

УДК 620.19.40

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.230221.95.723

АНАЛІЗ ПРИЧИН РОЗТРИСКУВАННЯ ТРУБ КОТЛА-УТИЛІЗАТОРА

СЕРЕДА Б. П.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
СУХОМЛІН В. І.², *канд. техн. наук, доц.*,
ВОЛОХ В. І.^{3*}, *аспір.*,
СЕРЕДА Д. Б.⁴, *канд. техн. наук*

^{1*} Кафедра автомобільного господарства, Державний вищий навчальний заклад «Дніпровський державний технічний університет», вул. Дніпробудівська, 2, 51918, Кам'янське, Україна, тел. +38 (0569) 53-02-62, e-mail: seredabp@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4353-136

² Кафедра фізики конденсованого стану, Державний вищий навчальний заклад «Дніпровський державний технічний університет», вул. Дніпробудівська, 2, 51918, Кам'янське, Україна, тел. +38 (0569) 53-02-62, e-mail: v_suhomlyn@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3673-1353

³ Кафедра фізики конденсованого стану, Державний вищий навчальний заклад «Дніпровський державний технічний університет», вул. Дніпробудівська, 2, 51918, Кам'янське, Україна, тел. +38 (098) 899-51-55, e-mail: aliha2004@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9476-2465

⁴ Кафедра машинобудування, Державний вищий навчальний заклад «Дніпровський державний технічний університет», вул. Дніпробудівська, 2, 51918, Кам'янське, Україна, тел. +38 (0569) 53-02-62, e-mail: seredabp@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9518-381X

Анотація. Постановка проблеми. Одне з основних завдань виробництва продукції – надійна і безаварійна експлуатація обладнання. У киснево-конвертному процесі під час продування чавуну в конверторі виділяється велика кількість оксиду вуглецю, який має температуру понад 1 700 °С вихідних газів. Охолоджуються конверторні гази в котлі-утилізаторі. Вихід конверторних газів характеризується циклічною нерівномірністю. При цьому відбувається нерівномірне нагрівання стінок труб котла утилізатора. Циркуляційними насосами хімічно очищена вода подається для примусового охолодження стінок котла. Коли вихідні гази піднімаються відбувається перетворення охолоджувальної води на пару з подальшою її подачею споживачеві. Дослідженням розв'язується науково-прикладна задача щодо причин утворення дефектів і виявлення тріщин на трубах котла утилізатора. **Мета роботи** – магнітнопорошковим і коерцитиметричним методами контролю дослідити причини розвитку поперечних тріщин на трубопроводах котла утилізатора ОКГ в конверторному виробництві сталі. **Висновки.** Одна з основних причин появи масових тріщини на трубах циліндричних кесонів – це термічна втома, викликана високими тепловими навантаженнями. Поперечні тріщини мають характер термовтомного руйнування, що підтверджується змінами у феритно-перлітній структурі металу, – наслідком нерівномірного локального охолодження стін кесона. Причини, що викликають порушення циркуляції води в котлі, – це падіння тиску в котлі і різке скидання, навантаження – випуск води з котла.

Ключові слова: коерцитивна сила; спеціальні межі; величина зерна; тріщина; твердість; структура; хімічний склад

ANALYSIS OF THE REASONS FOR CRACKING PIPES OF THE BOILER OF THE RECOVERY

SEREDA B.P.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
SUKHOMLIN V.I.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
VOLOKH V.I.^{3*}, *Postgrad. Student*,
SEREDA D.B.⁴, *Cand. Sc. (Tech.)*

¹ Department of Automotive Engineering, State Higher Educational Institution “Dnieper State Technical University”, 2, Dniprobudivska Str., 51918, Kamianske, Ukraine, tel. +38 (095) 905-86-75, e-mail: seredabp@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4353-1365

² Department of Condensed Matter Physics, State Higher Educational Institution “Dnieper State Technical University”, 2, Dniprobudivska Str., 51918, Kamianske, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-76, e-mail: v-suhomlyn@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-3673-1353

^{3*} Department of Condensed Matter Physics, State Higher Educational Institution “Dnieper State Technical University”, 2, Dniprobudivska Str., 51918, Kamianske, Ukraine, tel., +38 (056) 756-33-66, e-mail: aliha2004@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9518-381X

