

УДК 621.774.3+621.182]:669.018.25](477.62)

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.260222.62.634

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ КОТЕЛЬНЫХ КОВАНЫХ ТРУБ ИЗ СТАЛИ 15X1M1Ф ПРОИЗВОДСТВА ЧАО НКМЗ

ОПРЫШКО Л. В.^{1*},
ГОЛОВНЯК Т. В.²

^{1*} Отделение материаловедения, экспертизы и технологий производства труб и изделий из черных и цветных металлов и сплавов, Государственное предприятие «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности имени Я. Е. Осады» (ГП НИТИ), ул. Писаржевского, 1-а, 49000, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 340-38-52, e-mail: liudmila.opryshko@gmail.com

² Сектор экспертных исследований металлопродукции из черных и цветных металлов и сплавов, Государственное предприятие «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт трубной промышленности имени Я. Е. Осады» (ГП НИТИ), ул. Писаржевского, 1-а, 49000, Днепро, Украина

Аннотация. Цель работы: на основе комплексных исследований химического состава, структуры и свойств, в том числе жаропрочности, оценить эксплуатационную надежность металла котельных кованых труб из стали 15X1M1Ф производства ЧАО НКМЗ (г. Краматорск). **Методики.** Используются современные стандарты, методы и методики металлографических исследований, химического анализа, испытаний кратковременных механических и жаропрочных свойств. **Результаты.** Показано, что отличительной особенностью химического состава металла кованых труб из стали 15X1M1Ф производства ЧАО НКМЗ является неблагоприятное (с точки зрения обеспечения высокой жаропрочности и работоспособности) отношение массовой доли ванадия к массовой доле углерода ($V/C < 1,6$). Структура металла характеризуется неоднородностью в соотношении и распределении структурных составляющих по толщине стенки и длине труб всех исследованных размеров. В металле труб, наряду с удовлетворительной микроструктурой, выявлены браковочные структуры, не обеспечивающие требуемый нормативной документацией уровень длительной прочности. Показана необходимость корректировки на ЧАО НКМЗ химического состава и режимов термической обработки котельных кованых труб из стали 15X1M1Ф для гарантированного получения удовлетворительной структуры и требуемого уровня служебных свойств в металле труб широкого сортамента. Установлена необходимость разработки современных технических условий на котельные кованые трубы из стали 15X1M1Ф большого сортамента с включением требований по микроструктуре и режимам термической обработки взамен устаревших и не действующих в настоящее время в Украине ТУЗ-923. **Научная новизна.** Впервые выявлены особенности химического состава и структуры металла кованых труб производства ЧАО НКМЗ из стали 15X1M1Ф различного сортамента и их влияние на длительную прочность. **Практическое значение.** Полученные результаты исследований послужат основой для совершенствования технологии производства котельных труб на ЧАО НКМЗ и позволят обеспечить потребность энергетики Украины в трубах высокой эксплуатационной надежности из стали 15X1M1Ф диаметром 620 мм и более.

Ключевые слова: котельные кованые трубы; химический состав; микроструктура; кратковременные механические свойства; жаропрочность; предел длительной прочности

ЕКСПЛУАТАЦІЙНА НАДІЙНІСТЬ КОТЕЛЬНИХ КОВАНИХ ТРУБ ЗІ СТАЛІ 15X1M1Ф ВИРОБНИЦТВА ПрАТ НКМЗ

ОПРИШКО Л. В.^{1*},
ГОЛОВНЯК Т. В.²

^{1*} Відділення матеріалознавства, експертизи та технологій виробництва труб і виробів із чорних і кольорових металів і сплавів, Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади» (ДП НДПІ), вул. Писаржевського, 1-а, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 340-38-52, e-mail: liudmila.opryshko@gmail.com

² Сектор експертних досліджень металопродукції із чорних і кольорових металів і сплавів, Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади» (ДП НДПІ), вул. Писаржевського, 1-а, 49000, Дніпро, Україна

