

*Андрій ГРУЗЕВИЧ<sup>1</sup>, Дмитро ДЕРЕЧА<sup>2,3</sup>, Денис НІКІФОРОВ<sup>4</sup>*

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ТЕПЛОСТІЙКИХ ТРУБ СУБСТРУКТУРНИМ ЗМІЦНЕННЯМ**

<sup>1</sup>*Трипільська ТЕС*

*м. Українка, 08720, Україна. E-mail: Gruzevich@bigmir.net*

<sup>2</sup>*Інститут магнетизму НАН України і МОН України*

*бульв. Акад. Вернадського 36-б, м. Київ, 03142, Україна.*

<sup>3</sup>*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського»  
пр. Перемоги 57, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: dderecha@gmail.com*

<sup>4</sup>*ПАТ «Центрэнерго»*

*вул. Козацька 120/4, м. Київ, 03022, Україна. E-mail: d.l.nikiforov.jsc.ce@gmail.com*

*Andrii HRUZEVYCH<sup>1</sup>, Dmytro DERECHA<sup>2,3</sup>, Denys NIKIFOROV<sup>4</sup>*

## **IMPROVING OF OPERATIONAL RELIABILITY OF THERMAL PIPES BY SUBSTRUCTURAL STRENGTH**

<sup>1</sup>*Трипільська CHP*

*Ukrainka, 08720, Ukraine. E-mail: Gruzevich@bigmir.net*

<sup>2</sup>*Institute of Magnetism Nat. Acad. of Sci. of Ukraine and Min.*

*of Edu. And Sci. of Ukraine*

*36 b Academician Vernadsky Blvd., Kyiv, 03142, Ukraine*

<sup>3</sup>*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*

*37, Prosp. Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: dderecha@gmail.com*

<sup>4</sup>*PJSC "Centrenergo"*

*120/4 "e", Kozatska St., Kyiv, 03022, Ukraine. E-mail: d.l.nikiforov.jsc.ce@gmail.com*

### **ABSTRACT**

Traditional methods of increasing heat resistance and thermal stability characteristics of steels, used for pipe production, are associated with complex alloying systems and high financial costs. Therefore, an urgent problem is the development of low-cost and simple technologies to improve the level of physical and technological properties of products made of heat-resistant steels, which allow an increase in their durability without changing the alloying system, using different types of surface modification. Today, one of the most promising methods is combined mechanical thermal treatment.

**KEY WORDS:** *mechanical-thermal treatment, steel hardening, durability, substructure, heat resistance.*

### **ВСТУП**

Сутність механіко-термічної обробки (МТО) полягає в деформації на невеликий ступінь обтиснення 10-15% при нормальній або підвищеній температурі і наступному полігонізаційному відпалі при температурі, що не перевищує температуру початку рекристалізації. Обтиснення більше 15% приводить до знеміцнення сталі [1]. Полігональна структура характеризується наявністю субзерен, утворених в результаті вибудовування дислокацій одного знаку у вертикальні ряди. При цьому відбувається зменшення енергії в кристалах, тобто метал переходить в більш стабільний стан.

МТО не викликає різкого зростання щільності дислокацій, однак вона сприяє рівномірному їх розподілу в обсязі металу. Рівномірність і впорядкованість розподілу дислокації сприяє більш повному поглинанню енергії, що підводиться в повному обсязі металу [2].

Термічна стабільність структури полігонізації обумовлена не тільки зменшенням вільної енергії металу за рахунок компенсації пружних полів, вибудованих у стінки дислокацій,

а також взаємодією субграниць із домішками, що приводить їх до блокування стінок [3]. Таке блокування може здійснюватися навіть при мізерно малій концентрації розчинених домішок, при цьому в поліганізованому металі атоми впровадження, які більш ефективно блокують дислокації, розташовуються в стінках і не утворюють атмосфер Коттрелла навколо індивідуальних дислокацій.

