УДК 669.18-621.746

Л.В. Опришко,
Т.В. Головняк,
П.В. Герасименко,
І.І. Полтава

Науково-дослідний та конструкторсько-
технологічний інститут трубної
промисловості ім. Я. Ю.Осади,
(ДП «НДТІ»), м. Дніпро, Україна

ЖАРОМІЦНІСТЬ МЕТАЛУ КОТЕЛЬНИХ ТРУБ З БЕЗПЕРЕВНОЛИТОЇ ЗАГОТОВКИ ВИРОБНИЦТВА ТОВ «МЗ «ДНІПРОСТАЛЬ»

L.V. Opryshko,
T.V. Holovniak,
P.V. Herasymenko,
I.I. Poltava

State Enterprise Ye. Ye. Osada Scientific
Research Tube Institute, Dnipro, Ukraine

HIGH-TEMPERATURE STRENGTH OF METAL OF BOILER TUBES MADE FROM CONTINUOUSLY CAST BILLETS PRODUCED BY MZ DNIPROSTAL LLC

Мета. Дослідження спроможності нової технології виробництва (засобом гарячої прокатки на ТПА 30-102 ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ» безпосередньо із недеформованої безперервнолитої заготовки виробництва ТОВ «МЗ «ДНІПРОСТАЛЬ») забезпечувати отримання котельних труб високої експлуатаційної надійності широкого сортаменту зі сталі 20.

Методика. Дослідження макроструктури (наявність залишків литої структури) та мікроструктури металу труб, випробування на тривалу міцність, фрактографічні та металографічні дослідження характеру руйнування зразків труб після жароміцних випробувань.

Результати. Досліджені характеристики жароміцності (тривала міцність і тривала пластичність) металу котельних труб у різних станах (після гарячої прокатки і після нормалізації з окремого нагріву), які були виготовлені з різними коефіцієнтами витягу на трубопрокатному агрегаті з безперервним станом (ТПА 30-102) ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ» із недеформованої безперервнолитої заготовки сталі 20 виробництва ТОВ «МЗ «ДНІПРОСТАЛЬ». Досліджені процеси, які відбуваються в структурі металу цих труб за високої температури впродовж тривалого навантаження, та характер руйнування зразків труб при жароміцних випробуваннях. Встановлено вплив структурних характеристик та технологічних факторів виробництва трубної заготовки і труб на рівень жароміцності і поведінку металу дослідних труб в умовах тривалого навантаження за високих температур. Показана необхідність вдосконалення технології виробництва котельної безперервнолитої заготовки на ТОВ «МЗ «ДНІПРОСТАЛЬ» з метою отримання необхідної макрокристалічної будови (з розвиненою зоною дрібних рівноосних розорієнтованих кристалів та пригніченою зоною стовпчастих кристалів) і нормування цього показника металу котельної недеформованої безперервнолитої заготовки в ТУ У 24.1-05757883-216 «Заготовка сталева безперервнолита круга для виготовлення котельних труб». Встановлена можливість постачання на об'єкти енергетики України котельних труб зі сталі 20, що виготовлені із заготовки ТОВ «МЗ «ДНІПРОСТАЛЬ» з коефіцієнтом витягу не менш ніж 17,0 на ТПА 30-102, без обов'язкової, згідно вимогам нормативної документації для таких труб, нормалізації з окремого нагріву.

Наукова новизна. Вперше для котельних труб, що виготовлені з різними коефіцієнтами витягу на ТПА 30-102 ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ» із недеформованої безперервнолитої заготовки сталі 20 виробництва ТОВ «МЗ «ДНІПРОСТАЛЬ», визначена границя тривалої міцності за температурою експлуатації 450 °C за 100 тис. годин, що нормована ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207, і є основною характеристикою за розрахунками на міцність енергетичного облад-

нання. Досліджена поведінка металу цих труб в різних станах (після гарячої прокатки та нормалізації з окремого нагріву) в умовах тривалого навантаження за високої температури.