⁴ Department of Automotive Engineering, State Higher Educational Institution “Dnieper State Technical University”, 2, Dniprobudivska Str., 51918, Kamianske, Ukraine. tel.+38 (095) 905-86-75, e-mail: seredabp@ukr.net, ORCID ID:0000-0002-9518-381X

Abstract. Formulation of the problem. One of the main tasks of production is reliable and trouble-free operation of equipment. In the oxygen-envelope process, when cast iron is purged, a large amount of carbon monoxide CO is emitted in the converter, which has a high temperature of more than 1 700 °C of the outgoing gases. The envelope gases in the waste heat boiler are cooled. Converter gas output is characterized by cyclic unevenness. In this case, uneven heating of the walls of the boiler pipes occurs. By circulation pumps, chemically purified water is supplied for forced cooling of the boiler walls. When raising the outgoing gases, the cooling water is converted to pars by its subsequent supply to the consumer. The study is dedicated to solving the scientific and applied problem for the reasons for the formation of defects and the identification of cracks in the pipes of the recovery boiler. **The purpose of the work.** To investigate the causes of the development of transverse cracks in the pipelines of the recovery boiler by various methods of non-destructive testing, to use the methods of scanning microscopy to analyze the microstructure, mechanical tests, and the magnetic properties of structural carbon steel. **Conclusions.** One of the main reasons for the appearance of massive cracks in the pipes of cylindrical caissons is thermal fatigue caused by high thermal loads. Transverse cracks have the character of thermal fatigue failure, which is confirmed by changes in the ferrite-pearlite structure of the metal, resulting from uneven local cooling of the walls of the caisson. The reasons for the violation of the water circulation in the boiler are the pressure drop in the boiler and a sharp discharge, the load is the release of water from the boiler.

Keywords: *coercive force; special boundaries; grain size; crack; hardness; structure; chemical composition*

Постановка проблеми. В технології промислового виробництва сталі киснево-конверторним методом застосовується процес продування чавуну через водоохолоджувальну фурму технічним киснем (98...99,5 %). Склад конверторних газів містить до 90...95 % оксиду вуглецю, значну кількість винесення (до 150 г/м³) вони мають високу температуру (понад 1 700 °C). Продування конвертора триває близько 20 хв, тривалість паузи між продуванням – до 40 хв. Середньогодинний вихід газу для конвертора 300 тонн складає 18×10 м³/год., а максимальна витрата – 150×10 м³/год. Викид СО в таких кількостях з екологічних вимог неможливий, тому їх допалюють, а охолодження продуктів допалення постає технологічною необхідністю [1; 2].

Для охолодження конверторних газів використовується котел-утилізатор ОКГ-100 (охолоджувач конверторних газів), призначений для вироблення насиченої водяної пари за рахунок допалювання газів, що відходять від металургійного конвертора (рис. 1) [4].

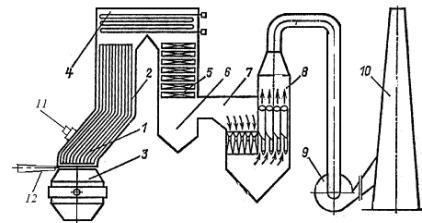


Рис. 1 Котел-утилізатор: 1, 2 – похила й вертикальна частини газоходу; 3 – конвертер; 4 – конвективний випарник; 5 – економайзер; 6 – бункер; 7 – горловина; 8 – труби Вентури; 9 – димохід; 10 – труба; 11 – палик допалювача; 12 – повітряне сопло

У потік газу через повітряне сопло підсмоктується повітря в кількості, достатній для повного згорання газу. Температура конверторних газів піднімається до 2 000...2 250 °C, одночасно йде передача теплоти від газів до радіаційних поверхонь нагрівання, що стримує підвищення температури понад 2 000...2 250 °C. На вході в конвективні поверхні нагрівання температура газів становить близько 800...900 °C і знижується в них до 300 °C. Зменшення тепловмісту газів унаслідок зниження температури відповідає кількості теплоти, використаної для вироблення пари в ОКГ. Випаровування води, що надходить з барабана через колектор і циркуляційні насоси у випарні поверхні нагрівання, відбувається одночасно в радіаційних випарних

поверхнях нагрівання (екранах) і у двох конвективних випарних секціях [1; 3].

