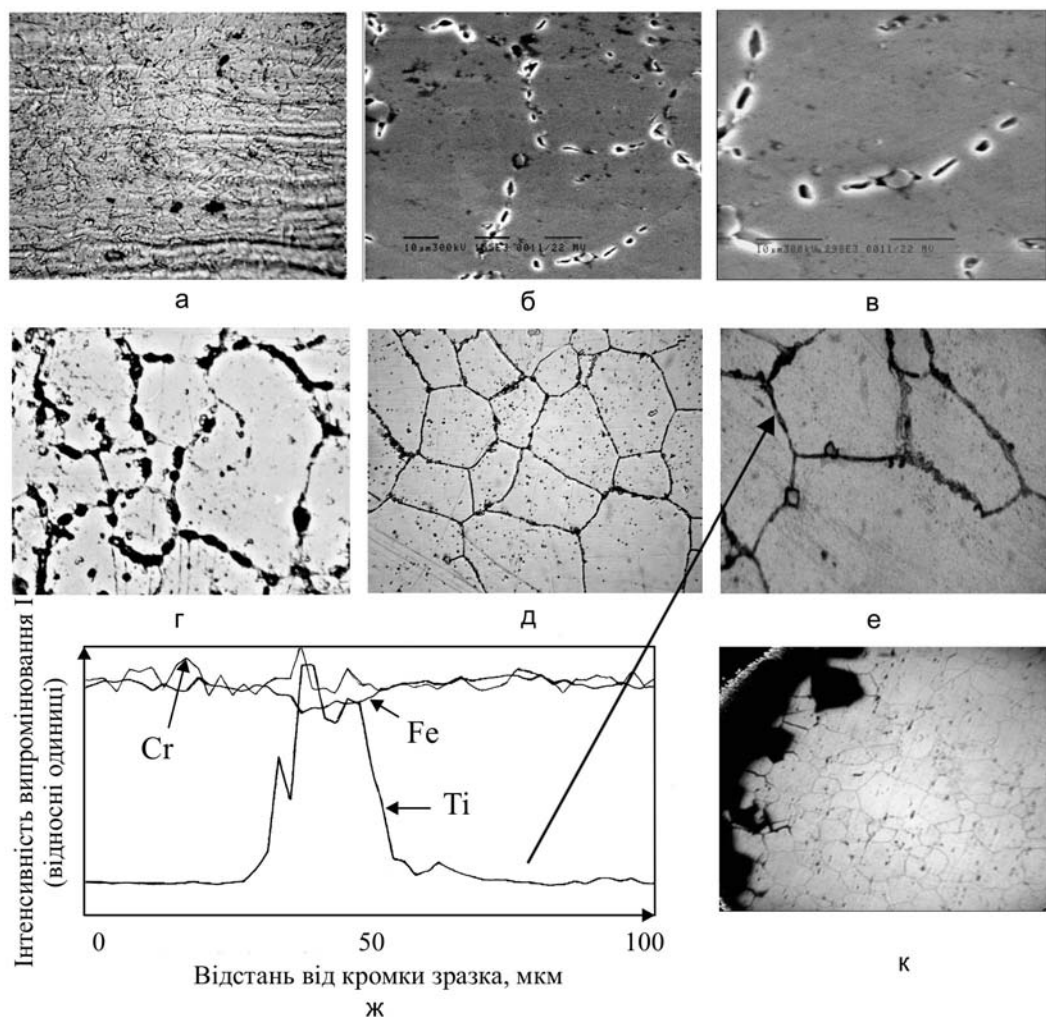


Рис. 1. Зміни в мікроструктурі сталі 12X18H12Т, що провокують специфічне руйнування. а – сталь 12X18H12Т у вихідному стані до експлуатації, б, в – формування ланцюжків неметалевих включень на межах ще не сформованих рівноважних зерен, г – формування меж зерен, д, е – полігонізаційні межі рівноважних зерен, ж – розподіл титану, хрому та заліза на межі зерна, яка вказана стрілкою, к – викришування блоків зерен. а, г, д – х 1000, б – х 1550, в – х 3100, е – х 1500, к – х 100.