Практична цінність. Отримані результати досліджень слугуватимуть основою для удосконалення технології виробництва котельних недеформованих безперервнолитих заготовок на ТОВ «МЗ «ДНПРОСТАЛЬ» і виготовлених із них труб на ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ», що забезпечить отримання за новою технологією котельні труби високої експлуатаційної надійності. Використання заготовки власного виробництва дозволить корпорації ІНТЕРПАЙП УКРАЇНА знизити собівартість котельних труб та бути конкурентоспроможною трубною компанією серед виробників котельних труб, в тому числі закордонних, за ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207.

Ключові слова: жароміцність, котельні труби, недеформована безперервнолита заготовка, макрокристалічна будова, залишки литої структури, мікроструктура, границя тривалої міцності, тривала пластичність, злам, характер руйнування.

DOI: 10.34185/0543-5749.2019-5-6-67-75

Постановка проблеми. Основними елементами енергетичного обладнання ТЕС (ТЕЦ) є котельні труби різного сортаменту з вуглецевих та легированих марок сталі за ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 «Труби сталеві безшовні для парових котлів та трубопроводів». Оскільки ці труби експлуатують в котлоагрегатах ТЕС (ТЕЦ) в умовах високих температур та тиску впродовж тривалого часу (не менш ніж 100 тис. годин), найбільш важливим їх якісним показником є жароміцність [1 – 4].

Характеристика жароміцності – границя тривалої міцності (за температур в залежності від марки сталі), що нормована ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207, є однією із основних за розрахунками на міцність та допустимий ресурс експлуатації енергетичного обладнання в умовах повзучості [2, 4].

Крім тривалої міцності, велике значення для надійної експлуатації котельних труб має також їх деформаційна здатність в умовах високих температур та тиску, яка характеризується тривалою пластичністю (відносне подовження руйнованих в процесі випробувань на тривалу міцність зразків труб). Хоча ця характеристика не нормована вказаними технічними умовами, низька тривала пластичність металу труб може привести до раптового крихкого їх руйнування при експлуатації [2 – 4].

Структура є одним із основних факторів, що визначають жароміцні властивості металу труб [1 – 4]. Тривала міцність і тривала пластичність є найбільш структурно чутливими характеристиками. На формування структури металу труб впливають хімічний склад, в тому числі хімічна неоднорідність, яка пов'язана з умовами кристалізації сталі, та технології трубного переділу [4].

Випробування на тривалу міцність є довготривалими та виконуються на спеціалізованому обладнанні. Тому виробнику котельних труб

дозволено гарантувати відповідність їх службових властивостей встановленим ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 нормам. Підставою для такої гарантії є позитивні результати контролю технології виробництва та контрольних випробувань на тривалу міцність котельних труб. Відповідно вимогам ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207, ці контрольні процедури періодично виконує ДП «НДТІ», яке є розробником вказаних технічних умов та має спеціалізоване обладнання для жароміцних випробувань.

ДП «НДТІ», здійснюючи авторський нагляд, контролює технологію виготовлення на здатність гарантовано забезпечувати в котельних трубах поточного виробництва характеристики жароміцності у повній відповідності до вимог ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207. Тільки на підставі позитивних результатів контролю технології та контрольних жароміцних випробувань ДП «НДТІ» видає заводам-виробникам Висновки (терміном на 3 роки) на право гарантії ними границь тривалої міцності. При отриманні негативних результатів такого контролю ДП «НДТІ» розробляє і видає заводам рекомендації щодо вдосконалення технології виготовлення котельних труб.

Найбільша доля труб в котлоагрегатах ТЕС (ТЕЦ) – це труби з котельної сталі 20 (до 60 – 80 %, в залежності від потужності котлоагрегатів). Для забезпечення надійної безаварійної роботи цих труб за підвищених температур та високих (надкритичних) тисках на протязі тривалого терміну (не менш ніж 100 тис. годин), вони повинні мати стабільний, регламентований ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 рівень границі тривалої міцності за 100 тис. годин за температур 450 °C та 500 °C.

