

УДК 621.791

НЕМЕТАЛЕВІ ВКЛЮЧЕННЯ В СТАЛІ 08X18H10T ЯК ПРИЧИНА ВИНИКНЕННЯ ДЕФЕКТІВ У ТЕПЛООБМІННИХ ТРУБАХ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ АЕС

*В. М. ВОЄВОДИН¹, А. С. МИТРОФАНОВ¹, С. В. ГОЖЕНКО¹,
Р. Л. ВАСИЛЕНКО¹, Є. О. КРАЙНЮК¹, А. В. БАЖУКОВ²,
А. М. ПАЛІЙ², П. Є. МЕЛЬНИК²*

¹ Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій
Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут";

² ВП "Южно-Українська АЕС", Южноукраїнськ

Подано результати з вивчення мікроструктури сталі 08X18H10T у теплообмінних трубах після їх тривалої експлуатації в парогенераторах енергоблока ВВЕР-1000. Розглянуто вплив неметалевих включень на деградацію металу теплообмінних труб АЕС. Показано, що ймовірною причиною порушення пасивації металу і виникнення корозійних дефектів є неметалеві включення, які розташовані на його поверхні. Під впливом робочих чинників у металі виникають знакозмінні напруження, що призводить до мікроруїнування на межі включення–метал і розвитку корозійної втоми.

Ключові слова: *неметалеві включення, корозія, теплообмінні труби, парогенератори АЕС.*

Вступ. Парогенератори АЕС з реакторами ВВЕР за тривалої експлуатації показали високу надійність і економічність. Однак неодноразово виникали інциденти з протіканням теплоносія через дефекти в металі теплообмінних труб (ТОТ). У зв'язку з продовженням експлуатації за призначений проектом період, а також з розробленням проектів перспективних реакторів на базі ВВЕР-1000 дедалі актуальнішими є питання надійності ТОТ. Нижче розглянуто результати досліджень експлуатаційних дефектів у металі ТОТ парогенератора ПГВ-1000 після тривалої експлуатації в складі енергоблока № 1 Південноукраїнської АЕС (ПУ АЕС) та підходи до критеріїв превентивного глушіння труб за виявлення в них дефектів.

Експлуатаційні пошкодження в металі ТОТ дослідили у низці праць, де встановлено типи дефектів і механізм їх утворення – корозійне розтріскування під напруженням. Основною причиною зародження дефектів вважають присутність у живильній воді парогенератора міді у вигляді іонів або мікрочастинок як продуктів корозійно-ерозійного зносу обладнання другого контуру [1]. Мідь ініціює електрокорозію і локальні пошкодження металу труб. З цієї причини на низці АЕС мідні сплави замінили на нержавку сталь. Вивчаючи [2] локальні пошкодження трубопроводів з феритно-перлітних сталей, відзначили, що зародками локальної корозії є неметалеві включення у них. Нижче подані результати металографічних досліджень металу і дефектів у ньому, а також проаналізовано їх небезпеку для подальшої експлуатації ТОТ.

Методи досліджень. Досліджували фрагменти ТОТ, вирізані з парогенератора ПГВ-1000М після зняття його з експлуатації в 2004 р. на першому енергоблоці ПУ АЕС через завищену кількість заглушених ТОТ. Метал труб – корозій-

Контактна особа: Є. О. КРАЙНЮК, e-mail: krainyuk@kipt.kharkov.ua

нотривка сталь 08X18H10T. Вивчали металографічні шліфи в поперечному і поздовжньому перетинах ТОТ на оптичному мікроскопі ММО-1600, а також на растровому сканівному електронному мікроскопі JEOL JSM-7001F.

Результати досліджень. Мікроструктура металу (рис. 1) однорідна дрібнозерниста зі зернами 8...10 μm (10 балів за шкалою 1) [3]. Аустенітні зерна мають чіткі межі, без випадання карбідів, що свідчить про відсутність ознак старіння сталі. На поздовжньому шліфі (рис. 1*b*) у деяких місцях спостерігаємо окремі неметалеві включення прямокутної форми (TiN), а також рядки з фрагментів включень довжиною до 50 μm (рис. 1*c*).

