

Особливості якісних показників металу котельних кованих труб

Л. В. Опришко, зав. лабораторії труб і виробів для теплової та атомної енергетики,
Ljudmila.opryshko@gmail.com

Т. В. Головняк, зав. сектором експертних досліджень металопродукції із чорних та кольорових металів і сплавів

Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості імені Я. Ю. Осади, м. Дніпро

Досліджено якісні показники (хімічний склад, мікроструктура, короточасні механічні властивості за кімнатною та підвищеною температур, а також тривала міцність) металу котельних механічно оброблених кованих труб зі сталі 15X1M1Ф діаметрами від 377 мм до 920 мм, що виготовлені ПрАТ «Ново-краматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ) за ТУ3-923-75 зі злитку власного виробництва. Визначені значення нормованою технічними умовами межі тривалої міцності при температурі 560 °С за 100 тисяч годин металу кованих труб зі сталі 15X1M1Ф. Показано, що діюча на заводі технологія не гарантує отримання котельних кованих труб різного сортаменту зі сталі 15X1M1Ф високої експлуатаційної надійності. Встановлено, що відмінною рисою металу котельних кованих труб зі сталі 15X1M1Ф усіх досліджених розмірів є несприятливе співвідношення концентрацій карбідоутворюючих ванадію і вуглецю, що може негативно вплинути на службові характеристики металу вказаних труб. Металографічними дослідженнями встановлено, що діючий на ПрАТ «НКМЗ» режим термічної обробки труб зі сталі 15X1M1Ф не дозволяє отримати стабільну, однорідну структуру металу котельних кованих труб, що забезпечує потрібний рівень тривалої міцності. Вказано, що відсутність в ТУ3-923-75 вимог до структури металу котельних кованих труб зі сталі 15X1M1Ф, а також до режиму їх термічної обробки, не дозволяє гарантовано виготовляти труби високої експлуатаційної надійності.

Вказано на необхідність розробки сучасних технічних умов на котельні ковані труби великого діаметру зі сталі 15X1M1Ф з включенням вимог до мікроструктури та режиму термічної обробки, що забезпечать виробництво труб високої експлуатаційної надійності, які будуть експлуатуватися без руйнування в енергоустаткуванні протягом розрахункового терміну (не менше 100 тисяч годин).

Ключові слова: котельні ковані труби, хімічний склад, механічні властивості, мікроструктура, тривала міцність.

В котлоагрегатах ТЕС, ТЕЦ і АЕС використовують котельні безшовні труби діаметрами 630 мм та 920 мм зі сталі 15X1M1Ф. Потреба в цих трубах невелика, але в даний час підприємствам енергетики України вкрай необхідні котельні труби вказаного марочного і розмірного сортаменту для заміни в діючому енергоустаткуванні труб. Труби діаметрами 630 мм і 920 мм

Технічна інформація

не виробляють на спеціалізованих по виробництву котельних труб заводах України (ТОВ «ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ», ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ») та Росії (ПАТ «ЧТПЗ», АТ «ВТЗ», АТ «ПНТЗ») через відсутність технічної можливості. Ці підприємства виготовляють труби великого діаметру способами гарячої прокатки (на трубопрокатних станах з автоматичним, безперервним, трьохвалковим розкатним і пілігримовим станами) та гарячого пресування на пресових установках за ТУ 14-3-460:2009 / ТУ У 27.2-05757883-207:2009 [1]. Слід зазначити, що із цього переліку підприємств тільки ПАТ «ЧТПЗ» (м. Челябінськ, Росія) виготовляє котельні безшовні труби діаметром понад 426 мм до 540 мм включно. Труби діаметром понад 540 мм можуть виготовляти за зарубіжними стандартами підприємства Західної Європи та Америки: «Valcovny TRUP Chomutov» (м. Хомутов, Чехія) - пілігримовою прокаткою труб діаметром до 660 мм, а також «Düsseldort-Reisholz» Vallurec Group (м. Дюссельдорф, Німеччина) і «Wuinan-Gordon» (м. Хьюстон, США) – гарячим пресуванням труб діаметром до 1500 мм і до 1200 мм відповідно.