Останнім часом для виробництва котельних труб зі сталі 20 за ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-

05757883-207 на трубопрокатних агрегатах з безперервним і підігримовим станами та пресових установках поряд з кованої або катаної трубної заготовки, яка виготовляється зі злитка стаціонарного або безперервного розливання з регламентованим коефіцієнтом витягу або уковом, використовують недеформовану безперервнолиту заготовку [5 – 7]. Вказані агрегати дозволяють деформувати метал з високими ступенями деформації без руйнування, що компенсує виключення деформування злитку в трубну заготовку із технологічного циклу виготовлення котельних труб [8, 9].

З введенням в експлуатацію в Україні сучасного електromеталургійного комплексу по виробництву круглої безперервнолитої заготовки (ТОВ «МЗ «ДНПРОСТАЛЬ», м. Дніпро) така можливість з'явилася і для підприємств компанії ІНТЕРПАЙП УКРАЇНА. Потенційним підприємством в Україні, яке має можливість впровадити нову енергозберігаючу технологію виготовлення котельних труб (засобом гарячої прокатки безпосередньо із недеформованої безперервнолитої заготовки виробництва ТОВ «МЗ «ДНПРОСТАЛЬ»), є ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ», яке оснащено трубопрокатним агрегатом з безперервним станом (ТПА 30-102).

Формулювання мети. На підставі результатів досліджень характеристик жароміцності оцінити спроможність нової технології виробництва гарантовано забезпечувати отримання котельних труб високої експлуатаційної надійності широкого сортаменту зі сталі 20 з потрібним рівнем тривалої міцності та деформаційної здатності в умовах тривалого навантаження за високих температур.

Матеріал та методика досліджень. Матеріалом дослідження слугували гарячекатані труби розмірами 114×14 мм и 60×6 мм, які були виготовлені на ТПА 30-102 ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ» з коефіцієнтами витягу (μ) 4,0 і 17,4 відповідно із недеформованої безперервнолитої заготовки сталі 20 однієї плавки діаметром 150 мм виробництва ТОВ «МЗ «ДНПРОСТАЛЬ». Хімічний склад металу дослідних труб повністю відповідав вимогам ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207. Дослідження характеристик жароміцності металу труб розміром 114×14 мм виконували у стані після нормалізації з окремого нагрівання, а труб розміром 60×6 мм – у стані після гарячої прокатки і після нормалізації з окремого нагріву. Вибір стану дослідження металу вказаних вище труб був продиктований відповідністю структури металу труб вимогам ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207.

Випробування на тривалу міцність проводили за температури 450°С (основна робоча температура котельних труб зі сталі 20) за ГОСТ 10145 та інструкцією ДП «НДТІ» № 242-3-18 «Випробування трубної заготовки і труб на тривалу міцність для періодичного контролю технологічних процесів їх виготовлення». Сумарна база жароміцних випробувань труб усіх досліджених розмірів та станів склала ~ 98 тис. годин. Шляхом лінійної екстраполяції логарифмічної залежності часу до руйнування та напруження визначали границю тривалої міцності за 100 тис. годин.

Мікроструктуру до і після випробувань та характер руйнування зразків труб досліджували на світловому (Ахіоvert 200МАТ) і растровому (РЭМ-106и) мікроскопах за 25, 50, 100, 500 и 1000-кратних збільшеннях.