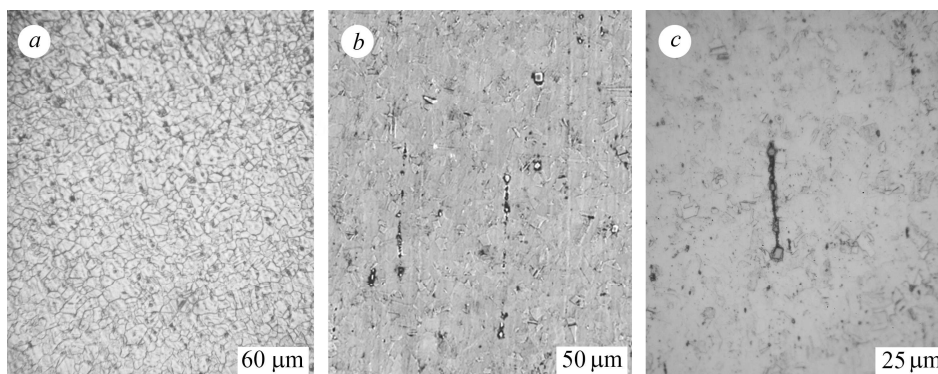


Рис. 1. Структура сталі 08X18H10T: *a* – аустенітна мікроструктура (поперечний шліф); *b* – рядки неметалевих включень (поздовжній шліф); *c* – структура окремого рядка включень.

Fig. 1. Structure of 08X18H10T steel: *a* – austenitic microstructure (cross section); *b* – rows of nonmetallic inclusions (longitudinal section); *c* – structure of a separate row of inclusions.

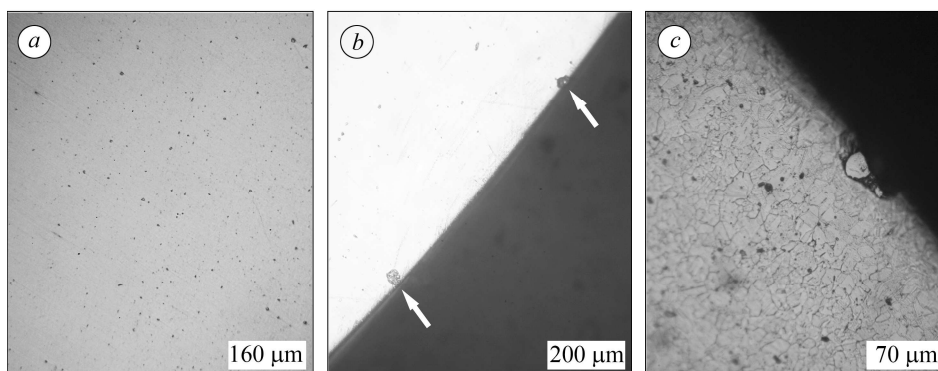


Рис. 2. Включення в сталі 08X18H10T: *a* – скупчення включень; *b* – включення (показано стрілками) біля зовнішньої поверхні ТОТ; *c* – мікроструктура металу ТОТ з неметалевими включеннями.

Fig. 2. Inclusions in 08X18H10T steel: *a* – cluster of nonmetallic inclusions; *b* – inclusions (indicated by arrows) at the external surface of the metal of heat-exchange tubes (HET); *c* – the metal microstructure of HET with nonmetal inclusions.

На рис. 2*a* показана область з найбільшим скупченням включень (1–2 бали за шкалою 5) [4], що не перевищує вимог нормативної документації для труб зі сталі 08X18H10T. Присутність неметалічних включень неминуча в металі технічної чистоти. Рядкове їх розташування властиве структурі труб, виготовлених холодно-деформованим способом. Пластичні включення під час вальцювання

деформуються і витягуються в тонкі рядки, які усуваються під час аустенізуючого відпалу. Тверді включення карбонітридів подрібнюються на фрагменти і за відпалу залишаються в матриці металу. Деякі включення можуть виходити на зовнішню і внутрішню поверхні труби (рис. 2*b, c*). Дрібні глобулярні (< 1 μm) і більші (2...5 μm) ограновані включення розташовані в металі хаотично, іноді у вигляді окремих скупчень.