Метали з розвинутою полігональною структурою мають більш високий опір повзучості в порівнянні з вихідним металом. Це забезпечується за рахунок:

1. високого опору дислокаційних стінок дії термічної флуктуації, особливо, якщо вони блоковані домішками впровадження (атмосфери Коттрелла, Сузуки, Снука);
2. гальмівного впливу полігональної структури розвитку поперечного ковзання;
3. підвищення однорідності деформації всередині окремих зерен і в об'ємі металу, що деформується.

Ефект підвищення жароміцності після МТО та її різновидів залежить від розміру субзерен, кута їх розорієнтації, ступеня блокування дислокаційних границь і однорідності розвитку полігональної структури в об'ємі металу, що піддавався зміцненню. Останнє визначається режимом МТО - ступенем деформації, температурою й напруженим станом, при якому відбувається деформування; температурою й тривалістю відпалу наклепаного металу.

За даними робіт [4–6] МТО сприяє підвищенню корозійної тривкості сталей, тому підвищення термінів служби труб пароперегрівачів зі сталей після МТО збільшується, як за рахунок підвищеної жароміцності, так і корозійної тривкості.

Для широкого практичного використання механіко-термічної обробки необхідне вивчення всіх змін структури й властивостей, які відбуваються в металі після МТО та в процесі тривалої експлуатації.

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Під час виготовлення експериментальної партії зміцнених труб деформування проведено двома способами: холодним редукуванням і холодним волочінням за технологією (рис.1).

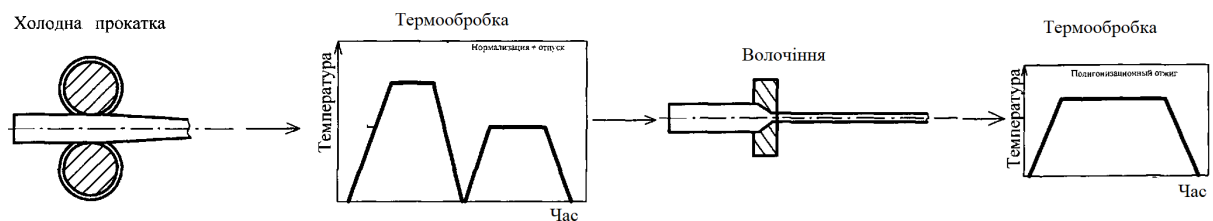


Рис. 1. Технологія механіко-термічної обробки труб зі сталі 12Х1МФ.  
Fig. 1. Technology of mechanical-thermal processing (MTP) of pipes steel 12Cr1MoV.

Після деформації як редукуванням, так і волочінням труби піддавались полігонізаційному відпалу при температурі 580 °С, тривалістю 10 годин далі травленню та виведенню.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Структура сталей і сплавів є одним з основних факторів, що визначають властивості металу. Механічні й жароміцні характеристики сталі 12Х1МФ визначаються співвідношеннями таких структурних складових, як ферит, бейніт і карбідних часток, кількість яких визначається хімічним складом сталі, способом виплавки й наступного переділу, режимом термічної обробки.

Дослідження структури у вихідному стані й після МТО показали, що ферито-сорбітна структура труб мало змінюється в процесі МТО, хоча в останньому випадку спостерігається більше виділення карбідних часток у феритних зернах.

Мікроструктура вихідного металу являла собою ферито-бейнітну суміш (рис. 2 а). Деформація на 12,5% як волочінням, так і редукуванням є досить незначною, щоб викликати подрібнення зерна, і структури металу після МТО (рис. 2 б). Однак слід зазначити, що після деформації та відпалу навіть при звичайному травленні в окремих феритних зернах виявлялась полігональна субструктура.