вдвож поверхні руйнування не спостерігалось. Пояснити це з точки зору існуючих уявлень не вдається. Перелічені структурні утворення спостерігалися в сталях аустенітного класу лише після їх тривалої експлуатації.

Дослідження на електронному мікроскопі з використанням пристрою для мікрорентгеноспектрального аналізу вмісту домішкових та легуючих елементів показало, що склад неметалевих включень, розташованих ланцюжками, в переважній більшості не співпадає зі складом первинних включень (табл. 1). Неметалеві включення в ланцюжках (рис. 1 б, в) розташовані на практично однакових відстанях одне від одного – 12 – 15 мкм. З утворенням зерен з полігонізаційними межами на них спостерігаються такі саме включення, але відстань між ними не така регулярна (рис. 1 г). Деякі з них розташовані безпосередньо на межах зерен (МЗ), інші – на потрійних стиках меж зерен (рис. 1 е). На полігонізаційних межах з підвищеною товщиною спостерігаються волосоподібні тріщини. Саме такі межі в подальшому й стають стартовими для розвитку як внутрішнього окислення і міжкристалітної корозії, так і водневого окрихчення. З іншого боку така межа зерна з волосоподібною тріщиною може дати старт і для розвитку магістральної тріщини й викришування зерна або групи зерен (рис. 1 к).

Дослідження хімічного складу таких зерен показало, що на "тонких" полігонізаційних межах знаходиться переважно титан (рис. 1 ж) у досить великих кількостях (табл. 2), а на більш "товстих" межах вже є істотна кількість й інших легуючих елементів (рис. 2). З часом хімічний склад полігонізаційних меж в умовах експлуатації може змінюватись. За певних умов вони можуть збагачуватись воднем, киснем або іншими хімічними елементами. Згодом за наявності контакту з реакційною поверхнею це веде до розвитку МКК. Температурні та механічні коливання під час експлуатації поступово формують тріщини втоми або пори повзучості. Отже, в результаті тривалої експлуатації аустенітної сталі в енергетичному теплоагрегаті в ній поступово змінюються локальний склад й розподіл хімічних елементів та структура, які ведуть до формування замкнутих ланцюжків з вторинних неметалевих включень, на базі яких утворюються полігонізаційні зерна, межі яких збагачено титаном та збіднено хромом, що не сприяє розвитку МКК [8]. Під час подальшої експлуатації вони збагачуються іншими легуючими та домішковими елементами, в результаті межі зерен потовщуються. Це веде до появи дії ефекту клина і на цій ділянці виникають напруження. В разі збігу результуючого їх вектора з напрямком меж зерен утворюються волосоподібні тріщини. При їх неспівпадінні залежно від кута цього неспівпадіння в зерні формуються або подвійні межі, або смуги ковзання (рис. 3 а).