Однак уже в першій період експлуатації виникла проблема, пов'язана із циклічним характером навантажень у разі значних змін температури теплоносія та тиску води в трубах випарника, що спричинило пошкодження поверхонь нагрівання котлів-утилізаторів. Ця проблема проявилася після п'яти років експлуатації у вигляді підвищеної пошкоджуваності теплообмінних труб та протікання води. При швидкому пуску-зупинці котла виникають циклічні гідроудари і термічні напруги у трубах охолодження тому, що температура газів на вході котла утилізатора сягає понад 2 000 °С, що забезпечує відповідні параметри пари на виході з котла. Підтйоки води були настільки сильними, що спричинювали зупинку виробничого процесу для тривалих ремонтних робіт зі заварювання виявлених тріщин.

Аналіз публікацій. Перші спостереження руйнувань через циклічні зміни навантажень відносять до кінця XVIII ст., коли після тривалої експлуатації диліжансів в Англії і поштових карет у Франції несподівано стали крихко ламатися осі, виготовлені з кованого заліза, достатньо пластичного. Першовідкривачем такого явища крихкого руйнування став Вільгельм Альберт (Wilhelm Albert).

У публікації [5] розглянуто випадки руйнування зварних магістральних газопроводів, у тому числі після тривалої

експлуатації, викликані наявністю тріщиноподібних дефектів з'єднання труб, що утворилися під час їх виготовлення і в процесі експлуатації. Але в цих дослідженнях не наведено аналізу тріщин по металографічних знімках і не вивчено способи їх виявлення.

У праці [6] наведено причини розвитку дефектів на трубах котла утилізатора за тривалої експлуатації. Однак у цій роботі не застосовувалися методи виявлення дефектів і не вивчено причини структурних термовтомних змін.

«Методичні вказівки із проведення магнітного контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій підйомних споруд для визначення їх остаточного ресурсу» МВ 0.00-7 [7], що діють в Україні, пропонуються тільки для підйомних споруд, але цей метод можливо застосовувати і в енергетичній промисловості.

Наразі аналіз наведених публікацій дозволяє стверджувати доцільність досліджень у цьому напрямку.

Мета дослідження – металографічним, магнітнопорошковим і коерцитиметричним методами контролю дослідити причини розвитку поперечних тріщин на трубопроводах котла утилізатора ОКГ в конверторному виробництві сталі.

Виклад матеріалу. Досліджували сталь 20, з якої виготовлені труби котла-утилізатора. В таблиці 1 наведено хімічний склад нової і використаної труби.

Таблиця 1

Хімічний склад трубної сталі 20

Найменування труб	Масова частка елементів, %								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al
Ø38×5 мм використана труба	0,22	0,43	0,25	0,006	0,005	0,05	0,08	0,10	0,005
Ø38×5 мм нова труба	0,17	0,51	0,25	0,003	0,009	0,10	0,09	0,16	0,040
Вимоги ДСТУ 7809 для сталі 20	0,17... 0,24	0,35... 0,65	0,17... 0,37	≤0,040	≤0,035	≤0,25	≤0,3	≤0,3	–

Хімічний аналіз показав, що трубопроводи як нові, так і ті, що були в експлуатації, за хімічним складом не відрізняються і відповідають вимогам ДСТУ 7809.

Коерцитивна сила визначалася по всій частині досліджуваних труб напів-автоматичним коерцитиметром КРМ-Ц-К2М. Контроль твердості виконувався переносним твердоміром ТДМ-2 по НВ

згідно з ГОСТ 22791-77, а контроль мікро твердості проводився згідно з ГОСТ 9450-76. Для виявлення зовнішніх дефектів контроль здійснювався магнітно-порошковим дефектоскопом МАГЕКС-3 згідно з ГОСТ 21105-87. Дослідження мікроструктури труб проводили на автоматичному аналізаторі структур ІА 32, для цього був виконаний відбір проб металу розміром $20 \times 20 \times 5$ мм.