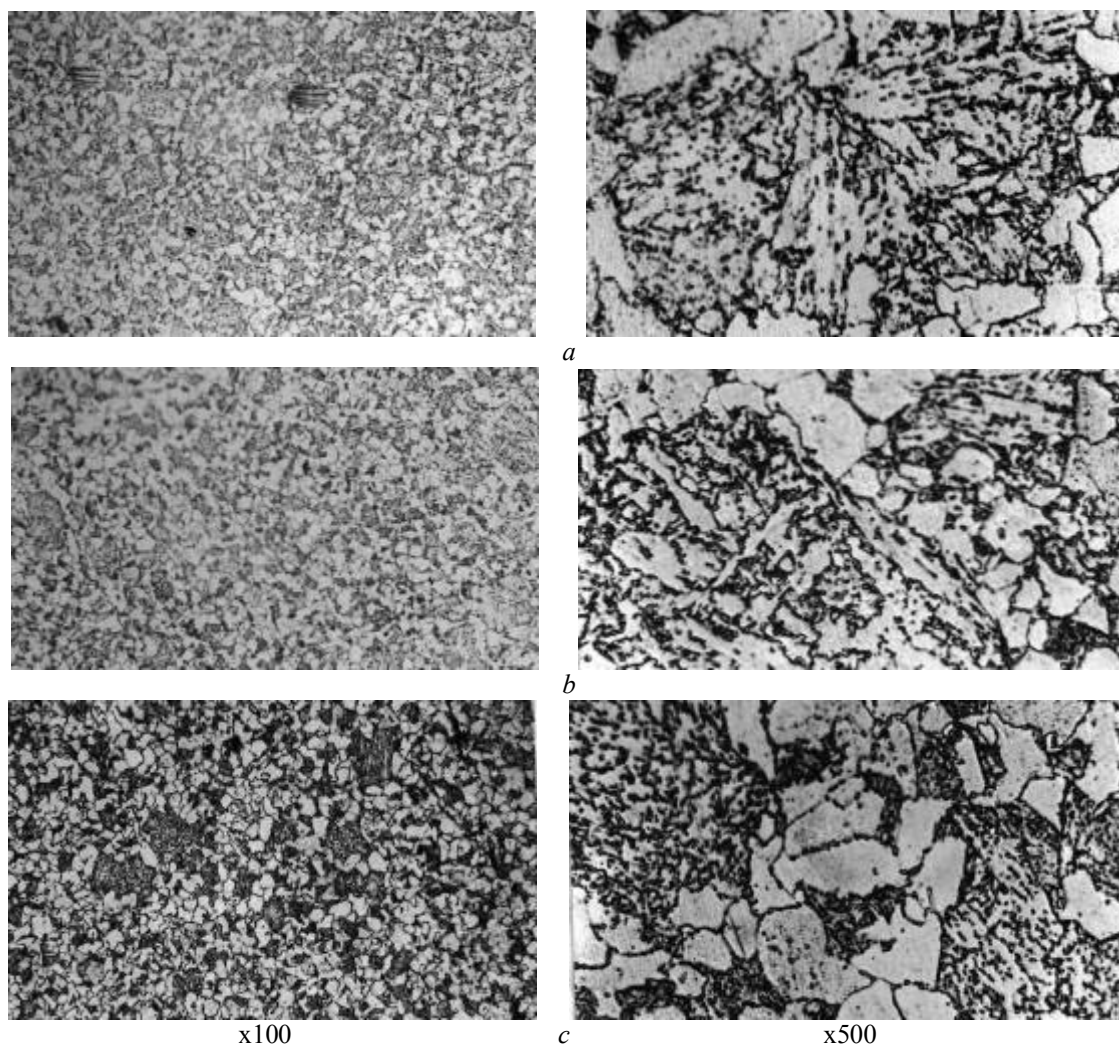


Рис. 2. Мікροструктура металу труб зі сталі 12Х1МФ:  
 а) у вихідному стані; б) після деформації; с) після полігонізаційного відпалу.  
 Fig. 2. Microstructure of pipes metal of 12Cr1MoV:  
 a) the initial state; b) after deformation; c) polygonal annealing.

Рентгеноструктурний фазовий і хімічний карбідний аналіз зразків із труб у вихідному стані та після МТО практично не виявив розходження фазового складу сталі (табл. 1) [7].

