

УДК 620.179.14

DOI 10.22213/2413-1172-2018-2-4-12

**АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛА  
ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ И ПОВРЕЖДЕННЫХ ГИБОВ  
ВОДООПУСКНЫХ И ПАРООТВОДЯЩИХ ТРУБ ТЭС \***

**А. Н. Смирнов**, доктор технических наук, профессор, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, Кемерово, Россия

**Н. А. Попова**, кандидат технических наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

**Н. В. Абабков**, кандидат технических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, Кемерово, Россия

*Проведено исследование металла эксплуатируемых и поврежденных гибов водооупускных и паропроводящих труб спектрально-акустическим методом контроля и методом электронной микроскопии. В частности, исследованы образцы, не имеющие повреждений, образец с коррозионно-усталостной трещиной и образцы с технологическими дефектами типа заката. Все образцы изготовлены из стали 20, но имеют разную наработку. Изучено структурное состояние образцов, выполнена количественная оценка таких параметров, как плотность дислокаций и величина локальных полей внутренних напряжений. Структура металла гибов паропроводящих и водооупускных труб после наработки и без дефектов состоит из ферритоперлитной смеси. Феррит, занимающий основную часть объема материала, присутствует как нефрагментированный, так и фрагментированный. В металле гибов паропроводящих и водооупускных труб после наработки и с дефектами увеличилась доля дефектного цементита в перлитных зернах, а также доля фрагментированного феррита. Построены графические зависимости акустических характеристик от времени наработки. Установлены значения акустических характеристик, соответствующие дефектному состоянию для металла гибов водооупускных и паропроводящих труб, изготовленных из стали 20. Выполнен расчет комплексного критерия предельного состояния для всех исследованных образцов. В соответствии с расчетом определены образцы, которые могут эксплуатироваться без проведения ремонтно-восстановительных работ и для которых проведение ремонтно-восстановительных работ необходимо.*

**Ключевые слова:** гибы паропроводящих и водооупускных труб, спектрально-акустический метод, электронная микроскопия, плотность дислокаций, внутренние напряжения.

**Введение**

**В** процессе эксплуатации элементов технических устройств опасных производственных объектов (ТУОПО) теплоэнергетической промышленности возникает целый ряд проблем, которые могут привести к техногенным катастрофам и человеческим жертвам.

Для таких элементов теплоэнергетической промышленности, как водооупускные и паропроводящие трубы, которые изготовлены из стали 20, характерным является процесс выделения структурно свободного графита [1] в металле сварных соединений и в основном металле. Наиболее часто данное явление происходит на участках труб с наибольшими напряжениями,

а именно в металле гибов водооупускных и паропроводящих труб. При выполнении требований нормативной документации [2, 3] из-за наличия графита в основном металле труб часто приходится сталкиваться с переваркой всех сварных стыков паропровода или заменой всего паропровода. Эта проблема в настоящее время весьма актуальна и относится к паропроводам среднего давления. Несмотря на исключительную опасность объективно действующих факторов, происходящих в металле этих паропроводов, обязательные работы по их диагностике не всегда проводятся в необходимых объемах.

Поэтому весьма актуальным становится вопрос разработки новых, эффективных технологий, методов и способов оценки работоспо-

собности и восстановления ресурса элементов технических устройств. Для обеспечения безопасной эксплуатации ответственных конструкций, по мнению авторов, более широкое распространение должна найти концепция, основанная на прогнозировании и предупреждении вместо используемой старой концепции «обнаружение и устранение» [4].

Одним из методов контроля состояния металла сварных соединений, основного металла и выявления несплошностей в настоящее время является спектрально-акустический метод. Ранее авторами [5] было установлено, что данный метод контроля является чувствительным методом оценки локальных полей внутренних напряжений и параметров микроструктуры (плотности дислокаций, кривизны-кручения кристаллической решетки и т. д.). Кроме того, акустические характеристики материалов (скорость распространения упругих волн, затухание и дисперсия, акустический импеданс)

имеют связь с механическими свойствами материалов. Это позволяет по акустическим характеристикам материала судить о его механических свойствах. Авторами предложены комплексные критерии степени поврежденности металла в относительных единицах [6].

Таким образом, цель настоящей работы заключается в исследовании металла эксплуатируемых и поврежденных гибов водоопускных и паропроводящих труб спектрально-акустическим методом контроля и методом электронной микроскопии и установлении значений акустических характеристик, соответствующих дефектному состоянию исследованного металла.