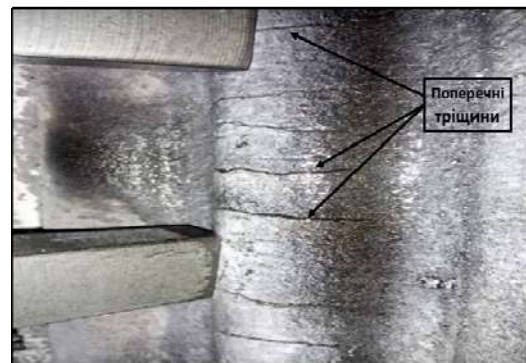
За результатами вибіркової ультразвукової товщинометрії встановлена

товщину стінки в основних зонах трубопроводів – 3,5...4,4 мм, однак у деяких місцях є ділянки труб із товщиною стінки 1,8...2,2 мм. Проектна (номінальна) товщина стінок трубопроводів становить 5 мм.

За допомогою магнітнопорошкової дефектоскопії визначено, що по всій поверхні кесона на трубопроводах є поперечні тріщини, по колу довжиною від 5 до 40 мм, через кожні 10...50 мм. Типову ділянку труб із тріщинами котла утилізатора показано на рисунку 2.



а



б

Рис. 2. Ділянка труб утилізатора ОКГ-100 (а); поперечні тріщини, виявлені магнітопорошковим методом на трубах (б)

Для детального дослідження поперечних тріщин вирізали зразки з нових труб, а також найбільш пошкоджених ділянок трубопроводів, які були в експлуатації.

Для дослідження надані такі зразки труб: нової і використаної, яка перебувала в експлуатації. Результати контролю твердості та величини коерцитивної сили наведені в таблиці 2. Наведено результати механічних випробувань нової та використаної труб.

Контролем встановлено, що в результаті експлуатації труб відбулося збільшення

твердості на 21,2 одиниці на трубах, які були у використанні. Наведено коефіцієнти кореляції (табл. 3), які застосовували для вимірювання щільності зв'язку між результативними і факторними ознаками у кореляційно-регресійній моделі за лінійної залежності. За абсолютною величиною коефіцієнт кореляції коливається в межах від +0,64 до +0,86. Чим ближчий коефіцієнт кореляції до +1, тим тісніший прямий зв'язок між значенням нової труби та труби використаної.

Таблиця 2

Результати твердості та магнітних випробувань нової та використаної труб

Найменування труб	Твердість, НВ	НВ серед.	Мікротвердість, кгс/мм ²		Коерцитивна сила H _c , А/см	H _c серед.
Ø 38 × 5 мм використана труба	142, 140, 141, 142, 140	141	118, 120, 130, 132, 130, 120, 121, 136, 137	126,8	3,2; 3,1; 3,3; 3,1; 3,2	3,18
Ø38 × 5 мм нова труба	161, 162, 163, 163, 162	162,2	176, 177, 180, 190, 210, 185, 210, 185, 187, 210, 221	197,2	4,8; 5,1; 4,2; 4,9; 5,1; 5,1;	4,86

Таблиця 3

Результати магнітних і механічних випробувань труби нової і використаної

Властивості	Труба Ø 38×5 мм		
	труба нова	труба використана	коефіцієнт кореляції
<i>HV</i>	162,20	141,00	0,86
мікротвердість, кгс/мм ²	197,20	126,80	0,64
<i>Hc</i>	4,87	3,18	0,65
σ_T , Н/мм ²	350,00	250,00	0,71
σ_B , Н/мм ²	460,00	315,00	0,68
величина зерна, <i>D</i> ум. серед., мкм	10,82	16,59	0,71
Відносна кількість спец. меж, %	12,66	26,86	0,69

Відбулась зміна механічних властивостей межі плинності G_T і міцності G_B . Причина зниження твердості і міцності полягає у постійному впливі підвищених

температур. Експлуатація котла після гарантійного терміну – понад 10 років роботи (рис. 3, 4).