Анотація. Мета роботи: на підставі комплексних досліджень структури і властивостей, в тому числі жароміцності, оцінити експлуатаційну надійність металу котельних кованих труб зі сталі 15X1M1Ф виробництва ПрАТ НКМЗ (м. Краматорськ). **Результати.** Показано, що відмінна риса хімічного складу металу кованих труб зі сталі 15X1M1Ф виробництва ПрАТ НКМЗ – це несприятливе (з точки зору забезпечення високої жароміцності і працездатності) відношення масової частки ванадію до масової частки вуглецю ($V/C < 1,6$). Структура металу характеризується неоднорідністю у співвідношенні та розподілі структурних складових по товщині і довжині труб усіх досліджених розмірів. У металі труб, поряд із задовільною мікроструктурою, виявлені бракувальні структури, які не забезпечують потрібний нормативною документацією рівень тривалої міцності. Показана необхідність коригування на ПрАТ НКМЗ хімічного складу та режимів термічної обробки котельних кованих труб зі сталі 15X1M1Ф для гарантованого отримання задовільної структури і потрібного рівня службових властивостей в металі труб широкого сортаменту. Встановлено необхідність розроблення сучасних технічних умов на котельні ковані труби великого діаметра зі сталі 15X1M1Ф із включенням вимог до мікроструктури та режимів термічної обробки натомість застарілих і не чинних на даний час в Україні ТУЗ-923. **Наукова новизна.** Вперше виявлено особливості хімічного складу та структури металу кованих труб зі сталі 15X1M1Ф виробництва ПрАТ НКМЗ різного сортаменту та їх вплив на тривалу міцність. **Практичне значення.** Отримані результати досліджень послужать основою для вдосконалення технології виробництва котельних труб на ПрАТ НКМЗ та дозволять забезпечити потребу енергетиків України в трубах високої експлуатаційної надійності зі сталі 15X1M1Ф діаметром 620 мм і більше.

Ключові слова: котельні ковані труби; хімічний склад; мікроструктура; короточасні механічні властивості; жароміцність; межа тривалої міцності

OPERATIONAL RELIABILITY OF FORGED BOILER TUBES OF 15Cr1Mo1V STEEL PRODUCED BY NKMZ PJSC

OPRYSHKO L.V.^{1*}
GOLOVNIAK T.V.²

^{1*} Department of Materials Science, Expertise and Technologies for the Production of Tubes and Products of Ferrous and Non-Ferrous Metals and Alloys, State Enterprise “Ya.Ye. Osada Scientific Research Tube Institute” (SE NITI), 1-a, Pysarzhevskoho St., 49000, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 340-38-52, e-mail: liudmila.opryshko@gmail.com

² Sector of Expert Studies of Metal Products of Ferrous and Non-ferrous Metals and Alloys, Expertise and Technologies for the Production of Tubes and Products of Ferrous and Non-Ferrous Metals and Alloys, State Enterprise “Ya.Ye. Osada Scientific Research Tube Institute” (SE NITI), 1-a, Pysarzhevskoho St., 49000, Dnipro, Ukraine

Abstract. Purpose: To assess operational reliability of metal of forged boiler tubes of 15Cr1MoV steel manufactured by NKMZ PJSC (Kramatorsk) based on comprehensive studies of chemical composition, structure and properties, including high-temperature strength. **Procedures.** Modern methods and procedures of metallographic studies, chemical analysis, tests of short-term mechanical and high-temperature strength properties were used. **Results.** It has been shown that a distinctive feature of metal of forged tubes of 15Cr1MoV steel manufactured by NKMZ PJSC consists in unfavorable (from the point of view of ensuring high-temperature strength and working capacity) ratio of mass fraction of vanadium to mass fraction of carbon ($V/C < 1.6$). Metal structure is characterized by inhomogeneity in a relation to distribution of structural components across the wall thickness and along the length of tubes of all sizes under study. In metal of the tubes studied, along with a satisfactory microstructure, objectionable structures were found, which do not provide the level of long-term strength required by the normative documents. Necessity of adjusting chemical composition and conditions of heat treatment of forged boiler tubes made of 15Cr1MoV steel at NKMZ PJSC to ensure a satisfactory structure and required level of service properties in metal of a wide range of tubes was shown. A need to develop a new specification for forged boiler tubes of 15Cr1MoV steel in a wide product range, including requirements for microstructure and conditions of thermal treatment instead of outdated Technical Specification 923 not applied currently in Ukraine, has been established. **Scientific novelty.** Chemical composition and structure of forged 15Cr1MoV steel tubes produced by NKMZ PJSC in a wide product range and their effect on long-term strength were established for the first time. **Practical value.** The obtained study results will serve as a basis for improving technology of production of boiler tubes at NKMZ PJSC and will make it possible to meet the demand of Ukrainian power engineering industry in 620 mm and more diameter 15Cr1MoV Φ steel tubes having high operational reliability.