У СРСР труби діаметрами 630 мм і 920 мм традиційно виготовляли методами вільного кування або прошивки-витяжки за ТУЗ-923-75 [2]. Ці технічні умови були розроблені в 1975 році для підприємства «Барикади» (м. Волгоград, Росія).

Котельні труби із сталі 15Х1М1Ф експлуатують в котлоагрегатах за жорстких умов (температура пари – до 600 °С, тиск – понад 30 МПа). Однією із найважливіших вимог до матеріалу таких труб є жароміцність [3-5]. Критерій жароміцності – межа тривалої міцності є основною характеристикою за розрахунками на міцність котельного обладнання. Вона нормована для труб зі сталі 15Х1М1Ф для температур 550 °С і 600 °С (за 100 тис. і 200 тис. годин) в ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009 та за температури 560 °С (за 10 тис. годин і 100 тис. годин) в ТУЗ-923-75. Ця службова характеристика структурно чутлива і значною мірою залежить не тільки від хімічного складу, але і від структури металу труб [4 – 7]. Тому в діючій нормативній документації на котельні труби зі сталі 15Х1М1Ф (ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009), які експлуатують за умов критичних та надкритичних параметрів пари встановлено вимоги до мікроструктури металу цих труб та вказані режими їх термічної обробки. До ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009 прикладено шкали здавальних і бракувальних структур розроблені на підставі численних досліджень якісних показників металу котельних труб зі сталі 15Х1М1Ф, в тому числі, характеристик жароміцності.

В ТУЗ-923-75, які не були перероблені через незначну потребу в котельних трубах діаметрами 630 мм і 920 мм, вимоги до мікроструктури металу труб зі сталі 15Х1М1Ф, а також режими їх термічної обробки відсутні. Ці технічні умови за більш ніж 40 років застаріли та не забезпечують гарантованого отримання труб з необхідним рівнем жароміцності. Необхідно розробити сучасні технічні умови на котельні ковані труби великого діаметру і впровадити виробництво котельних труб за цими технічними умовами в Україні.

Технічна інформація

Потенційним виробником котельних механічно оброблених кованих труб в Україні є ПрАТ «НКМЗ», який володіє необхідним обладнанням для повного циклу виготовлення та контролю їх якості.

Для отримання котельних труб високої надійності основні операції технологічного циклу їх виробництва (виплавка і розливання сталі, ковка, термічна обробка) повинні сформувати структуру, що забезпечить не тільки високий рівень, але і стабільність службових властивостей протягом розрахункового терміну їх експлуатації.

Для оцінки здатності, діючій на ПрАТ «НКМЗ» технології, гарантовано забезпечувати отримання котельних труб зі сталі 15X1M1Ф високої експлуатаційної надійності знадобилося проведення досліджень структури і властивостей, у тому числі, характеристик жароміцності металу труб різного сортаменту.

Досліджено виготовлені ПрАТ «НКМЗ» методом вільної ковки і механічно оброблені труби зі сталі 15X1M1Ф розмірами 620x30 мм, 620x40 мм, 920x32 мм і 920x42 мм, а також труби додаткового сортаменту, що традиційно виготовляють пілігримовою прокаткою, розмірами 426x90 мм і 375x75 мм. Труби були термічно оброблені (нормалізація і відпуск) за спеціально розробленими заводом режимами, які відрізнялися від вказаних для котельних труб зі сталі 15X1M1Ф в ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009.

Випробування металу труб вказаного сортаменту на розтяг проводили за кімнатної і підвищеної (400 °С) температур згідно ГОСТ 10006 і ГОСТ 19040 відповідно, а також – на ударний вигин (на зразках з U-образним надрізом) при 20 °С за ГОСТ 9454. Структуру по периметру і товщині стінки труб досліджували при збільшеннях 100, 500 і 1000 крат. Оцінку структури металу труб проводили за шкалами здавальних і бракувальних мікроструктур Додатку В до ТУ 14-3-460:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009.

Випробуванням на тривалу міцність за ГОСТ 10145 піддавали труби розміром 920x32 мм за вказаної в ТУЗ-923-75 температурі – 560 °С. Шляхом лінійної екстраполяції залежності часу до руйнування від напруження в логарифмічних координатах визначали межу тривалої міцності за 100 тис. годин.