Табл. 1. Фазовий і хімічний карбідний склад металу труб до і після МТО  
 Table 1. Phase and chemical composition of pipes metal before and after MPT

Стан металу	Фазовий склад	Зміст у карбідній фазі, %			Відсоток переходу в карбідну фазу, %		
		<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>V</i>
Після нормалізації (Н) та відпуску (В)	$M_3C + VC + M_{23}C_6 + M_7C_3$	0,18	0,039	0,13	15	16	68,5
Після МТО	$M_3C + VC + M_{23}C_6 + M_7C_3$	0,11	0,051	0,13	10	21	65

Фазовий склад сталі 12Х1МФ являв собою карбіди цементитного типу ( $M_3C$ ), карбіди ванадію ( $VC$ ) і сліди карбідів  $M_{23}C_6$  і  $M_7C_3$ . Процентний вміст ванадію в карбідній фазі після МТО залишився незмінним (0,13  $V$ ) порівняно з вихідним станом, трохи понизився вміст хрому і підвищився вміст молібдену.

Мікροструктурний аналіз труб після експлуатації тривалістю 104 тис. годин показав, що в металі після МТО, спостерігається закономірний процес диференціації бейнітної та

ферито-перлітної мікроструктури сталі за рахунок старіння з утворенням ділянок ферито-карбідної суміші, виділенням відособлених карбідів і їхньою коагуляцією (рис. 4).



Рис. 4. Мікроструктура сталі 12X1MΦ (×500).

Fig. 4. Microstructure of steel 12Cr1MoV.

Однак збереження фрагментованої субструктури забезпечує стабільність властивостей і гальмування швидкості повзучості сталі. Електронно-мікроскопічне дослідження реплік [8] свідчить про рівномірність виділення карбідів і їхньої дисперсності в металі після МТО та 20 тис. h експлуатації порівняно зі звичайним металом після 16 тис. h. Дослідження дислокаційної структури металу після експлуатації так само свідчить про більшу стабільність структури металу, після МТО. Так у металі після МТО щільність дислокацій становить  $10^9 \text{ cm}^{-2}$ , полігональна структура після МТО та періоду експлуатації тривалістю 51 тис. h не змінилась, на тому ж рівні перебуває і щільність дислокацій. Дослідження тонкої структури [7] свідчить про збереження діслокаційних субграниць, стінок дислокацій та фрагментованої структури. Щільність дислокацій, рівномірно розподілених у феритних зернах, становить  $(0,6-0,8) \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ , що відповідає вихідному стану.



Рис. 5. Тонка структура металу труби МТО після 51382 h експлуатації (×30000) [7].

Fig. 5. The high magnification metal microstructure of pipes steel after MPT under 51382 operation h (× 30000) [7].

Зміцнені методом МТО труби були встановлені на панелях НРЧ (нижня радіаційна частина) котлів ТПП-210А та ТГМП-314 блоків 300 MW Трипільської ТЕС.

Слід зазначити, що зміцнені МТО труби на котлах ТПП-210А були встановлені в ошиновану зону бокових панелей НРЧ без ошиповки, що заздалегідь передбачало для них більш важкі умови експлуатації. Труби перебувають в експлуатації тривалістю більше 121 тис. h. Деякі з них зазнавали пошкоджень, деякі працюють без пошкоджень і залишаються в подальшій експлуатації.

В процесі експлуатації труб у НРЧ котлів ТПП-210А та ТГМП-314 блоків 300 MW Трипільської ТЕС спостерігаються як короткочасні, так і тривалі температурні вибіги, що приводять до передчасного руйнування труб через зниження тривалої міцності.

Так на рис. 6 приведені фотографії зруйнованої ділянки труби внаслідок дії короткочасного перегріву металу до  $850 \text{ }^\circ\text{C}$  та після тривалого перегріву труб.

В першому випадку мікроструктура в зоні пошкодження являє собою браковану структуру, утворену внаслідок перегріву металу (рис. 7).





Рис. 6. Труба НРЧ після короткочасного перегріву металу до 850 °С (а) та пошкоджена ділянка труби НРЧ після 7398 h експлуатації (b).  
 Fig. 6. The pipe of lower radiation part after short-term overheating of metal up to 850 °С (a) and damaged pipe section of lower radiation part after 7398 h of operation (b).