Keywords: forged boiler tubes; chemical composition; microstructure; short-term mechanical properties; high-temperature strength; long-term strength

Введение. В котлоагрегатах ТЭС, ТЭЦ и АЭС используют, в основном, котельные горячедеформированные трубы диаметром до 540 мм из углеродистых и легированных марок стали по ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 «Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов» [1]. Их изготавливают на трубных заводах Украины и России способами горячей прокатки (на трубопрокатных станах с автоматическим, непрерывным, трехвалковым раскатным и пилигримовым станами) или горячего прессования (на прессовых установках). В энергетическом оборудовании используют также трубы диаметром от 620 до 920 мм из стали 15X1M1Ф, потребность в которых на протяжении нескольких лет была невелика.

Однако в последнее время предприятия энергетики Украины остро нуждаются в таких трубах ввиду необходимости замены исчерпавших свой расчетный и парковый ресурс труб в действующем энергооборудовании. Из-за отсутствия технической возможности котельные трубы диаметрами 620 мм и более не изготавливают на специализированных по производству котельных горячедеформированных труб заводах Украины и России.

Традиционно трубы диаметром 620...920 мм изготавливали методами свободнойковки или прошивки – вытяжки по ТУЗ-923 «Трубы котельные бесшовные механически обработанные из конструкционной марки стали» [2]. Эти технические условия были специально разработаны еще в 1975 г. для предприятия «Баррикады» (г. Волгоград), имевшего оборудование для изготовления таких труб.

В энергомашиностроении предпринимались также попытки использовать литые механически обработанные трубы из стали 15X1M1Ф диаметром 620 мм и более, изготовленные способами центробежного литья или электрошлакового переплава. Однако из-за особенностей структуры и свойств эти трубы не нашли широкого применения в энергетике [3; 4].

Котельные трубы из стали 15X1M1Ф эксплуатируют в котлоагрегатах ТЭС (ТЭЦ) в достаточно жестких условиях (температура пара до 600 °С, давление – 30 МПа и более). Одним из важнейших требований, предъявляемых к материалу таких труб, является жаропрочность [5–7]. Критерий жаропрочности – предел длительной прочности – является основной характеристикой при расчетах на прочность котельного оборудования и нормирован для труб из стали 15X1M1Ф в ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 (при температурах 550 °С, 600 °С за 100 тыс. и 200 тыс. часов) и в ТУЗ-923 (при температуре 560 °С за 10 тыс. и 100 тыс. часов).

Эта служебная характеристика является структурно чувствительной и в значительной степени зависит не только от химического состава, но и от структурного состояния металла труб (строение, распределение и соотношение фаз, состояние границ и др.) [5–8]. Поэтому в действующей нормативной документации на эксплуатируемые в условиях критических и сверхкритических параметров пара котельные трубы из стали 15X1M1Ф – ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 установлены требования по микроструктуре металла таких труб и указан режим их термической обработки. К этим техническим условиям приложены шкалы сдаточных и браковочных структур, разработанные на основе многочисленных исследований качественных показателей металла котельных труб из стали 15X1M1Ф, в том числе характеристик жаропрочности.

ТУЗ-923 устарели и не обеспечивают в полной мере получение труб с требуемым уровнем жаропрочности: требования к микроструктуре металла труб из стали 15X1M1Ф, а также режимы термической обработки в них отсутствуют. Эти технические условия не были переработаны из-за незначительной потребности в котельных трубах диаметром 620 мм и более.

Для получения котельных кованых труб высокой эксплуатационной надежности основные операции технологического цикла

их производства должны сформировать структуру, обеспечивающую не только высокий уровень, но и стабильность служебных свойств в течение расчетного срока их эксплуатации.

Потенциальным изготовителем котельных механически обработанных кованых труб в Украине является ЧАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (ЧАО НКМЗ), который оснащен всем необходимым оборудованием для полного цикла изготовления таких труб (выплавка стали, ковка, термическая обработка и др.) и контроля их качества, а также имеет небольшой опыт в производстве труб по ТУЗ-923.

Цель работы – на основе комплексных исследований структуры и свойств, в том числе характеристик жаропрочности, оценить способность действующей на ЧАО НКМЗ технологии гарантированно обеспечивать получение котельных кованых труб из стали 15X1M1Ф высокой эксплуатационной надежности.