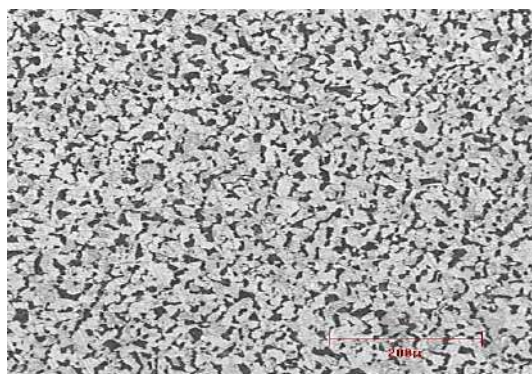
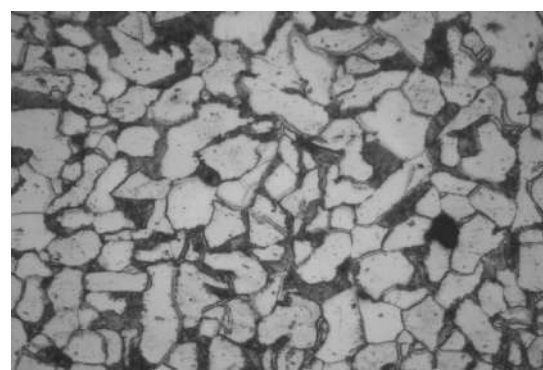
*a* × 100*b* × 500

Рис. 3. Мікроструктура нової труби феритно-перлітна, співвідношення 20/80 відповідно

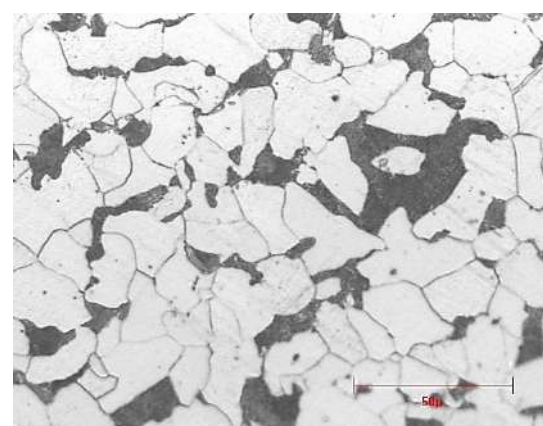
*a* × 100*b* × 500

Рис. 4. Мікроструктура використаної труби після експлуатації протягом 10 років, феритно-перлітна, співвідношення 30/70 відповідно

Згідно з результатами мікроструктури є зміни у феритно-перлітній структурі нової труби і використаної. За впливу температурних газів 800...900 °С у доектевтоїдному фериті низьковуглецевих

сталей, що утворюється за ізотермічного розпаду аустеніту в дифузійній області. Перетворення ГЦК → ОЦК відбувається з утворенням мартенситу, кристали якого пов'язані з вихідним аустенітом за

орієнтаційним співвідношенням Курдюмова–Закса.

За методикою [8; 9] та вказаними правилами зроблено підрахунок відносної кількості спеціальних меж у феритній складовій феритно-перлітної структури. Отримане співвідношення спеціальних границь до загальної кількості меж складає $n_{\text{спец.}}/n_{\text{заг.}} = 0,142$ (14,2 %) (рис. 5).

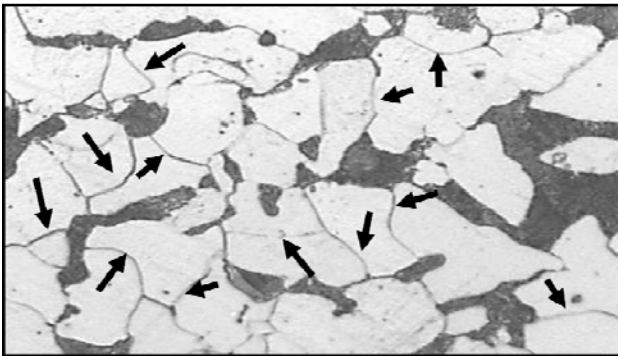


Рис. 5. Спеціальні границі у феритно-перлітній сталі 20 (стрілками показано розташування спеціальних меж)

Температурний вплив викликає збільшення величини зерна, а також відносної кількості спеціальних низькоенергетичних меж, що спричинює зниження енергії зернограничного комплексу, який впливає на магнітні властивості сталі. Підвищена кількість спеціальних меж пояснюється малою кількістю перлітних та інших малорухомих частин структури [10]. Середній розмір зерна труби нової складає 10,82 мкм. Середній розмір зерна використаної труби складає 16,59 мкм.