Хімічний склад металу труб відповідає сталі марки 15X1M1Ф за ТУЗ-923-75, за винятком труб розміром 920x42 мм, в металі яких вміст вуглецю перевищує нормативні значення (табл. 1). В металі труб розмірами 620x30 мм, 620x40 мм, 920x32 мм і 426x90 мм вміст вуглецю знаходиться на верхній границі норми. Відмінність металу труб усіх досліджених розмірів – це вміст карбідоутворюючих елементів ванадію і молібдену на нижній границі нормативних значень. Для труб усіх досліджених розмірів характерно несприятливе співвідношення концентрацій вуглецю і ванадію ($V/C < 1,6$) для отримання в процесі термічної обробки дисперсних карбідів ванадію, що може негативно позначитися на жароміцності та довговічності металу труб [6, 7].

Виявлені особливості хімічного складу металу труб, а також діючий на ПрАТ «НКМЗ» режим термічної обробки, вплинули на формування структури і властивості металу труб.

Технічна інформація

Таблиця 1

Хімічний склад металу котельних кованих труб зі сталі 15X1M1Ф

Розмір труб, D×S, мм	Масова частка елементів, %									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	S	P
426×90	0,16	0,31	0,43	1,28	0,95	0,22	0,30	0,18	0,002	0,011
920×32	0,16	0,24	0,47	1,23	0,90	0,22	0,30	0,14	0,004	0,012
920×42	0,18	0,22	0,60	1,35	0,94	0,21	0,36	0,17	0,008	0,017
630×30	0,16	0,29	0,68	1,20	1,01	0,23	0,27	17,00	0,005	0,011
630×40	0,16	0,31	0,55	1,27	0,95	0,28	0,27	0,16	0,003	0,011
325×75	0,12	0,25	0,68	1,25	0,90	0,21	0,16	0,16	0,005	0,012
Норма за ТУ 3-923-75	0,10-0,16	0,17-0,37	0,40-0,70	1,10-1,40	0,90-1,10	0,20-0,35	не більше			
							0,40	0,25	0,025	0,025

Механічні властивості за кімнатної температури задовольняли нормам ТУ3-923-75 тільки для металу труб розмірами 620×30 мм, 920×32 мм і 375×75 мм (табл. 2). Відзначено незадовільні значення межі міцності металу труб розмірами 620×40 мм, 920×42 мм та межі плинності металу труб розміром 426×90 мм.

Таблиця 2

Механічні властивості металу котельних кованих труб зі сталі 15X1M1Ф за кімнатної і підвищеної температурах

Розмір труб, D×S, мм	Межа міцності, σ_b , Н/мм ²	Межа плинності, σ_T ($\sigma_{0,2}$), Н/мм ²	Відносне подовження, δ_5 , %	Відносне звуження, Ψ , %	Ударна в'язкість, КСУ, Дж/см ²	Межа плинності при $t=400$ °С σ_T ($\sigma_{0,2}$), Н/мм ²
426×90	506 - 523	278 - 320	24,5 - 28,0	71,0 - 73,5	175, 223, 196	(246), (293)
920×32	526 - 586	345 - 439	26,5 - 24,0	74,0 - 75,0	128, 223, 157	(295), 305
920×42	631 - 718	(407) - 519	23,5 - 20,0	65,5 - 64,0	121, 95, 105	345, 358
630×30	623 - 634	486 - 489	22,0 - 21,0	74,0 - 75,0	215, 221, 198	410, 424
630×40	653 - 670	524 - 515	20,0 - 19,0	71,0 - 70,5	173, 182, 181	416, 419
325×75	566 - 568	438 - 442	20,5 - 20,5	75,0 - 75,0	>182, 207, 198	294, 305
норма ТУ 3-923-75	491-657	не менше				
		314	18,0	50,0	39,2	235

Значення нормованої вказаними технічними умовами межі плинності за температури 400 °С металу труб усіх досліджених розмірів відповідали нормі. При цьому метал труб розмірами 920×42 мм, 620×30 мм і 620×40 мм з високим рівнем міцності та плинності за кімнатної температури відрізнявся

Технічна інформація

також високими значеннями межі плинності і за підвищеної температури: в 1,5-1,8 рази вище норми.