Материалом исследований послужили изготовленные ЧАО «НКМЗ» методом свободнойковки механически обработанные трубы из стали 15X1M1Ф размерами 620 × 30 мм, 620×40 мм, 920 × 32 мм и 920 × 42 мм, а также трубы размерами 426 × 90 мм и 375 × 75 мм, традиционно изготавливаемые пилигримовой прокаткой. Указанные трубы термически обработаны (нормализация с отпуском) по специально разработанным заводом режимам, отличающимся от указанных для котельных труб из стали 15X1M1Ф в ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207.

В работе проводили испытания труб указанного выше сортамента на растяжение при комнатной и повышенной (400 °С) температурах по (ГОСТ 10006 и ГОСТ 19040 соответственно, а также – на ударный изгиб (на образцах с U-образным надрезом) при 20 °С по ДСТУ EN 10045-1 (ГОСТ 9454). Исследовали микроструктуру металла труб по периметру и толщине стенки труб при 100-, 500- и 1 000-кратных увеличениях. Из-за отсутствия требований по микроструктуре в ТУЗ-923 оценку структуры металла исследованных труб проводили по шкалам сдаточных и браковочных микроструктур Приложения В к ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207.

Испытания на длительную прочность проводили по ГОСТ 10145, в соответствии с требованиями Инструкции ГП НИТИ ТИ № 242-3-18 «Испытания трубной заготовки и труб на длительную прочность для периодического контроля технологических процессов их изготовления. Жаропрочным испытаниям подвергали трубы размером 920×32 мм при указанной в ТУЗ-923 температуре – 560 °С. Путем линейной экстраполяции логарифмической зависимости времени до разрушения от напряжения определяли предел длительной прочности за 100 тыс. часов.

Результаты исследований. По массовой доле химических элементов металл исследованных труб соответствует стали марки 15X1M1Ф по ТУЗ-923, за исключением труб размером 920×42 мм, в металле которых содержание углерода (С) превышает нормативные значения, даже с учетом допустимых предельных отклонений: (0,16 + 0,1) % (табл. 1).

Таблица 1

**Химический состав металла котельных кованых труб из стали 15X1M1Ф /
Chemical composition of metal of forged 15Cr1Mo1V steel boiler tubes**

Размер труб, D×S, мм	Массовая доля элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	S	P
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
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	0,17	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

Окончание таблицы 1										
норма ТУ3-923	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 более			
							0,40	0,25	0,025	0,025

В металле труб размерами 620 × 30 мм, 620 × 40 мм, 920 × 32 мм, и 426 × 90 мм содержание углерода находится на верхнем пределе нормы. Отличительная особенность металла труб всех исследованных размеров – содержание карбидообразующих элементов ванадия (V) и молибдена (Mo) на нижнем пределе нормативных значений. Для труб всех исследованных размеров характерно неблагоприятное ($V/C < 1,6$) соотношение концентраций углерода и ванадия для получения в процессе термической обработки мелкодисперсных стабильных карбидов ванадия, что может

негативно сказываться на жаропрочности и долговечности металла труб [8; 9].

Выявленные особенности химического состава металла труб, наряду с действующим на ЧАО НКМЗ режимом термической обработки, оказали влияние на формирование структуры и свойств металла исследованных труб.

Кратковременные механические свойства при комнатной температуре удовлетворяют нормам ТУ3-923 только металла труб размерами 620 × 30 мм, 920 × 32 мм и 375 × 75 мм (табл. 2).

Таблица 2

Механические свойства при комнатной и повышенной температурах металла котельных кованых труб из стали 15X1M1Ф / Mechanical properties at room and elevated temperatures of metal of forged 15Cr1Mo1V steel boiler tubes

Размер труб, D×S, мм	Предел прочности, σ_b , Н/мм ²	Предел текучести, σ_T ($\sigma_{0,2}$), Н/мм ²	Относит. удлинение, δ_5 , %	Относит. сужение, Ψ , %	Ударная вязкость, КСУ, Дж/см ²	Предел текучести при $t = 400^\circ\text{C}$ 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	63...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 ТУ3-923	491...657	не менее				39,2	235
		314	18,0	50,0			

Отмечены неудовлетворительные значения предела прочности металла труб размерами 620 × 40 мм, 920 × 42 мм и предела текучести металла труб размером 426 × 90 мм. Значения нормированного указанными техническими условиями предела текучести при температуре 400 °С металла труб всех исследованных размеров соответствуют норме, при этом металл труб размерами 920 × 42 мм, 620 × 30 мм и 620 × 40 мм, с высоким уровнем прочностных свойств при комнатной температуре, отличается высокими значениями предела текучести и при повышенной температуре (в 1,5...1,8 раза выше нормы).