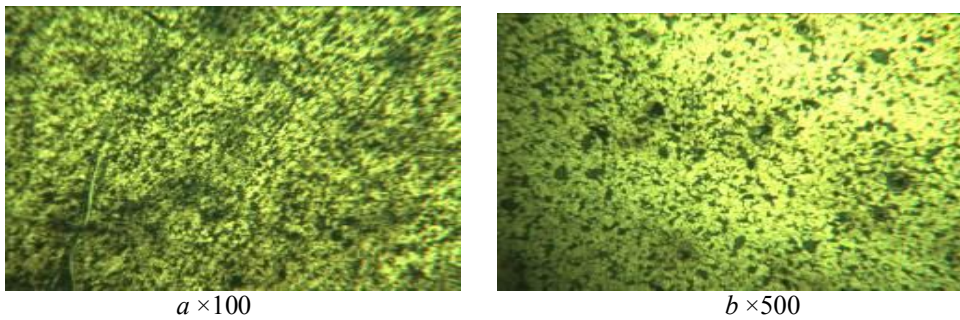


Рис. 7. Мікроструктура металу труби після пошкодження внаслідок дії короткочасного перегріву: а) на краю розриву; б) тильна сторона.  
 Fig. 7. The microstructure of t pipe after damage due to the effect of short-term overheating: a) at the edge of the rupture; b) back side.

В другому випадку, мікроструктура на краю розриву являє собою ферито-карбідну суміш, в той же час, структура металу на відстані від розриву являє собою ферито-бейнітну суміш з балом зерна 4-5 (рис. 8).

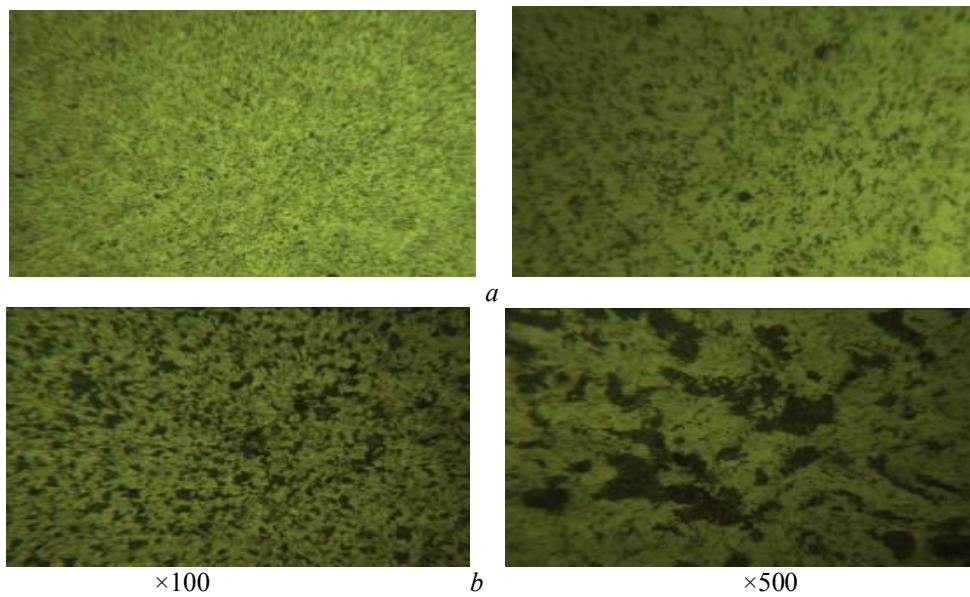


Рис. 8. Мікроструктура металу труби після 7398 h експлуатації.:  
 а) на відстані від розриву; б) на краю розриву.  
 Fig. 8. The microstructure of pipe after 7398 h of operation:  
 a) at some distance from the rupture; b) at the edge of the gap.

Іншою причиною передчасного виходу труб з ладу на газомазутних блоках ТГМП-314 є корозійно-втомне руйнування (рис. 9), що приводить до появи поперечних тріщин та потоншення стінки труби до 1-2 mm.