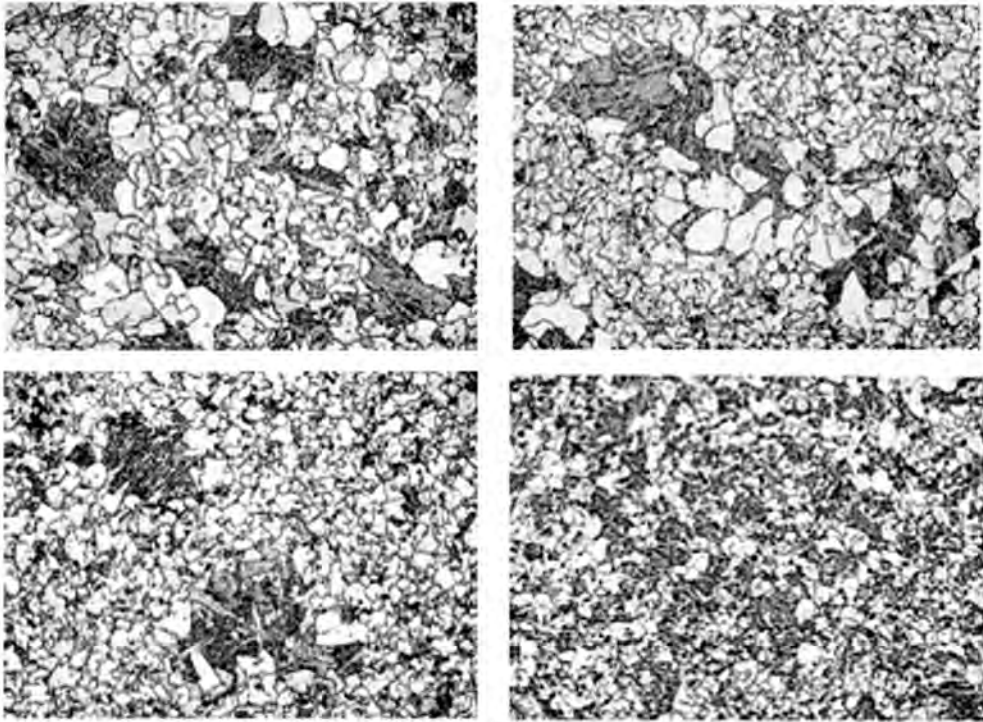
Структура металу по товщині стінки і довжині досліджених труб неоднорідна і відрізняється співвідношенням структурних складових, їх вмістом, дисперсністю (рисунок). Виявлені структурні особливості у певній мірі притаманні трубам усіх досліджених розмірів. В структурі металу труб основною зміцнюючою фазою є карбіди цементитного типу. Дисперсні виділення стабільного карбиду ванадію по границях і всередині зерен практично не спостерігаються (за виключенням зразків окремих труб розміром 630x40 мм), що пояснюється особливостями хімічного складу сталі та фактичним режимом їх термічної обробки на ПрАТ «НКМЗ».

При оцінюванні структур за шкалами Додатку В к ТУ 14-3-460:2009 / ТУ У 27.2-05757883-207:2009 виявлені як задовільні структури (1-5 балу), так і структури (7, 8 і 10 балів), які не відповідають вимогам ТУ 14-3-460:2009 / ТУ У 27.2-05757883-207:2009 на котельні труби зі сталі 15X1M1Ф.