Микроструктура металла по толщине стенки и длине исследованных труб, как правило, неоднородная и отличается составом, дисперсностью и соотношением структурных фаз (рис. 1, 2). При выполнении оценки микроструктуры по шкалам Приложения В к ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 выявлены структуры как удовлетворяющие (1...5 баллов), так и не соответствующие (7, 8 и 10 баллов) требованиям ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207 на котельные трубы из стали 15X1M1Ф.

Сдаточные микроструктуры металла труб соответствуют 1 баллу (100 % отпущенного бейнита, преимущественно игольчатого

строения, – трубы размерами 325 × 75, 630 × 30, 630 × 40, 920 × 32 и 920 × 42 мм), а также 2...5 баллам (от 80 до 20 % отпущенного бейнита и феррита – трубы размерами 630 × 40, 426 × 90, 920 × 32 и 920 × 42 мм. Браковочные структуры металла исследованных труб состоят из 100 % отпущенных мартенсита и бейнита или характеризуются наличием локальных зерен с ориентацией по мартенситу (10 баллов – трубы размерами 630 × 30, 630 × 40, 426 × 90, 920 × 32 и 920 × 42 мм).

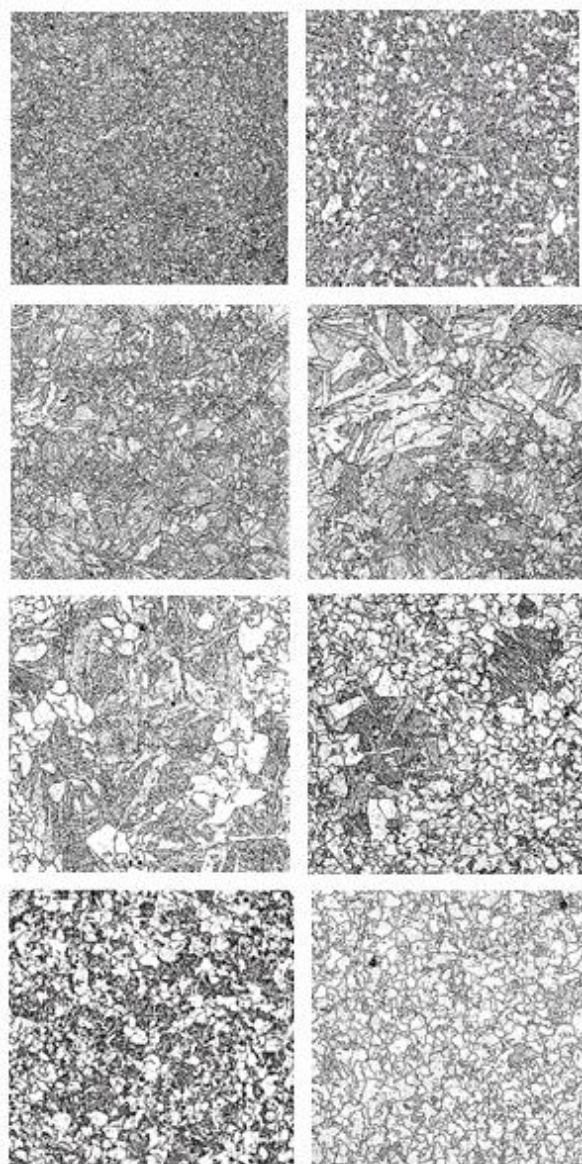


Рис. 1. Характерные микроструктуры металла кованых труб из стали 15X1M1Φ с различным соотношением и строением структурных составляющих, ×100 (уменьшено в 2 раза) / Fig. 1. Typical microstructures of metal of forged 15Cr1Mo1V steel tubes with various ratios and structures of components, ×100 (reduced by 2 times)

Выявлена также браковочная структура с элементами перекристаллизации по границам и внутри зерен – перегрев при отпуске (7, 8 баллов – трубы размерами 920 × 32, 920 × 42 мм).