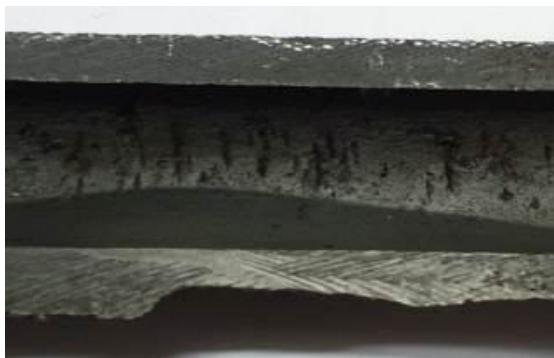


Рис. 9. Труба газомазутного блоку, пошкоджена корозійно-втомними тріщинами.  
Fig. 9. The pipe of the gas-oil fired boiler damaged by corrosion-fatigue cracks.

### ВИСНОВКИ

За період досліджень на блоках 4-6 спостерігались пошкодження не зміцнених труб НРЧ внаслідок потоншення стінки за рахунок газової корозії, корозійно-термічної втоми, тривалих і короткочасних перегрівів. Так, на котлі блоку 4 було замінено через газову корозію 75 труб бокових панелей НРЧ, так само мали місце заміни внаслідок тривалого перегріву і повзучості, одина аварійна зупинка блоку через розрив труби НРЧ в результаті короткочасного перегріву металу. На котлах блоку 5 було замінено 100 труб фронтної панелі НРЧ через розвиток кільцевих тріщин корозійно-термічної втоми. На блоці 6 замінено 74 труби фронтної панелі НРЧ і 69 труб задньої панелі внаслідок розвитку корозійно-термічної втоми. В цілому, за період дослідження, на блоках 4-6 замінено внаслідок потоншення, повзучості і пошкоджень 510 труб. В той же час, на трубах зміцнених методом МТО, не спостерігається слідів повзучості, тріщин термічної втоми та корозійних пошкоджень. Огляд зміцнених труб в період зупинів блоків показав, що труби не змінили свого початкового стану. Все це свідчить про те, що МТО є ефективним методом підвищення працездатності труб поверхонь нагріву.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Деформационное упрочнение стали с бейнитной структурой / В.Е. Громов, Е.Н.Никитина, Ю.Ф. Иванов, К.В. Аксёнова, Е.В. Корнет // Успіхи фізики металів, – 2015. – Т. 16. – С. 299-328.
2. Гордиенко Л.К. Высокопрочное состояние металлов, обусловленное субструктурным упрочнением. // Физика и химия обработки металлов. – 1967. – №4.
3. Иванова В.С. К вопросу о роли дислокаций в процессе ползучести. В сб. // Прочность металлов". – М., Изд., 1956.
4. Шапиро М.Д., Злотницкая А.В. Повышение конструктивной прочности сталей и сплавов. Сб.2, М., 1970 тр. МДНТ. С. 212-215.
5. Опыт эксплуатации упрочненных труб на поверхностях нагрева котлов высокого давления. / Л.К. Гордиенко, Е.Я. Векслер, В.М. Чайковский, И.П. Можаренко, А.Л. Горбачев, В.С. Дворниченко // Энергетика и электрификация. – 1981. – № 3. – С. 21-24.
6. Субструктурное упрочнение котельных труб из стали 12Х1МФ / Е.Я. Векслер, И.П. Можаренко, З.Г. Фридман, В.А. Кочеткова, В.М. Чайковский, Г.Г. Пронина // Энергетика и электрификация. – 1986. – № 2. – С.9-11.
7. Грузевич А.В., Дереча Д.А. Исследование изменений свойств металла механико-термически обработанных труб при длительной эксплуатации на поверхностях нагрева блоков сверхкритического давления // Процессы литья. – 2018. – № 2. – С. 57-66.
8. Грузевич А.В. Эффективность применения субструктурно-упрочненных труб на поверхностях нагрева блоков котлов сверхкритического давления // Автоматическая сварка. – 2017. – № 10 (768). – С. 43-51.