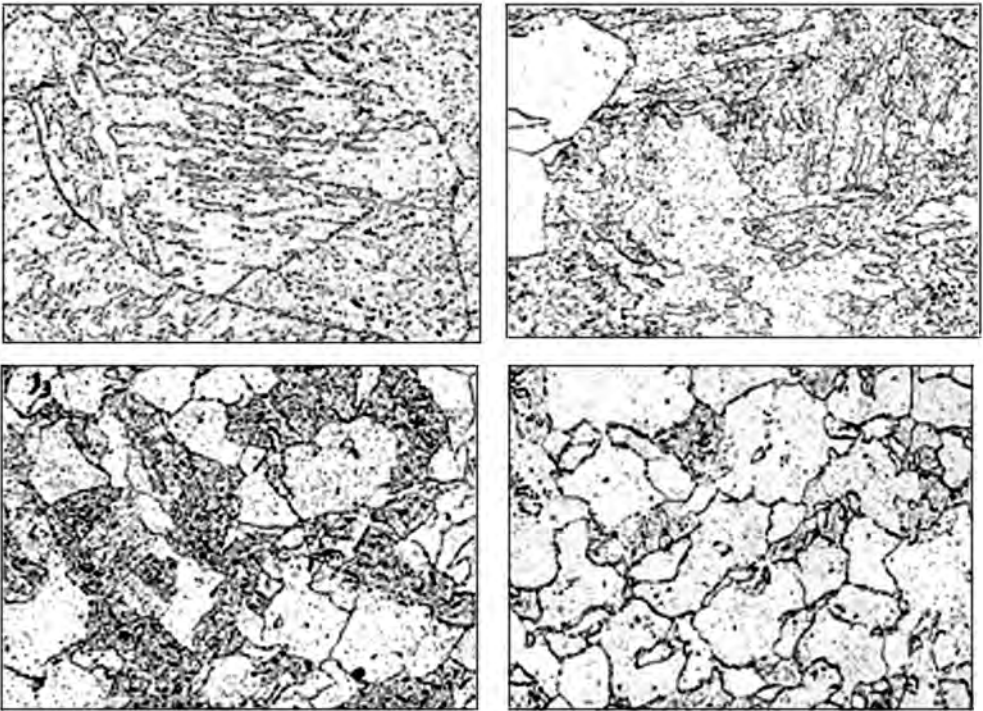
Здавальні структури металу труб склалися з 100 % відпущеного бейніту, переважно голчастої будови (1 бал – труби розмірами 325x75 мм, 630x30 мм, 630x40 мм, 920x32 мм і 920x42 мм), а також – із фериту і від 80 % до 20 % відпущеного бейніту (2 – 5 бали – труби розмірами 630x40 мм, 426x90 мм, 920x32 мм і 920x42 мм). Бракувальні структури металу труб склалися із локальних зерен з орієнтацією по мартенситу або зі 100 % відпущених мартенситу і бейніту (10 бал – труби розмірами 630x30 мм, 630x40 мм, 426x90 мм, 920x32 мм і 920x42 мм). Виявлена також бракувальна структура з елементами перекристалізації (виділення перліту) по границях і всередині зерен - перегрів при відпуску (7, 8 бали – труби розмірами 920x32 мм і 920x42 мм).

При випробуванні на тривалу міцність зразків труби розміром 920x32 мм отримані неоднозначні результати. За однаковими випробувальними напруженнями час до руйнування і значення відносного подовження зразків, що зруйнувалися, значно відрізнялися. Це пояснюється особливостями мікроструктури металу труби, про які було вказано вище. Після проведення металографічного аналізу результати випробувань зразків з незадовільною (згідно вимог ТУ 14-3-460:2009 / ТУ У 27.2-05757883-207:2009) мікроструктурою були виключені із масиву даних для визначення межі тривалої міцності. Значення межі тривалої міцності за 100 тис. годин при температурі 560 °С металу труби розміром 920x32 мм склало 93 Н/мм², що відповідає вимогам ТУЗ-923-75 (обробці піддавали результати випробувань зразків тільки з задовільною згідно вимог ТУ 14-3-460:2009 / ТУ У 27.2-05757883-207:2009 структурою).

Таким чином встановлено необхідність коригування на ПрАТ «НКМЗ» хімічного складу і режимів термічної обробки котельних кованих труб зі сталі 15X1M1Ф для гарантованого отримання необхідного рівня службових характеристик труб різного сортаменту. Вказано на необхідність введення в нормативну документацію на котельні ковані труби зі сталі 15X1M1Ф вимог до мікроструктури, яка безпосередньо впливає на жароміцність металу таких труб. Обґрунтовано необхідність розробки



а



б

Типові структури металу котельних труб зі сталі 15X1M1Ф, а – х100, б – х500.