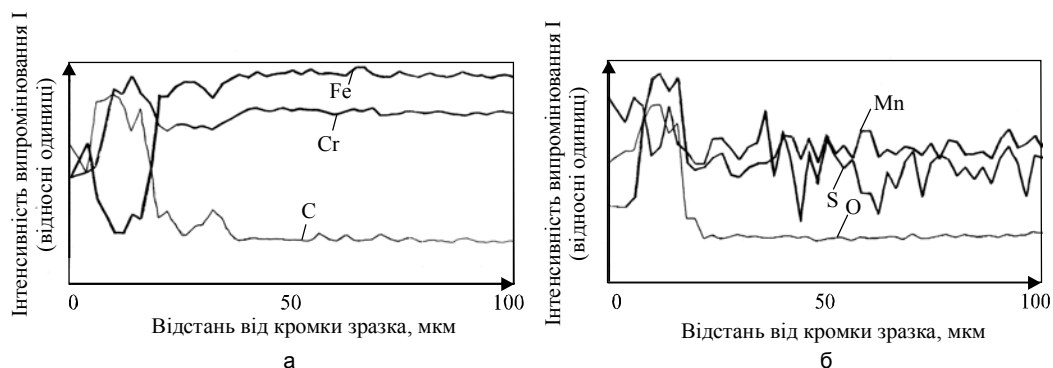


Рис. 2. Розподіл хімічних елементів на потовщеній межі зерна після тривалої експлуатації труби ПП.  
а – залізо, хром, вуглець, б – марганець, сірка, кисень.

Таблиця 1

Хімічний склад неметалевих включень в сталі 12Х18Н12Т

Номер зразка	Розмір неметалевих включень, мкм	Вміст хімічних елементів, % (мас. частка)												
		Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Ti	Al	Ca	K	S	Cu	Cl	C
1	0,15	4,93	0,85	0,32	*	54,19	0,6	30,16	6,08	0,79	2,04	-	0,07	н/в
	0,23	56,53	1,70	6,50	*	7,58	0,17	18,33	0,56	1,00	3,88	-	3,17	н/в
	0,29	1,93	0,33	0,08	*	1,98	0,03	95,49	0,03	0,03	0,19	-	0,02	н/в
	0,28	94,34	2,81	0,47	*	0,53	0,20	1,30	0,08	0,05	0,20	-	0,80	н/в
	0,34	10,05	0,60	0,04	*	38,16	3,07	44,78	2,57	0,69	-	-	-	н/в
	0,21	39,12	10,54	5,83	1,53	-	-	43,00	-	-	-	-	-	н/в
	25	9,91	3,62	1,58	0,244	0,257	66,46	-	-	-	-	-	-	17,87
2	1,0 – 1,5	16,73	6,56	1,80	0,50	0,10	74,31	0,50	-	-	-	*	-	*
	4 – 5	6,09	2,42	0,99	0,175	0,192	69,27	-	-	-	-	0,021	-	20,85
	5 – 6	16,73	5,23	2,39	0,512	0,274	60,27	-	-	-	-	0,118	-	13,87
	4 – 5	9,91	3,62	1,54	0,244	0,225	66,46	-	-	-	-	0,072	-	17,87
	12 – 15	1,18	0,82	0,27	0,25	0,06	97,44	0,15	-	-	-	*	-	-
	12 – 14	10,40	3,67	0,97	*	0,16	84,2	0,60	-	-	-	*	-	-
	дек.15	14,88	18,12	1,27	0,57	0,26	64,9	-	-	-	-	*	-	-

Примітка : \* – немає даних, н/в – не вимірювали

Таблиця 2

Хімічний склад меж зерен після експлуатації

Зразок	Місце аналізу	Вміст хімічних елементів, % (мас. частка)									
		Fe	Cr	Ni	Mn	Si	Ti	Cu	C		
Вихідна сталь	Центр зерна	67,597	17,75	11,78	1,301	0,858	0,414	0,19	0,11		
29	Тонка полігонізація МЗ	67,048	18,53	10,5	1,419	0,746	1,749	-	18,16		
30	Карбід на потрійній МЗ	7,622	0,401	0,141	0,01	0,145	70,521				
30	Потрійна МЗ	63,81	15,548	14,706	1,273	2,31	2,443				
30	Тонка межа зерна	63,324	16,355	14,195	1,786	0,762	1,701	0,779	1,098		
31	Центр зерна	66,878	18,626	11,717	1,81	0,707	0,544	0,158	0,061		
31	МЗ вздовж тріщини	24,03	7,052	4,437	0,629	0,251	46,595	0,043	16,943		
31	Карбід на потрійній МЗ	2,718	1,39	0,61	1,22	0,142	74,16	0	19,76		
31	Тонка межа зерна	53,11	14,53	21,789	14,52	2,264	4,97	0,179	1,703		
33	Межа зерна	53,652	13,528	22,138	1,374	3,383	5,416				
33	Межа зерна	64,42	16,221	9,715	1,464	0,534	7,655				
33	Межа зерна	59,953	16,229	9,346	1,473	0,511	12,481				
34	Межа зерна	61,705	12,896	7,407	1,365	0,627	15,501				
34	Центр зерна	66,834	19,022	11,082	1,915	0,72	0,426				
20	МЗ вздовж тріщини	58,944	9,304	6,83	0,554	0,856	0,548	0,254 Al, 0,519 S, 22,189 O			
27	Внутрішнє окислення на МЗ	37,475	25,178	7,113	2,692	0,845	2,607	0,197 Al, 0,036 S, 23,856 O			