Результати досліджень. Мікроструктура металу труб, які піддавали випробуванням на тривалу міцність, мала характерні особливості, що зв'язані з якістю трубної заготовки, температурно-деформаційними параметрами гарячої прокатки та режимом нормалізації. Недеформована безперервнелита заготовка, яка використовувалась для виготовлення досліджених труб, відрізнялась розвиненою зоною стовпчастих кристалів - несприятливою для отримання однорідної структури металу труб [7, 10 – 12]. Деформування такої заготовки (способом гарячої прокатки на ТПА 30-102) з коефіцієнтами витягу 4,0 та 17,4 не забезпечило повного дроблення вихідних дендритів. Особливо це стосується труб розміром 114×14 мм, що виготовлені с низьким коефіцієнтом витягу ($\mu=4,0$). Виявлені залишки литої структури (у вигляді розірваних і розорієнтованих дендритів) в макроструктурі дослідних труб, які розташовані окремими групами шириною до 20 % товщини стінки (труби розміром 60×6 мм, $\mu = 17,4$) або – по всьому периметру шириною більш ніж 50 % товщини стінки (труби розміром 114×14 мм, $\mu = 4,0$). Макроструктурна неоднорідність металу труб супроводжувалася неоднорідністю мікроструктури, яка була більш значніше, чим менше коефіцієнт витягу, та характеризувалася наявністю відманштеттової структури різного ступеню розвитку [12]. Слід зазначити, що хімічна та структурна неоднорідність металу дослідних труб, яка успадкована від вихідної безперервної заготовки, в повній мірі не усунулась нормалізацією по діючій на ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ» технології, особливо в трубах розміром 114×14 мм, які виготовлені с низьким коефіцієнтом витягу. Для отримання сприятливої, віднос-

но однорідної структури металу котельних гарячекатаних труб широкого сортаменту, що виготовлені із безперервнолитої заготовки, необхідно забезпечити формування в макроструктурі металу цієї заготовки розвиненої зони дрібних рівноосних розорієнтованих кристалів та пригніченої зони стовпчастих кристалів.

Характерні мікроструктури металу труб, які піддавали жароміцним випробуванням, представлені на рисунку 1. Хоча за нормованими показ-

никами (ступінь розвитку відманштеттової структури та смугастості) мікроструктури металу труб розміром 60×6 мм після гарячої прокатки і після нормалізації з окремого нагріву, а труб розміром 114×14 мм тільки після нормалізації з окремого нагріву відповідали вимогам ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207, виявлені особливості мікроструктури металу цих труб [12] вплинули на результати випробувань на тривалу міцність.

Рис. 1. Характерні мікроструктури металу труб розмірами 60×6 мм (а, б) і 114×14 мм (в) після гарячої прокатки (а) та після нормалізації з окремого нагріву (б, в), ×100 (зменшено в 1,3 рази)

Значення границі тривалої міцності за температури 450 °С за 100 тис. годин металу труб усіх досліджених розмірів та станів задовольняли вимогам ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 з урахуванням допустимого 20 %-вого відхилення від норми ($78 \pm 15,6 \text{ Н/мм}^2$) та становили 86 Н/мм^2 і 81 Н/мм^2 – труби розміром 60×6 мм після гарячої прокатки і нормалізації з окремого нагріву відповідно, а також 92 Н/мм^2 – труби розміром 114×14 мм після нормалізації з окремого нагріву. При цьому, значення границі тривалої міцності металу труб розміром 114×14 мм, навіть в стані після нормалізації з окремого нагріву, знаходилося на верхній межі допустимого відхилення від норми.

Метал труби розміром 114×14 мм, на відміну від труб розміром 60×6 мм, характеризувався

невисоким рівнем тривалої пластичності (відносне подовження зруйнованих зразків) і значним розкидом (1,5 – 2,0 рази) значень цієї характеристики в зразках, які випробувані за однаковим рівнем напруги. Деформаційна спроможність в умовах високих температури та напруги металу труб розміром 60×6 мм у двох досліджених станах практично не відрізнялась.

Характер руйнування зразків труб обох типорозмірів та різних станів змішаний, з поступовим збільшенням крихкої складової у міру зниження випробувального навантаження. Злами випробуваних зразків мають переважно ямкову будову різної ступені дисперсності зі слідами зсувної деформації та окремими хрумкими ступінчастими відколами (рис. 2 а, б; 3 а, б; 4 а, б).

Структурні складові в мікроструктурі мета-

лу по місцю руйнування зразків усіх випробуваних труб витягнуті в напрямку прикладеної напруги з нерівномірною течією металу в різних зернах, що більшою мірою проявилось в трубі розміром 60×6 мм у стані після гарячої прокатки та в трубі розміром 114×14 мм (рис. 2 в, г; 3 в, г; 4 в, г). Феритна складова металу зразків труб у більшості фрагментована з формуванням «ячеїстої» (сітчастої) субструктури.