Дослідження на растровому електронному мікроскопі (РЕМ) показали, що крупніші типові включення мають прямокутну огранку (рис. 3*a, b*), а навколо них помітні порожнини без металу (рис. 3*c*).

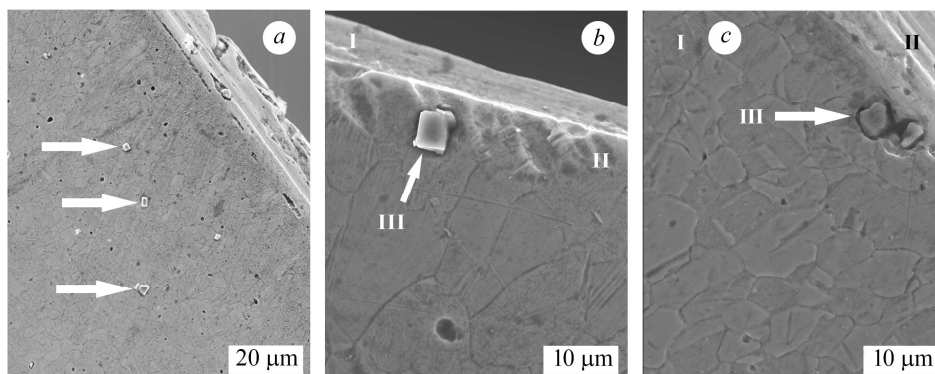


Рис. 3. Включення з кристалічним огрануванням: *a* – група включень (показано стрілками); *b* – включення відносно поверхні (I – зовнішня поверхня ТОТ, II – внутрішня поверхня ТОТ, III – включення); *c* – включення у поверхні (I – метал ТОТ, II – зовнішня поверхня ТОТ, III – порожнина навколо включень).

Fig. 3. Inclusions with a crystal form: *a* – a group of inclusions (indicated by arrows); *b* – inclusion with respect to the surface (I – external HET surface, II – internal HET surface, III – inclusion); *c* – inclusions in the surface (I – HET metal, II – external HET surface, III – inclusions which are surrounded by a cavity).

У металі труб спостерігаємо також включення витягнутої форми довжиною до 5 μm. За допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу визначили елементний склад включень і основного металу труб. Склад металу відповідає сталі марки 08X18N10T, згідно з ГОСТ 5632-72 [5]. Типовий склад прямокутних включень такий (at.%): 37,2...41,3 N; 52,5...61 Ti; 0,6...1,8 Cr; 0,12...0,4 Ni; 1...4 Fe; 0...0,12 Si. Отже, це нітрид титану з невеликими домішками елементів з основного металу. Включення витягнутої форми – це сульфіди марганцю.

Склад дрібних глобулярних і рядкових включень визначити не вдалося, оскільки діаметр вимірювального зонда перевищував їх розміри. Ймовірно це сульфіди, схильні до пластичної деформації. Нормативними документами в трубах 16×1,5 mm з корозійнотривкої сталі 08X18N10T допускається забрудненість неметалевими включеннями: оксиди – 2,5 бали; сульфіди – 1 бал; нітриди і карбонітриди – 2,5 бали. Пластичні включення під час вальцювання деформуються, подрібнюються і витягуються в довгі рядки. Крихкі включення частково подрібнюються на дрібні уламки. Розмір зерна металу труб повинен бути не більше 4 балів. За вказаними параметрами метал ТОТ задовольняє нормативні вимоги [6].

Склад включень у матеріалі ТОТ аналогічний описаному в літературі. Так, методом растрової електронної мікроскопії досліджені [7] включення в литих і катаних зразках сталі 08X18N10T. Виявлено включення нітридів і оксидів титану різної дисперсності. В холоднокатаному листі неметалеві включення розташовуються рядками довжиною 100...150 μm. Вони складаються з кристалів нітриду

титану. Поверхні дефекти розташовані хаотично і орієнтовані вздовж напрямку вальцювання.