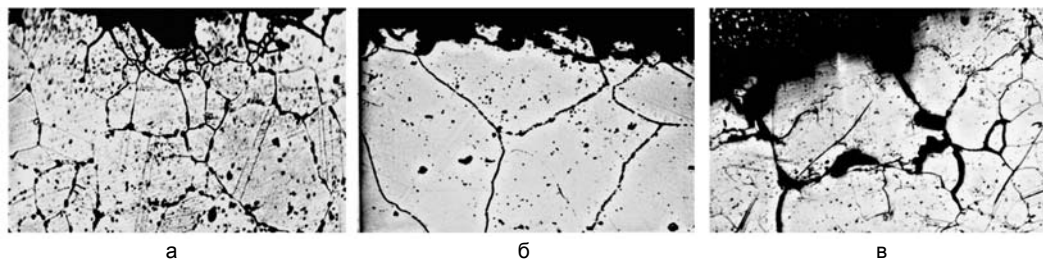


Рис. 3. Мікроструктура сталі 12Х18Н12Т в зоні пошкодження труб конвективного ПП високого (а, б) та надкритичного (в) тиску. Напрацювання: а – 95, б – 106, в – 123 тис. годин. а – зони локального зсуву в зернах металу на відстані 2 мм від зовнішньої поверхні труби; б, в – незавершені полігонізаційні межі та ділянки викришення блоків зерен. х 500.

Виявлені та описані специфічні структурні зміни в аустенітній сталі ведуть до руйнування металу. Їх поява та розвиток можуть не тільки передувати втомі, водневому окрихченню, МКК тощо, але й слугувати безпосередньо причиною викришування зерен без ознак МКК та внутрішнього окислення (рис. 1 к, 3 б, в)

Зовні схожу (за металографією) картину спостерігали в роботі [9] під час вивчення повзучості хрому на сталі 12Х18Н10Т чи нікелі після механо-хімікотермічної обробки [10]. В цих металах за умов одночасної дії деформаційного навантаження та температури на вже існуючих полігонізаційних межах зерен виникають ланцюжки пор, які після злиття утворюють тріщину, що характерно для процесу повзучості. В нашому випадку маємо кілька відмінностей від згаданого процесу: 1 – під час експлуатації в металі утворюються ланцюжки не пор, а вторинних неметалевих включень; 2 – полігонізаційні межі формуються по ланцюжкам НВ, тобто формуванню меж передують утворення ланцюжків з НВ, а не навпаки; 3 – НВ, які формують ланцюжки, є вторинними і за складом, розмірами та місцем розташування в металі відрізняються від первинних НВ; 4 – зерна, які формуються на базі ланцюжків з вторинних НВ, є рівноважними і більші за розмірами (бал 4 – 5) за первинні зерна (бал 14).

Отже, ми маємо справу зі структурними змінами аустенітної сталі, які раніше в літературі не описані. Вони досліджувались на зразках сталі 12Х18Н12Т, яка працює в теплоенергетичному агрегаті, проте на нашу думку тотожні процеси можливі і в інших конструкціях та механізмах, які виконані не тільки з аустенітної, а взагалі з легованої сталі, експлуатація яких супроводжується дією змінних температур (в т. ч. кліматичних), або напружень (в т. ч. механічних), наприклад, в металі веж, мостів, тощо. Ступінь розвитку виявлених особливостей структурних змін може визначати тривалість збереження металом його службових характеристик в умовах експлуатації та термін безаварійної служби виконаних з нього виробів та конструкцій.