Основна причина зниження твердості і міцності – це постійний вплив підвищених температур під час експлуатації труб. Що стосується механічних властивостей, відбулася зміна межі міцності σ_B на і межі текучості σ_T на 100 і на 145 Н/мм² відповідно. Також знизилась твердість HV і мікротвердості на використаній трубі на 21,2 і 70,4 відповідно. Відбулося зниження величини коерцитивної сили. Зниження

магнітних властивостей пояснюється збільшенням відносної кількості спеціальних меж – це межі з особливими властивостями зі зниженою поверхневою енергією та слабким лінійним натягом, що викликало збільшення магнітної проникності та зниження величини коерцитивної сили на $H_c = 1,69$ А/см.

Висновок. Одна з основних причин появи масових тріщини на трубах циліндричних кесонів – це термічна втома, викликана високими тепловими навантаженнями. Поперечні тріщини мають характер термовтомного руйнування, що підтверджується змінами у феритно-перлітній структурі металу, будучи наслідком нерівномірного локального охолодження стін кесона. Причини, що викликають порушення циркуляції води в котлі – це падіння тиску в котлі і різке скидання, навантаження – випуск води з котла.

Подібна зміна циклів (теплозмін) генерувала термонапруження – невеликі, але достатні для активації мікропластичної деформації механізмом повзучості, що спричинює теплову втому металу з виникненням тріщин у площині, перпендикулярній головній осі труби [8].

Попередній контроль показав, що застосування коерцитиметричного контролю дозволяє оцінити зниження механічних властивостей труб котла-утилізатора. Застосування магнітної структуроскопії вказує на можливості використання магнітного контролю для визначення локальних змін у структурі металу. Одна з основних причин розтріскування трубопроводів – це термічна втома трубопроводів. Тріщини мають характер термовтомного руйнування, що стало наслідком нерівномірного локального охолодження стін кесона і котла.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гічов Ю. О., Бойко В. М., Адаменко Д. С. Котли-утилізатори та їх тепловий розрахунок : навч. посіб. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2004. 46 с. URL: <https://nmetau.edu.ua> > mdiv

2. Воинов А. П., Зайцев В. А., Кузнецов Л. И. и др. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты Под ред. Л. Н. Сидельковского. Москва : Энергоатомиздат, 1989. 272с. URL: <https://www.twirpx.com> > file
3. Розенгарт Ю. И., Якобсон Б. И., Мурадова З. А. Вторичные энергетические ресурсы черной металлургии и их использование. Київ : Вища школа, 1988. 328 с. URL: <https://metalspace.ru> > ecology > 811-ver-chnojoj-metallurgii
4. Розенгарт Ю. И., Мурадова З. А., Теверовский Б. З. и др. Теплоэнергетика металлургических заводов : учеб. для вузов. Под ред. Ю. И. Розенгарта. Москва : Металлургия, 1985. 303 с. URL: <https://www.twirpx.com> > file
5. Рыбаков А. А., Филипчук Т. Н., Гончаренко А. В. Трещины в сварных соединениях труб большого диаметра меры их предупреждения. *Автоматическая сварка*. 2013. № 3. С. 16–22. URL: www.irbis-nbuv.gov.ua > irbis_nbuv > cgiirbis_64
6. Маликов В. А., Павлов С. Б., Густомясов А. В. Формирование и развитие дефектов труб котла-утилизатора при длительной эксплуатации. *Проблемы современной науки и образования*. 2014. № 9 (27). С. 17–22. URL: <https://scienceproblems.ru> > images > PDF > ЖУРНАЛ-ПСНО 9(27)2014
7. Методичні вказівки з проведення магнітного контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій підйомних споруд та визначення їх залишкового ресурсу: МВ 0.00-7.01-05.-Х. 2005. 77 с.
8. Большаков В. И., Сухомлин Г. Д. и др. Специальные границы в мартенситных структурах низкоуглеродистых сталей. *Металлознание та термічна обробка металів*. 2006. № 4 (35). С. 5–14. URL: pgasa.dp.ua > wp-content > uploads > 2018/05 > Sajt-Suhomlin-18
9. Сухомлин Г. Д. Множественные специальные стыки границ зерен в ГЦК поликристаллах. ФММ. Т. 54, вып. 2. 1982. С. 402–405. URL: www.vdnu.narod.ru > pdf
10. Большаков В. И., Сухомлин В. И., Волох В. И. Специальные границы в обезуглероженном слое строительных сталей. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. Вып. 67. 2013. С. 373–377. URL: irbis-nbuv.gov.ua > cgi-bin > irbis_nbuv > cgiirbis_64 > smmc_2013_67_75