Відомо, що на поверхні ТОТ під час експлуатації розвиваються корозійні виразки, тріщини і плями корозії [8, 9]. На рис. 4а показано корозійне пошкодження металу ТОТ, яке може бути як корозійною плямою, так і корозійною виразкою на початковому етапі розвитку [10]. Пошкодження почалося від локального розриву оксидної плівки, можливо в місці виходу на поверхню одного або декількох включень (рис. 3). Як показано раніше, характерний розмір включень нітридів титану досягає 5 μm . Такий же розмір має порожнина навколо нього (рис. 3с), яка утворилася під час вальцювання. Товщина оксидної плівки на сталі може досягати лише 0,5 μm [9]. Плівка не утворюється на поверхні включення і порожнини навколо нього, тобто на поверхні сталі є ділянка без плівки діаметром $\sim 10 \mu\text{m}$, співмірна розміру зерна. Навколо включення в металі створюються умови, достатні для розвитку міжкристалічної корозії (МКК). Хоча сталь 08Х18Н10Т не схильна до МКК, включення, які розташовані на поверхні, можуть бути її зародками, подібно до пітингів. На рис. 4b, c показані численні прояви МКК, які спостерігаємо на стінках корозійної виразки. Корозія поширюється на глибину одного-двох зерен (рис. 4c) без утворення магістральних тріщин, що свідчить про відсутність напруження в місці утворення виразки. Продукти корозії і окремі зерна металу вимиваються теплоносієм.

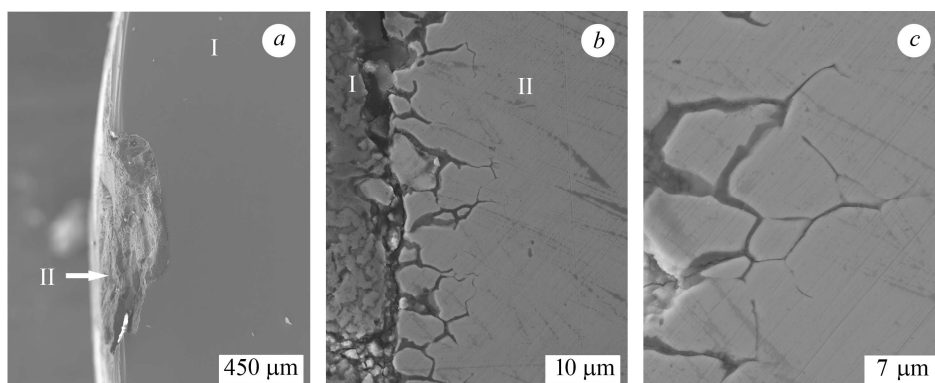


Рис. 4. Корозійне пошкодження металу ТОТ (поперечні шліфи): *a* – корозійна виразка (I – метал ТОТ, II – корозійна виразка на зовнішній поверхні ТОТ); *b* – дно виразки з МКК (I – продукти корозії, II – метал ТОТ); *c* – МКК.

Fig. 4. Corrosion damage of the HET metal (cross section): *a* – corrosion pit (I – HET metal, II – corrosion pit on the HET external surface); *b* – pit lower border with intergranular corrosion (IGC) (I – products of corrosion, II – HET metal); *c* – IGC.

Дефекти поділяють на т. зв. “підрешіткові” (рис. 5), утворені під дистанційними і протівібраційними решітками, і “міжрешіткові”, які виникають між ними. На шліфі у поздовжньому перетині труби видно корозійні канали, які, ймовірно, утворилися в місцях дотику решітки з поверхнею ТОТ. Про це свідчить характерна форма каналів (рис. 5а). Правильної форми корозійна виразка (рис. 5b) – це підрешітковий дефект на пізнішій стадії. Відсутність відкладів продуктів корозії у виразці підтверджує вібрацію ТОТ, яка сприяє їх видаленню. На дні виразки видно невелику тріщину, яка проходить через групу включень і, можливо, є наслідком напруженого стану металу навколо них.