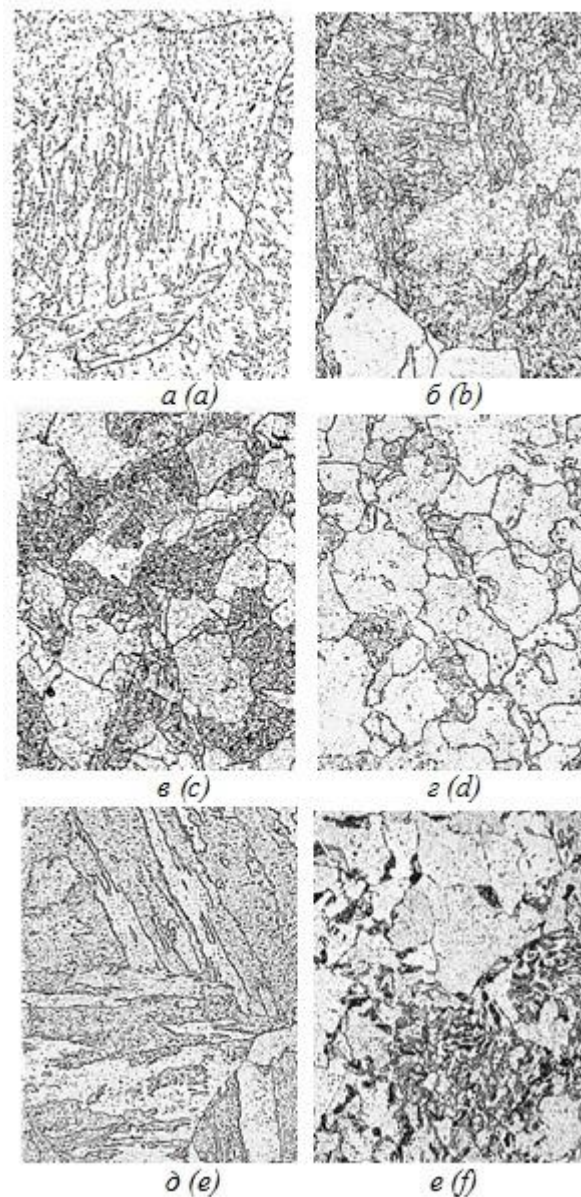


Рис. 2. Удовлетворительные (а, б, в) и браковочные (г, д, е) микроструктуры металла кованых труб из стали 15Cr1Mo1V, ×500 (уменьшено в 2 раза) / Fig. 2. Satisfactory (a, b, c) and objectionable (d, e, f) microstructures of metal of forged 15X1M1Φ steel tubes, ×500 (reduced by 2 times)

Основной упрочняющей фазой в микроструктуре металла исследованных труб являются в основном карбиды цементитного типа. Мелкодисперсные выделения стабильного карбида ванадия по границам и внутри зерен практически не

просматриваются (за исключением микроструктуры металла отдельных труб размером 630 × 40 мм), что объясняется особенностями химического состава и фактическим режимом термической обработки на ЧАО НКМЗ исследованных труб из стали 15X1M1Ф.

При испытании на длительную прочность образцов трубы размером 920 × 32 мм получены неоднозначные результаты. При одних и тех же уровнях испытательной нагрузки значительно отличаются время до разрушения и значения относительного удлинения разрушенных образцов, что объясняется описанными выше особенностями микроструктуры металла трубы размером 920 × 32 мм.

После проведения металлографического анализа результаты испытаний образцов с неудовлетворительной, согласно требованиям ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207, микроструктурой были исключены из массива данных для определения предела длительной прочности. Значение предела длительной прочности за 100 тыс. часов при

температуре 560 °С металла трубы размером 920 × 32 мм составляет 93 Н/мм², что удовлетворяет требованиям ТУЗ-923-75 (обработке подвергали результаты испытаний образцов со сдаточной, согласно требованиям ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207, микроструктурой).

Выводы

1. Установлено, что действующая в настоящее время на ЧАО НКМЗ технология не обеспечивает в полной мере получение котельных кованых труб из стали 15X1M1Ф высокой эксплуатационной надежности с требуемым уровнем служебных свойств.