**Висновки** Встановлено, що в результаті тривалої експлуатації труб пароперегрівачів з аустенітної сталі 12Х18Н12Т в котлах надкритичного тиску теплових електростанцій за  $T = 810 - 830$  К відбуваються зміни у структурі металу, форми, кількості та місці розташування первинних та утворення вторинних неметалевих включень, зміни хімічної неоднорідності металу та хімічного складу й товщини меж зерен, що впливає на службові характеристики металу та термін його служби.

Встановлено існування специфічних особливостей структурних змін в аустенітній сталі типу 12Х18Н12Т, які формуються та розвиваються в ній лише в результаті тривалої експлуатації і можуть передувати появі та дії міжкристалітної корозії, внутрішнього окислення, водневого окрихчення, втомлюваності, повзучості.

### Література

1. Вайнман А. Б., Смиян О. Д., Гирный С.И. Особенности хрупких повреждений и наводороживания металла труб котлов высокого давления. // ФХММ. – 1987. – № 4. – С. 83 – 86.
2. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 216 с.
3. Вайнман А. Б., Мелехов Р. К., Смиян О. Д. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. – Киев: Наук. думка, 1990. – 272 с.
4. Мелехов Р. К., Смиян О. Д., Василик И. И. Особенности межкристаллического разрушения труб парогенераторов из стали 12X18H12T котлов высокого давления. // Повышение надежности поверхностей нагрева котлов и других элементов пароводяного тракта блочных электростанций. Матер. научно-технич. конф. Трипольская ГРЭС. – Киев: Информэнерго, 1993. – С. 50 – 53.
5. Вайнман А. Б., Смиян О. Д., Школьникова Б. Э. Механизм и причины повреждения аустенитных труб пароперегревателей котлов блоков СКД. // Энергетика и электрофикация. – 1993. – № 4. – С. 1 – 6.
6. Вайнман А. Б., Смиян О. Д., Яцкевич С. В. О проблеме коррозионных и коррозионно-механических повреждений металла пароводяного тракта блоков СКД. // Энергетика и электрофикация. – 1995. – № 4. – С. 1 – 10.
7. Григоренко Г. М., Смиян О. Д., Буткова О. І. Механізм утворення бездеформаційних пошкоджень металу труб пароперегрівачів блочних котлів ТЕС високого та надкритичного тиску. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації споруд, конструкцій та механізмів. – Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, 2009. – С. 436 – 442.
8. Гуляев А. П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1977. – 647 с.
9. Прокошкин Д. А., Матвеева М. П., Морозов В. А. Исследование процесса пластической деформации хрома при высоких температурах. // Исследования по жаропрочным сплавам. Том X. – М.: АН СССР, 1963. – С. 22 – 27.
10. Козырский Г. Я. О высокотемпературной области положительного влияния полигонизированной структуры на ползучесть. // Там же. – С. 8 – 15.

Одержано 31.01.11

О. Д. Смиян, Г. Н. Гордань, Т. Г. Соломийчук

### Структурные изменения в аустенитной стали в процессе длительной эксплуатации при повышенных температурах

#### Резюме

Установлено существование и дается описание процесса разрушения, который имеет место в условиях длительной эксплуатации. Процесс изучался на аустенитных сталях типа 12X18H12T труб пароводяного тракта котлов тепловых электростанций.

O. D. Smiyan, G. M. Gordan, T. G. Solomijchuk

### Structural changes of austenitic steel during long term high-temperature operation

#### Summary

The process of fracture under long term operation is found and described. The process was studied for austenitic steels 12X18H12T of tubes for water-steam circuit of thermal power station boilers.