На рис. 6 зображено тріщину, яка розповсюджується безпосередньо від поверхні труби без корозійної виразки. Вона має втомний характер і утворилася на деякій відстані від дистанційної решітки на ділянці без шламових відкладів. Русло тріщини заповнене продуктами корозії (Fe_2O_3) (рис. 6а). Оксид утворився в

тріщині за окиснення її поверхнь розлому (рис. 6b) в середовищі теплоносія. Розклинювальна дія оксидів [12], а також вібрації сприяли росту тріщини. В металі поблизу тріщини спостерігаємо включення нітриду титану (рис. 6c).

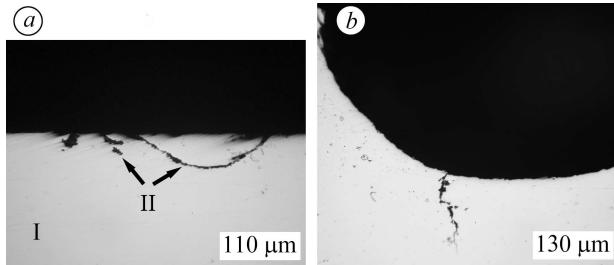


Рис. 5. Підрешіткові дефекти TOT (поздовжній шліф):
a – пошкодження (I – метал TOT, II – корозійні канали);
b – фрагмент виразки з тріщиною.

Fig. 5. Damage of the HET metal under lattice (longitudinal section):
a – damages (I – HET metal, II – corrosion channels); *b* – the pit section with a crack.

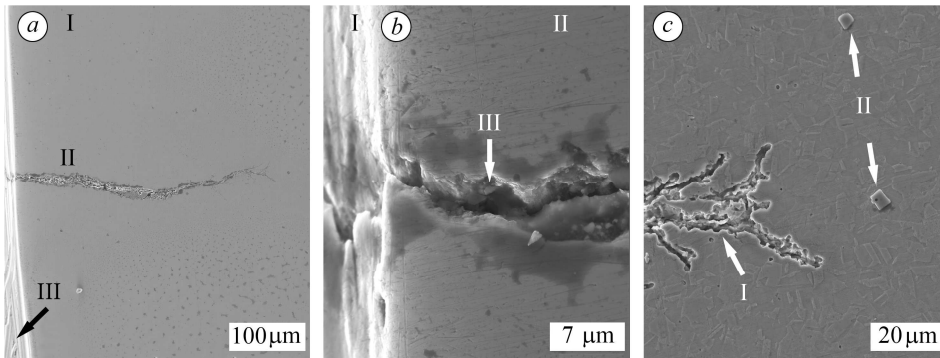


Рис. 6. Тріщина на поверхні TOT: *a* – загальний вигляд (I – метал TOT, II – тріщина, III – зовнішня поверхня TOT); *b* – русло тріщини (I – зовнішня поверхня TOT, II – поверхня шліфа, III – русло тріщини); *c* – тріщини (I) і включення нітриду титану (II).

Fig. 6. A crack on the HET surface: *a* – total view (I – HET metal, II – crack, III – external HET surface); *b* – crack (I – external HET surface, II – cross section surface, III – crack); *c* – crack (I) and TiN inclusion (II).

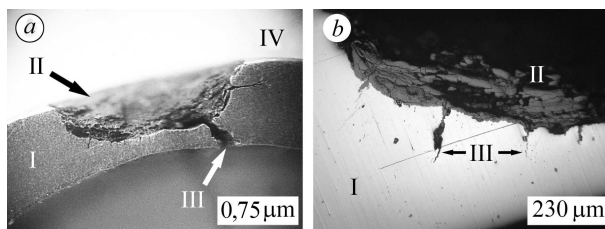


Рис. 7. Корозійна виразка (поперечний шліф TOT):
a – наскрізна корозія (I – метал TOT, II – виразка, III – наскрізна корозія, IV – зовнішня поверхня TOT);
b – розтріскування від виразки вглиб металу (I – метал TOT, II – виразка, III – розтріскування).

Fig. 7. Corrosion pit (HET cross section): *a* – through corrosion (I – HET metal, II – pit III – through corrosion, IV – external HET surface); *b* – cracking from corrosive pit into the metal (I – HET metal, II – pit, III – cracking).