Технічна інформація

сучасних технічних умов, з урахуванням вимог споживачів, накопичених результатів досліджень котельних кованих труб (в тому числі, характеристик жароміцності), останніх досягнень технологій виробництва та контролю якості, для отримання конкурентоспроможних, високої експлуатаційної надійності, котельних механічно оброблених кованих труб великого діаметру зі сталі 15X1M1Ф.

Література

1. Труби сталеві безшовні для парових котлів та трубопроводів. Технічні умови: ТУ 14-3-460 / ТУ У 27.2-05757883-207. [Діють від 01.10.2009]. Дніпро: ДП "НДТІ", 2009. - 50 с.
2. Трубы котельные бесшовные механически обработанные из конструкционной марки стали. Технические условия: ТУЗ-923. [Действуют от 01.01. 1976]. Волгоград: завод "Баррикады", 1975. - 10 с.
3. Антикайн П.А. Металлы и расчеты на прочность котлов и трубопроводов. - М.: Энергоиздат, 1990. - 386 с.
4. Крутасова Е.И. Надежность металла энергетического оборудования. - М.: Энергоиздат, 1981. - 240 с.
5. Бугай Н.В., Березина Т. Г., Трунин И.И. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования. - М.: Энергоатомиздат, 1994. - 272 с.
6. Куманин В.И., Ковалева Л.А., Алексеев С.В. Долговечность металла в условиях ползучести. - М.: Металлургия, 1988. - 224 с.
7. Ланская К.А. Жаропрочные стали. - М.: Металлургия, 1969. - 247 с.

References

1. TU 14-3-460 / TU U 27.2-05757883-207. Truby stalevi bezshovni dlia parovyh kotliv i tryboprovodiv (Seamless steel pipes for steam boilers and pipelines), Dni pro: DP "NDTI", 2009, 50 p. [in Ukrainian].
2. TUЗ-923. Truby stalnye bezshovnye mehanichieski obrabotannye iz konstrykcionnoi marki stali (Seamless mechanical machined boiler tubes from a structural grade of steel), Volgograd: zavod "Barrikady", 1975, 10 p. [in Russian].
3. Antikain P.A. Metally i raschety na prochnost kotlov i truboprovodov (Metals and strength calculations for boilers and pipelines), Moskva: Energoizdat, 1990, 386 p. [in Russian].
4. Krutasova E. I. Nadozhnost metalla energeticheskogo oborudovania (Reliability of metal of the power equipment), Moskva: Energoizdat, 1981, 240 p. [in Russian].
5. Bugai N.V., Berezina T.G., Trunin I.I. Rabotosposobnost i dolgovechnost energeticheskogo oborudovania (The performance and durability of metal of the power equipment), Moskva: Energoatomizdat, 1994, 272 p. [in Russian].
6. Kumanin V.I., Kovalova L.A., Alekseev S.V. Dolgovechnost metalla v usloviyah polzuchesti (Durability of metal under creep conditions), M.: Metallurgiya, 1988, 224 p. [in Russian].
7. Lanskaia K. A. Zharoprochnost stali (Heat resistant steel), Moskva: Metallurgiya, 1969, 247 p. [in Russian].