2. Обоснована необходимость разработки взамен ТУЗ-923 (не действующих в настоящее время в Украине) современных национальных технических условий на котельные кованые трубы большого диаметра из стали 15X1M1Ф с включением требований по микроструктуре, оказывающей существенное влияние на жаропрочность.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ТУ 14-3-460/ТУ У 27.2-05757883-207. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. [Действуют с 01.10.2009]. Днепро : ГП НИТИ, 2009. 50 с. (Технические условия).
2. ТУЗ-923. Трубы котельные бесшовные механически обработанные из конструкционной марки стали. [Действуют с 01.01.1976]. Волгоград : завод «Баррикады», 1975. 10 с. (Технические условия).
3. Злепко В. Ф., Перевезенцева Т. В., Новиков С. В. О некоторых особенностях структурного состояния металла центробежнолитых паропроводных труб из стали 15X1M1Ф. *Электрические станции*. 1991. № 3. С. 12–17.
4. Опрышко Л. В., Головняк Т. В., Маленик А. О., Козьминский А. Н. Особенности структуры и свойств металла труб из стали 15X1M1Ф-Ш, изготовленных методом электрошлаковой выплавки. *Горнорудная и металлургическая промышленность*. 2014. № 2. С. 43–47.
5. Антикайн П. А. Металлы и расчеты на прочность котлов и трубопроводов : монография. Москва: Энергоиздат, 1990. 386 с.
6. Крутасова Е. И. Надежность металла энергетического оборудования : монография. Москва: Энергоиздат, 1981. 240 с.
7. Бугай Н. В., Березина Т. Г., Трунин И. И. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования : монография. Москва : Энергоатомиздат, 1994. 272 с.
8. Куманин В. И., Ковалева Л. А., Алексеев С. В. Долговечность металла в условиях ползучести : монография. Москва : Металлургия, 1988. 224 с.
9. Ланская К. А. Жаропрочные стали : монография. Москва : 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]. Dnipro : SE “SRTI”, 2009, 50 p. (in Ukraine). (Technical Conditions).
2. TUZ-923. *Truby stalnye bezshovnye mehanicheski obrabotannye iz konstruykcionnoi marki stali* [Seamless mechanical machined boiler tubes from a structural grade of steel]. Volhohrad : Plant “Barrikady” Publ., 1975, 10 p. (in Russian). (Technical Conditions).

3. Zlepko V.F., Perevezentseva T.V. and Novikov S.V. *O nekotoryh osobennostiah strukturnogo sostoianiia metalla tsentrobezhnolityh paroprovodnyh trub iz stali 15H1MF* [About some features of the structural state of metal of centrifugally cast steam pipes made of steel 15Cr1Mo1V]. *Elektricheskie stantsii* [Power stations]. Moscow, 1991, no. 3, pp. 12–17. (in Russian).

4. Opryshko L.V., Goloviak T.V., Malenik A.O. and Kozminskii A.N. *Osobennosti struktury i svoist metalla trub iz stali 15H1MF-Sh, izgotovlennyh metodom elektroshlakovoi vyplavki* [Features of the structure and properties of metal pipes made of steel 15Cr1Mo1V-SI, produced by electroslag smelting]. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost* [Metallurgical and Mining Industry]. Dnipro, 2014, no. 2, pp. 43–47. (in Ukraine).

5. Antikain P.A. *Metally i raschety na prochnost kotlov i truboprovodov* [Metals and calculation for the strength of boilers and piping : monograph]. Moscow : Energoizdat Publ., 1990, 386 p. (in Russian).

6. Krutasova E.I. *Nadozhnost metalla energeticheskogo oborudovania* [Reliability of metal power equipment]. Moscow : Energoizdat, 1981, 240 p. (in Russian).

7. Bugai N.V., Berezina T.G. and Trunin I.I. *Rabotosposobnost i dolgovechnost energeticheskogo oborudovania* [Performance and durability of metal power equipment: monograph]. Moscow : Energoatomizdat Publ., 1994, 272 p. (in Russian).

8. Kumanin V.I., Kovaliova V.I. and Alekseev S.V. *Dolgovechnost metalla v usloviyah polzuchesti* [Creep durability] : monograph. Moscow : Metallurgy Publ., 1998, 224 p. (in Russian).

9. Lanskaia K.A. *Zharoprochnost stali* [Heat resistance steel: monograph]. Moscow : Metallurgy Publ., 1969, 247 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 11.02.2020 г.