Тріщина виникла, ймовірно, внаслідок точкової корозії, пов'язаної з розташуванням включень на поверхні металу. Корозійну виразку, яку часто зустрічаємо на поверхні TOT у зоні трубного пучка, заповнену відкладеннями шламу, показано на рис. 7. Наскрізна корозія виходить на внутрішню поверхню TOT і є прикладом корозійного розтріскування під напруженням. Радіальні тріщини (рис. 7b)

поширюються в металі від виразки під дією розклинювальних напружень, викликаних продуктами корозії. Поверхня металу між тріщинами у виразці покрита сіткою МКК. Це ж спостерігаємо за руслом тріщин (рис. 8). Як бачимо, включення суттєво впливають на утворення експлуатаційних пошкоджень ТОТ парогенераторів.

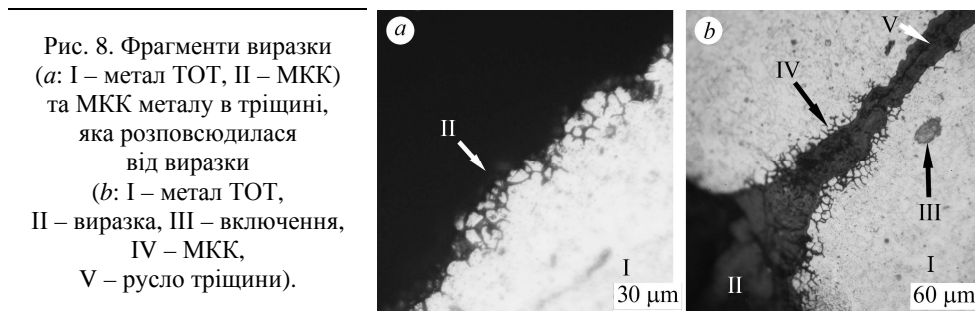


Fig. 8. Fragments of corrosive pit (*a*: I – HET metal, II – IGC) and IGC of the metal in the crack, propagating from the pit (*b*: I – HET metal, II – pit, III – inclusion, IV – IGC, V – crack).

Обговорення результатів. Відомо багато праць з вивчення впливу неметалевих включень на технологічні властивості сталі: пластичність, механічну втому, водневе окрихчення тощо. Однак до сьогодні не встановлено чіткої залежності між ступенем чистоти сталі та її властивостями. Вимоги до чистоти сталі ТОТ прийняті за відсутності даних про конкретні умови експлуатації. При цьому недооцінка ролі включень може виявитися реальною причиною експлуатаційних пошкоджень ТОТ. Відомо, що неметалеві включення в сталі помітно послаблюють її опір корозії під напруженням. Хоча вміст включень не перевищує за обсягом 0,3%, кількість їх становить $10^{12} \dots 10^{13}$ в cm^3 . Вони порушують суцільність матриці металу і є концентраторами напружень [13, 14].

Тут експериментально встановлена і наочно показана роль включень в утворенні експлуатаційних пошкоджень у ТОТ. По-перше – включення (нітриди титану), які розташовані на поверхні ТОТ, є причиною розривів у захисній оксидній плівці і можуть бути ініціаторами утворення зародків корозійних пошкод. Корозивно-активне середовище контактує з незахищеною поверхнею зерен металу і породжує міжкристалічну корозію. За відсутності напружень (або якщо вони не перевищують певний рівень) процес обмежується цією стадією (див. рис. 4). Спостерігаємо аналогію між пошкодженнями ТОТ і локальною корозією трубопроводу водопостачання на АЕС [2]. В обох випадках причиною пошкоджень є неметалеві включення, з тією різницею, що в останньому випадку вони зароджуються на внутрішній поверхні труби.