Одержано 20.09.19

Л. В. Опрышко, Т. В. Головняк

Особенности качественных показателей металла котельных кованных труб

Резюме

Исследованы качественные показатели (химический состав, микроструктура, механические свойства при комнатной и повышенной температурах, а также длительная прочность) металла котельных механически обработанных кованных труб из стали марки 15X1M1Ф диаметром от 377 мм до 920 мм, изготовленных на ЧАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (г. Краматорск) по ТУЗ-923-75 из слитка собственного производства. Определено фактическое значение нормированного указанными техническими условиями предела длительной прочности при температуре 560 °С за 100 тыс. часов металла кованных труб из стали 15X1M1Ф. Показано, что действующая на заводе технология не гарантирует получение котельных кованных труб различного сортамента из стали 15X1M1Ф высокой эксплуатационной надежности. Отличительной особенностью металла котельных кованных труб из стали 15X1M1Ф всех исследованных размеров является неблагоприятное соотношение содержания карбидообразующего ванадия и углерода, что может негативно сказаться на служебных характеристиках металла труб. Металлографически установлено, что действующий на ЧАО «Новокраматорский машиностроительный завод» режим термической обработки труб из стали 15X1M1Ф не позволяет получить стабильную, однородную структуру металла котельных кованных труб, обеспечивающую требуемый нормативной документацией уровень длительной прочности. Показано, что отсутствие в технических условиях (ТУЗ-923-75) требований к структуре металла труб из стали 15X1M1Ф, а также – к режиму их термической обработки, не позволяет ЧАО «Новокраматорский машиностроительный завод» гарантировано изготавливать трубы высокой эксплуатационной надежности. Показана необходимость разработки взамен не действующих в настоящее время в Украине ТУЗ-923-75 современных национальных технических условий на котельные кованные трубы большого диаметра из стали 15X1M1Ф с включением требований (к микроструктуре и к режиму термической обработки, обеспечивающих производство труб высокой эксплуатационной надежности для условий высоких температур и давлений без разрушений в течение расчетного срока (не менее 100 тыс. часов).

Ключевые слова: котельные кованные трубы, химический состав, механические свойства, микроструктура, длительная прочность

L. V. Opryshko, T. V. Golovnyak

**Peculiarities of qualitative indicators of metal
of the forged boiler tubes**

Summary

Qualitative indicators (chemical composition, microstructure, short-term mechanical properties at room and elevated temperatures, as well as long-term strength) of metal of forged and machined 377 to 920 mm diameter 15Cr1Mo1V steel boiler tubes manufactured by Novokramatorsk Machine-Building Plant JSC, Kramatorsk, according to TU3-923-75 Specification using billets of home production. Actual value of long-term metal strength (100 thousand hours at temperatures of up to 560 °C) standardized by above Specification

Технічна інформація

was determined for the first time for 15Cr1Mo1V steel forged tubes produced by Novokramatorsk Machine-Building Plant JSC. It was shown that the technology existing at the plant does not guarantee obtaining of 15Cr1Mo1V steel forged boiler tubes in various size ranges with high service reliability. It has been established that metal of forged and machined 15Cr1Mo1V steel boiler tubes of all sizes under study features an unfavorable ratio of concentrations of carbide-forming vanadium and carbon. This fact can adversely affect performance characteristics of metal of these tubes. Metallographic examinations have established that the heat treatment conditions applied at Novokramatorsk Machine-Building Plant JSC to the 15Cr1Mo1V steel tubes do not make it possible to obtain a stable and homogeneous metal microstructure in forged boiler tubes that would provide required level of long-term strength required by normative documents. It was shown that absence in TU3-923-75 Specification of requirements to the metal microstructure in 15Cr1Mo1V steel forged boiler tubes and conditions of their heat treatment does not allow Novokramatorsk Machine Building Plant JSC to produce tubes of high service reliability. A need to develop an up-to-date national Specification for 15Cr1Mo1V steel large-diameter forged boiler tubes with inclusion of requirements, foremost requirements to microstructure and heat treatment conditions ensuring high service reliability of the tubes which will be operated without failures in power generating equipment at high temperatures and pressures during the design period (at least 100 thousand hours) instead of TU3-923-75 Specification being of no effect currently in Ukraine was shown.

Keywords: forged boiler tubes, chemical composition, short-term mechanical properties, microstructure, long-term strength

Шановні колеги!

**Триває передплата на науково-технічний журнал
«Металознавство та обробка металів» на 2020 р.**

Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати
вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок

Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.

Вартість одного номера журналу – 50 грн., передплата на рік – 200 грн.

Ціна архівних номерів 1995 – 2018 рр. – 10 грн.

**Розрахунковий рахунок для передплатників,
спонсорів і рекламодавців:**

банк ДКСУ в м. Києві, р/р 31257293112215, код банку 820172

Отримувач – ФТІМС НАН України, код ЄДРПОУ 05417153,

з посиланням на журнал "МОМ".

Копію документа передплати та відомості про передплатника

просимо надсилати до редакції,

вказавши номер і дату платіжного документа.