Накопичення пошкоджуваності і подальше зруйнування зразків труб розмірами 606 мм (у двох станах) та 11414 мм в процесі випробувань на тривалу міцність відбувалось за рахунок зародження, росту і злиття пор (руйнування пороутворенням). В мікроструктурі окремих зразків труб обох типорозмірів та різних станів, що випробувані за високим рівнем напруги, виявле-

ні клиновидні порожнечі на стиках 3-х зерен, які обумовлені неоднаковою деформаційною спроможністю нерівномірно розподілених різних структурних складових в металі труб. В металі зразків за усіх випробувальних напруженнях мали місце тріщини по границям зерен по місцю локалізації плівкових неметалевих включень, які були виявлені в металі труб обох розмірів до проведення випробувань (рис. 5).

Дослідження жароміцних властивостей котельних труб зі сталі 20, що виготовленні за принципово новою технологією для ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ», слід продовжувати після удосконалення технології виготовлення вихідної безперервнолітої заготовки на ТОВ «МЗ «ДНПРОСТАЛЬ» та корегування технології термічної обробки труб.

Рис. 2. Рем-фрактограми зламів (а, б) та характерні мікроструктури металу (в, г), зруйнованих в процесі жароміцних випробувань з різним рівнем напруги зразків труби розміром 114×14 мм після нормалізації з окремого нагріву: в, г – ×500 (зменшено в 2 рази)

Рис. 3. Рем-фрактограми зламів (а, б) та характерні мікроструктури металу (в, г), зруйнованих в процесі жароміцних випробувань з різним рівнем напруги зразків труби розміром 606 мм після гарячої прокатки: в, г – ×500 (зменшено у 2 рази)

Рис. 4. Рем-фрактограми зламів (*а, б*) та характерні мікроструктури металу (*в, г*), зруйнованих в процесі жароміцних випробувань з різним рівнем напруги зразків труби розміром 60×6 мм після нормалізації з окремого нагріву: *в, г* – ×500 (зменшено у 2 рази)

Рис. 5. Плівкові виділення неметалевих включень в металі труб розмірами 14×14 мм (*а, б*) та 60×6 мм (*в*): ×500 (зменшено в 1,4 рази)

Висновки. 1. Досліджено рівень тривалої міцності і тривалої пластичності металу гарячекатаних котельних труб зі сталі 20 (після гарячої прокатки і після нормалізації), які виготовлені з різними коефіцієнтами витягу на ТПА 30-102 ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТБЮБ» із безперервнолитої заготовки нового виробника - ТОВ «МЗ «ДНПРОСТАЛЬ».

2. Показаний вплив якості вихідної заготовки (макрокристалічна будова), технології трубного переділу на формування структури металу досліджених котельних труб і відповідно - на їх жароміцність.

Встановлена необхідність введення в нормативну документацію на котельну недеформовану безперервнолиту заготовку вимог до макрокристалічної будови.

3. Встановлена можливість постачання ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТБЮБ» на об'єкти енергетики України котельних гарячекатаних труб обмеженого сортаменту (з коефіцієнтом витягу не менш ніж 17,0) із недеформованої безперервнолитої заготовки сталі 20 виробництва ТОВ «МЗ «ДНПРОСТАЛЬ» без проведення обов'язкової, згідно вимог нормативної документації для таких труб, нормалізації з окремого нагріву.

Бібліографічний перелік

1. Крутасова Е. И. Надежность металла энергетического оборудования. Москва : Энергоиздат, 1981. 240 с.

2. Бугай Н. В., Березина Т. Г., Трунин И. И. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования. Москва : Энергоатомиздат, 1994. 272 с.

3. Куманин В.И. Ковалева Л.А., Алексеев С.В. Долговечность металла в условиях ползучести. М.: Металлургия, 1988. 224 с.

4. Антикайн П. А. Металлы и расчеты на прочность котлов и трубопроводов. Москва : Энергоиздат, 1990. 386 с.