По-друге, підтверджений експериментально факт – вібрація ТОТ. Вона створює знакозмінні напруження в металі, особливо поблизу місць їх закріплення в конструкційних решітках. Хоча вібрації відбуваються в області пружних деформацій, останні здатні викликати мікроруйнування на межах розділу металу з включеннями. Тоді зароджується і розвивається корозійна втома [15]. Зародження і зростання втомої тріщини ініціюють утворення на межах з включеннями свіжих поверхонь металу і окиснення їх в агресивному середовищі. Розклинювальна дія продуктів корозії, з одного боку, сприяє росту тріщини, а з іншого, оксиди, які утворюються, призводять до заростання розриву в захисній плівці над включеннями. Результатом такої динамічної рівноваги може бути загальмовування і припинення росту тріщини. Однак можливість такого варіанта вимагає строгих розрахунків.

Таким чином, включення відіграють важливу роль у локальній корозії на поверхні ТОТ, яка у підсумку призводить до утворення дефектів типу тріщин. Внутрішні включення в металі впливають на ріст тріщин від корозійних виразок (див. рис. 6 і 7).

Враховуючи вищенаведене, можна пояснити багато експериментів, здійснених за час експлуатації енергоблоків ВВЕР-1000. Темпи глушіння дефектних ТОТ на різних енергоблоках ВВЕР-1000, незважаючи на однотипну конструкцію парогенераторів, різні. Це пояснюють різницею хімічних режимів другого контуру, відхиленнями регламентів хімічного відмивання від шламових відкладів та іншими чинниками. Встановлено, що на пошкодження ТОТ впливають чистота металу і технологічні процеси виготовлення. В результаті не можна гарантувати однаковий стан металу ТОТ навіть за дотримання всіх нормативних вимог. Саме різним складом неметалевих включень у металі можна пояснити зазначену розбіжність темпів глушіння. Пояснюються також особливості утворення тріщин. Багатьма авторами відзначено, що поздовжні тріщини на трубах утворюються на місці рядкових включень. Довжина тріщин лімітується довжиною рядків, а ріст тріщин в глибину обмежується згаданим вище механізмом гальмування. Результати вихрострумowego контролю ТОТ на різних енергоблоках, в тому числі на ПУ АЕС, підтверджують висновки металографічних досліджень. Абсолютна більшість дефектів ТОТ за результатами контролю за невисокими показниками (амплітуда сигналу) і високими (нестача металу) належить до тріщин. Інший тип дефектів – корозійні виразки (за високими показниками вихрострумowego контролю) зосереджені, в основному, в зонах, заповнених шламовими відкладами. Спостерігали, що на всіх парогенераторах тільки деякі з тріщин розвиваються до наскрізного дефекту. Цим підтверджується версія про зарощування тріщин, які зародилися від включень.

Більшість дефектів накопичуються поблизу кріплень ТОТ у конструкційних решітках. Тут тріщини зароджуються за корозійно-втомним механізмом. У парогенераторах блоків з реакторами типу ВВЕР-440, де потоки теплоносія суттєво нижчі, ніж у ВВЕР-1000, темпи пошкодження ТОТ істотно менші. Це також підтверджує визначальне значення корозійної втоми в утворенні тріщин.

Неметалеві включення в промислових плавках металу присутні завжди. Але, як показують дослідження, в розвитку локальної поверхневої корозії беруть участь тільки включення, співмірні з розміром зерна. Тут це тверді включення нітридів титану, причому ті, які виходять на зовнішню поверхню труб. Вважаємо, що усунути або істотно сповільнити утворення тріщин корозійної втоми можна, вдосконалюючи технології виготовлення.

ВИСНОВКИ

Металографічним дослідженням показано, що можливим механізмом більшості експлуатаційних пошкоджень ТОТ може бути розтріскування під дією корозійної втоми. Ініціаторами процесу є неметалеві включення (карбонітриди і нітриди), які мають вихід на зовнішню поверхню і під впливом робочих чинників порушують пасивувальний шар, що призводить до виникнення і розвитку корозії.

РЕЗЮМЕ. Представлены результаты по изучению микроструктуры стали 08X18H10T в теплообменных трубах после их длительной эксплуатации в парогенераторах энергоблока ВВЭР-1000. Рассмотрено влияние неметаллических включений на деградацию металла теплообменных труб АЭС. Показано, что вероятной причиной нарушения пассивации металла и возникновения коррозионных дефектов являются неметаллические включения, выходящие на поверхность металла. Под воздействием рабочих факторов в металле возникают знакопеременные напряжения, приводящие к микроразрушениям на границе включение–металл и развитию коррозионной усталости.