REFERENCES

1. Gichov Yu.O., Boyko V.M. and Adamenko D.S. *Kotly-utylyzatory ta yikh teplovyy rozrakhunok : navch. posib.* [Utilization boilers and their thermal calculation : textbook]. Dnipropetrovsk : NMetAU Publ., 2004, 46 p. (in Ukrainian)
2. Voinov A.P., Zaitsev V.A., Kuznetsov L.I. and oth. *Kotly-utilizatory i energotekhnologicheskiye agregaty* [Utilization boilers and energy-technological units]. Edited by L.N. Sidelkovskiy. Moscow : Energoatomizdat Publ., 1989, 272 p. (in Russian)
3. Rozengart Yu.I., Yakobson B.I. and Muradova Z.A. *Vtorichnyye energeticheskiye resursy chernoy metallurgii i ikh ispol'zovaniye* [Secondary energy resources of ferrous metallurgy and their use]. Kyiv : Vysha Shkola, 1988, 328 p. (in Russian)
4. Rosengart Yu.I., Muradova Z.A., Teverovsky B.Z. and oth. *Teploenergetika metallurgicheskikh zavodov : uchebnyk dlya vuzov* [Thermal power of metallurgical plants: textbook for universities]. Edited by Yu.I. Rosengart. Moscow : Metallurgy Publ., 1985, 303 p. (in Russian)
5. Rybakov A.A., Filipchuk T.N. and Goncharenko A.V. *Treshchiny v svarnykh soyedineniyakh trub bol'shogo dimetra mery ikh preduprezhdeniya* [Cracks in welded joints of large-diameter pipes preventive measures] *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 2013, no. 3, pp. 16–22. (in Russian)
6. Malikov V.A., Pavlov S.B. and Gustomyasov A.V. *Formirovaniye i razvitiye defektov trub kotla-utilizatora pri dlitel'noy ekspluatatsii* [Formation and development of defects in the pipes of the boiler-utilizer during long-term operation]. *Problemy sovremennoy nauki i obrazovaniya* [Problems of modern science and education]. 2014, no. 9 (27), pp. 17–22. (in Russian)
7. *Metodychni vkazivky z provedennya mahnitnoho kontrolyu napruzhenno-deformovanoho stanu metalokonstruktsiy pidyomnykh sporud ta vyznachennya ikh zalyshkovoho resursu : MV 0.00-7.01-05.-KH* [Methodical instructions for conducting magnetic control of a stressed-deformed mill of metal construction equipment and the identification of a surplus resource : MV 0.00-7.01-05.-X.]. 2005, 77 p. (in Ukrainian)
8. Bolshakov V.I., Sukhomlin G.D. and oth. *Spetsyal'nye hranytsy v martensytnykh strukturakh nyzkouglerodistykh staley* [Special boundaries in the martensitic structures of low-carbon steels]. *Metalloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2006, no. 4 (35), pp. 5–14. (in Russian)
9. Sukhomlin G.D. *Mnozhestvennyye spetsial'nyye styki granits zeren v GTSK polikristallakh* [Multiple special joints of grain boundaries in fcc polycrystals]. FMM, vol. 54, no. 2, 1982, pp. 402–405. (in Russian)
10. Bolshakov V.I., Sukhomlin V.I. and Volokh V.I. *Spetsial'nyye granitsy v obezuglerozhenom sloye stroitel'nykh staley* [Special boundaries in the decarburized layer of structural steels]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. No. 67, 2013, pp. 373–377. (in Russian)

Надійшла до редакції: 21.12.2020.