5. Опришко Л. В. Новые энергосберегающие технологии производства труб для теплоэнергетики. *Проблемы энергосбережения, безопасности, экологии в промышленной и коммунальной энергетике*: материалы XIX Международной конференции (12-16 июня 2006 года). - Ялта : Ассоциация теплоэнергетических компаний Украины, 2006. С. 72-74.

6. Опришко Л. В. Перспективы использования недеформированной непрерывнолитой заготовки для производства котельных горячедеформированных труб из углеродистой стали. *Современные тенденции производства сварных и бесшовных труб: технологии и оборудование*:

Международная научно-техническая конференция (18-19 июня 2008 года). Киев : Трубы Украины, 2008. С.101-105.

7. Опришко Л. В., Головняк Т. В., Полтава И. И. Котельные горячекатаные трубы из недеформированной непрерывнолитой заготовки стали 20. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 1. С. 61-66.

8. Онищенко И. И., Куценко П. И., Куценко А. И. Теория непрерывной прокатки. Запорожье : ЗГИА, 1998. 470 с.

9. Чикалов С.Г. Производство бесшовных труб из непрерывнолитой заготовки. Волгоград: Комитет по печати и информации, 1999, 416 с.

10. Опришко Л. В., Перепелица Т. В., Герасименко П. В. Особливості структури та властивостей котельних труб із недеформованої безперервнолитої заготовки вуглецевої сталі. *Металознавство та обробка металів*. 2012. № 4. С.3-9.

11. Структура і властивості котельних труб з безперервнолитої заготовки / Опришко Л. В та ін. *Металознавство та обробка металів*. 2016. № 1. С. 54-59.

12. Опришко Л. В., Головняк Т. В., Полтава И. И. Особенности качественных показателей металла котельных труб, изготовленных из непрерывнолитой заготовки ООО «Днепросталь». *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2019. № 1-2. С. 46-53.

References

1. Krutasova, E. I. (1981). *Nadezhnost metalla energeticheskogo oborudovaniia*. Moskva: Energoizdat.

2. Bugai, N. V. (1994). *Rabotosposobnost i dolgovechnost metalla energeticheskogo oborudovaniia*. Moskva: Energoatomizdat.

3. Kumanin, V. I., Kovaleva, L. A., & Alekseev, S. V. (1988). *Dolgovechnost metalla v usloviakh polzuchesti*. Moskva: Metallurgyia.

4. Antikain, P. A. (1990). *Metally i raschety na prochnost kotlov i truboprovodov*. Moskva: Energoizdat.

5. Opryshko, L. V. (2006). *Novye energosberegaiushchie tekhnologii proizvodstva trub dlia energetiki. Problemy energosberezheniia, bezopasnosti, ekologii v promyshlennoi i kommunalnoi energetike: materialy XIX Mezhdunarodnoi konferentsii (12-16.06.2006, Yalta, Ukraina)*. Yalta: Assotsiatsiia teploenergeticheskikh kompanii Ukrainy, 72-73.

6. Opryshko, L. V. (2008). *Perspektivy ispolzovaniia nedeformirovannoi nepreryvnolitoi zagotovki dlia proizvodstva kotelnykh goryachedeformirovannuh trub iz ugleodistoi stali. Sovremennye ten-*

dentsii proizvodstva svarnykh i besshovnykh trub: tekhnologii i oborudovanie: Mezhdunarodnaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia (18-19.06.2008). Kiev: Truby Ukrainy, 101–105.

7. Opryshko, L. V., Golovniak, T. V., & Poltava, I. I. (2016). Kotelnye goryachekatanye truby iz nedeformirovannoi nepreryvnolitoi zagotovki stali 20. *Metallurgical and Mining Industry*, (1), 60-61.

8. Onishchenko, I. I., Kutsenko, P. I., & Kutsenko, A. I. (1998). *Teoria neprerivnoi prokatki*. Zaporozhie: ZGIA.

9. Chikalov, S. G. (1999). *Proizvodstvo bezshovnykh trub iz nepreryvnolitoi zagotovki*. Volgograd: Press and information committee.