SUMMARY. The results of study of the microstructure of 08X18H10T steel in heat exchangers in steam generators of the power unit WWER-1000 after their durable operation are presented. The influence of nonmetallic inclusions on metal degradation of NPP heat exchangers is considered. It is shown that the possible cause for the passivation violation of the metal and the occurrence of corrosion defects is non-metallic inclusions that extend over the surface of the metal. Under the influence of working factors, alternating stresses arise in the metal of heat-exchange tubes, which lead to micro-fractures at the inclusion-metal interface and the development of corrosion fatigue.

1. *Исследование причин образования коррозионных дефектов в теплообменных трубах парогенераторов ПГВ-1000 / И. М. Неклюдов, Л. С. Ожигов, А. С. Митрофанов, С. В. Гоженко // Сб. науч. тр. СНИЯЭиП. – 2003. – Вып. 8. – С. 50–63.*
2. *Коррозионные повреждения трубопроводов АЭС и проблемы их контроля / Л. С. Ожигов, А. С. Митрофанов, И. Ю. Добровольская, С. В. Шрамченко, Р. Л. Василенко, Н. Д. Рыбальченко, Е. А. Крайнюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2017. – 53, № 6. – С. 30–35.*
(*Corrosion defects in pipelines of nuclear power plants and the problems of their inspection / L. S. Ozhigov, A. S. Mitrofanov, I. Yu. Dobrovol'skaya, S. V. Shramchenko, R. L. Vasilenko, N. D. Rybal'chenko, E. A. Krainyuk // Materials Science. – 2018. – 53, № 6. – P. 777–782.*)
3. *ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – М.: Изд-во стандартов. – 16 с. – Введ. 01.01.1983.*
4. *ДСТУ 3295-95. Труби сталеві. Металографічний метод визначення забрудненості металу неметалевими включеннями. – К.: Держстандарт України. – 113 с. – Чинний від 01.07.1997.*
5. *ГОСТ 5632-72. Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 64 с. – Введ. 01.01.1975.*
6. *ТУ 108-713-77. Трубы бесшовные из коррозионностойкой стали марки 08X18H10T // Изв. № 4-86 об изменениях в ТУ. – Введ. 01.07.1986.*
7. *Токовой О. К., Шабуров Д. В. Исследование неметаллической фазы в аустенитной нержавеющей стали // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 2014. – 57, № 12. – С. 20–24.*
8. *Зарицкий Н. С., Седнев В. А., Скалозубов В. И. Анализ эксплуатационных данных по дефектам теплообменных труб парогенераторов ВВЭР // Ядерная и радиационная безопасность. – 2000. – № 1. – С. 96–98.*
9. *Особенности эксплуатационных повреждений трубчатки парогенераторов ПГВ-1000 и разработка атласа дефектов / И. М. Неклюдов, Л. С. Ожигов, А. С. Митрофанов, Е. А. Крайнюк, В. М. Ажажа, А. В. Бажуков, А. Н. Палий, Г. С. Смаровоз // Сб. науч. тр. СНИЯЭиП. – 2005. – Вып. 15. – С. 160–169.*
10. *ГОСТ 5272-68. Коррозия металлов. Термины. – М.: Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР. – 12 с. – Введ. 1969-01-01.*
11. *Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Альянс, 2006. – 472 с.*
12. *Разновидности и диагностика эксплуатационных дефектов в теплообменных трубах парогенераторов АЭС / И. М. Неклюдов, А. С. Митрофанов, Л. С. Ожигов, Е. А. Крайнюк // Физика и химия обработки материалов. – 2008. – № 1. – С. 79–85.*
13. *Бельченко Г. И., Губенко С. И. Неметаллические включения и качество стали. – К.: Техніка, 1980. – 168 с.*
14. *Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали. – К.: Наук. думка, 2016. – 528 с.*
15. *Похмурский В. И. Коррозионная усталость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 208 с.*

Одержано 27.08.2018