10. Opryshko, L. V., Perepelytsia, T. V. & Gerashimenko, P. V. (2012). Osoblyvosti struktury ta vlastyivostei kotelnykh goryachekatanykh trub iz nedeformovanoi bezperervnolitoi zagotovki vugletsovoi stali. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, (4), 3-9.

11. Opryshko, L. V., Golovniak, T. V., Gerashimenko, P. V. et.al. (2016). Struktura i vlastyivostei kotelnykh trub z bezperervnolitoi zagotovki. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, (1), 54-59.

12. Opryshko, L. V., Golovniak, T. V., & Poltava, I. I. (2019). Osobennosti kachestvennykh pokazatelei metalla kotelnykh trub, izgotovlennykh iz nepreryvnolitoi zagotovki Dniprostal Metallurgical Works LLC. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost*, (1-2), 46-53.

Цель. Исследование способности новой технологии производства (способом горячей прокатки на ТПА 30-102 ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТЬЮБ» непосредственно из недеформированной непрерывнолитой заготовки производства ООО «МЗ «ДНЕПРОСТАЛЬ»») обеспечивать получение котельных труб высокой эксплуатационной надежности широкого сортамента из стали 20.

Методика. Исследование макроструктуры (наличие остатков литой структуры) и микроструктуры металла труб, испытания на длительную прочность, фрактографические и металлографические исследования характера разрушения образцов труб после жаропрочных испытаний.

Результаты. Исследованы характеристики жаропрочности (длительная прочность и длительная пластичность) металла котельных труб в различных состояниях (после горячей прокатки и после нормализации с отдельного нагрева), изготовленных с разными коэффициентами вытяжки на трубопрокатном агрегате с непрерывным станом (ТПА 30-102) ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТЬЮБ» из недеформиро-

ванной непрерывнолитой заготовки стали 20 производства ООО «МЗ «ДНЕПРОСТАЛЬ». Исследованы процессы, который происходят в структуре металла этих труб при высокой температуре в течение длительного нагружения, а также характер разрушения образцов труб при жаропрочных испытаниях. Установлено влияние структурных характеристик и технологических факторов производства трубной заготовки и труб на уровень жаропрочности и поведение металла исследованных труб в условиях длительного нагружения при высокой температуре. Показана необходимость совершенствования технологии производства котельной непрерывнолитой заготовки на ООО «МЗ «ДНЕПРОСТАЛЬ» с целью получения необходимого макрокристаллического строения (с развитой зоной мелких равноосных разориентированных кристаллов и ограниченной зоной столбчатых кристаллов) и нормирования этого показателя металла котельной недеформированной непрерывнолитой заготовки в ТУ У24.1-05757883-216 «Заготовка стальная непрерывнолитая круглая для изготовления котельных труб»

Установлена возможность поставки на объекты энергетики Украины котельных труб из стали 20, изготовленных с коэффициентами вытяжки не менее 17,0 на ТПА 30-102 ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТЬЮБ» из заготовки ООО «МЗ «ДНЕПРОСТАЛЬ», без обязательной, согласно требованиям нормативной документации для таких труб, нормализации с отдельного нагрева.

Научная новизна. Впервые для котельных труб, изготовленных с разными коэффициентами вытяжки на ТПА 30-102 ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТЬЮБ» из недеформированной непрерывнолитой заготовки стали 20 производства ООО «МЗ «ДНЕПРОСТАЛЬ», определен нормированный ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 и являющийся основной характеристикой при расчетах на прочность энергетического оборудования предел длительной прочности при температуре эксплуатации 450 °С за 100 тыс. часов. Исследовано поведение металла этих труб в различных состояниях (после горячей прокатки и после нормализации с отдельного нагрева) в условиях длительного нагружения при высокой температуре.

Практическая ценность. Полученные результаты исследований послужат основой для совершенствования технологии производства котельных недеформированных непрерывнолитых заготовок на ООО «МЗ «ДНЕПРОСТАЛЬ»

и изготовленных из них труб на ООО «ИНТЕРПАЙП НИКО ТБЮБ», что обеспечит получение по новой технологии котельных труб высокой эксплуатационной надежности. Использование заготовки собственного производства позволит корпорации ИНТЕРПАЙП УКРАИНА снизить себестоимость котельных труб и быть конкурентоспособной трубной компанией среди производителей котельных труб, в том числе зарубежных, по ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207.

Ключевые слова: жаропрочность, котельные трубы, недеформированная непрерывнолитая заготовка, макрокристаллическое строение, остатки литой структуры, микроструктура, предел длительной прочности, длительная пластичность, излом, характер разрушения.

Purpose. Investigation of ability of the new process technology to provide manufacture of “20” grade steel boiler tubes of high operational reliability in a wide size range by applying the method of hot rolling at Interpipe Niko Tube LLC TPA 30-1-2 tube rolling unit immediately from non-worked continuously cast billets manufactured by MZ Dniprostal LLC.

Methods. Examination of macrostructure (for a presence of residues of cast structure) and microstructure of the tube metal, conduction of long-term strength test, fractographic and metallographic examination of form of fracture of tube specimens following the tests for high-temperature strength.

Results. Characteristics of high-temperature strength (long-term strength and long-term ductility) in various conditions (hot-rolled and normalized from a single heat) of the boiler tube metal. The tubes were rolled at various elongation coefficients in the Interpipe Niko Tube LLC TPA 30-102 tube-rolling unit incorporating a continuous mill. Non-worked continuously cast billets of “20” grade steel manufactured by MZ Dniprostal LLC were used. The processes taking place in the tube metal structure under long-term loading at high temperatures and the form of fracture of the tube specimens during high-temperature strength tests have been studied. Influence of structural characteristics and technological factors of production of tube billets and tubes on the level of high-temperature strength and behavior of tube metal under long-term loading at high temperatures has been established. A necessity of improvement of

the process of manufacture of continuously cast billets for boiler tubes at MZ Dniprostal LLC with the aim of obtaining required macrocrystalline structure (i.e. with a developed zone of fine equiaxed disoriented crystals and a limited zone of columnar crystals) and norming this indicator of metal of non-worked continuously cast billets in specification TU U24.1-05757883-216:2019 (Round Continuously Cast Steel Billets for Manufacture of Boiler Tubes) has been shown.

A possibility of supplying the power generating facilities of Ukraine with boiler tubes of “20” grade steel manufactured with elongation coefficients of at least 17.0 at Interpipe Niko Tube LLC TPA 30-102 tube rolling unit from billets manufactured by MZ Dniprostal LLC without obligatory normalizing from a separate heat specified in normative documents for such tubes was established.

Originality. Ultimate long-term strength for operation during 100 thousand hours at temperature of 450 °C was determined for the first time for the boiler tubes rolled with various coefficients of elongation at Interpipe Niko Tube TPA 30-102 tube rolling unit from MZ Dniprostal LLC non-worked continuously cast billets of “20” grade steel. This strength is normed in TU 14-3-460:2009/TU U 27.2-05757883-207:2009 and is the main characteristic used when calculating strength of power generating equipment. Behavior of metal of such tubes in various conditions (after hot rolling and normalizing from a separate heat) in conditions of long-term loading at high temperatures has been investigated.

Practical implications. The results obtained in this study will serve as the basis for improving the technology used at MZ Dniprostal LLC in the manufacture of non-worked continuously cast billets further used in rolling boiler tubes at Interpipe Niko Tube LLC. This will ensure production of boiler tubes of high operational reliability due to application of the new technology. Use of domestic billets will allow Interpipe Corporation to reduce costs of production of boiler tubes according to specification TU 14-3-460:2009/TU U 27.2-05757883-207:2009 and be a strong competitor to foreign tube companies.

Key words: high-temperature strength, boiler tubes, non-worked continuously cast billets, macrocrystalline structure, remains of cast structure, microstructure, ultimate long-term strength, long-term ductility, fracture, fracture form.

Рукопис надійшов 21.11.2019