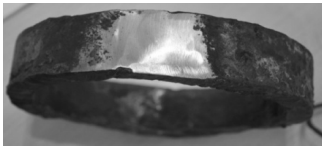
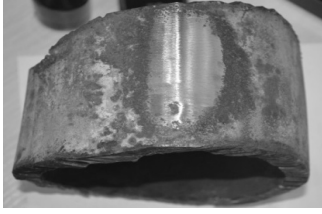
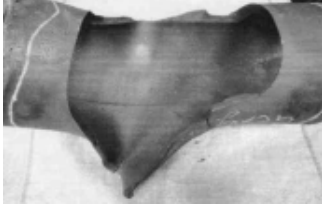
**Методики и материалы исследований**

Объектом исследований являлся металл гибов паропроводящих и водоопускных труб паровых котлов типа ТП-87-1, которые эксплуатируются на Ново-кемеровской ТЭЦ (г. Кемерово) (табл. 1).

Таблица 1. Общие характеристики образцов металла гибов паропроводящих и водоопускных труб

№ образца	Описание образца	Изображение
Гибы паропроводящих труб Ø133×13 фронтального экрана		
Образец № 1	Дефекты отсутствуют. Нароботка 242 тыс. ч	
Образец № 2	Дефект: технологический закат в виде отслоения на наружной поверхности растянутой зоны с протяженностью дефекта $L \approx 20$ мм. Нароботка 242 тыс. ч	
Образец № 3	Дефект: технологический закат на наружной поверхности нейтральной зоны с протяженностью дефекта $L \approx 400$ мм. Нароботка 242 тыс. ч	
Гиб водоопускных труб Ø159×12 фронтального экрана		
Образец № 4	Прямой участок. Дефекты отсутствуют. Нароботка 0 ч	

Окончание табл. 1

№ образца	Описание образца	Изображение
Образец № 5	Прямой участок. Дефекты отсутствуют. Нарботка 219 тыс. ч	
Образец № 6	Растянутая зона. Дефекты отсутствуют. Нарботка 219 тыс. ч	
Образец № 7	Дефект: коррозионно-усталостная трещина, развившаяся по технологической риске на внутренней поверхности нейтральной зоны. Нарботка 219 тыс. ч	

Все исследования методом просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (ПЭМ) выполнены на тонких фольгах с помощью электронного микроскопа ЭМ-125 при ускоряющем напряжении 125 кВ. Рабочее увеличение в колонне микроскопа составляло 25000–50000 крат.

Для определения объемных долей структурных составляющих использован планиметрический метод [7]. Скалярная плотность дислокаций  $\rho$  измерялась методом секущих [8]. Избыточная плотность дислокаций  $\rho_{\pm} = \rho_{+} - \rho_{-}$  ( $\rho_{+}$  и  $\rho_{-}$  – плотность, соответственно, положительно и отрицательно заряженных дислокаций) измерялась локально по градиенту разориентировки (или по кривизне-кручению кристаллической решетки  $\chi$ ) [9–11]. При определении внутренних напряжений было определено два вида напряжений [12]:

1) напряжение сдвига (или «леса» дислокаций) – поля напряжений, создаваемые дислокационной структурой;

2) дальнедействующие напряжения – это моментные (или локальные) напряжения, возникающие в тех местах материала, в которых присутствует избыточная плотность дислокаций ( $\rho_{\pm}$ ), т. е. когда  $\rho_{\pm} = \rho_{+} - \rho_{-} \neq 0$  ( $\rho_{+}$  и  $\rho_{-}$  – плотность, соответственно, положительно и отрицательно заряженных дислокаций).

Исследование металла гибов паропроводящих и водоопускных труб спектрально-акустическим методом проводилось при помощи измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН» с частотой датчика поверхностных акустиче-

ских волн 6 МГц. Были проведены измерения времени задержки ( $R$ , нс) и отношения размахов импульсов поверхностной акустической волны (коэффициент затухания  $K_{\text{зат}} = 1/\text{мкс}$ ), распространяющихся в материале исследуемого объекта. Для этого были подготовлены зоны контроля на поверхности образцов. После этого были сделаны замеры параметров  $R$  и  $K_{\text{зат}}$  с продольным расположением датчика относительно центральной оси гiba.

Коэффициент затухания  $K_{\text{зат}}$  определяется по формуле

$$K_{\text{зат}} = \frac{1}{R} \ln \frac{A_1}{A_2}, \quad (1)$$

где  $A_1$ ,  $A_2$  – амплитуда 1-го и 2-го отраженного импульсов в случае отражений ПАВ;  $R$  – задержка между ними.

#### Результаты исследований и их обсуждение

Химический состав исследуемой стали, соответствующий ГОСТ 1050–88, приведен в табл. 2.

Проведенные исследования показали, что в металле гибов паропроводящих и водоопускных труб после наработки как без дефектов, так и с дефектами матрица стали 20 представляет собой  $\alpha$ -фазу – твердый раствор углерода и легирующих элементов в  $\alpha$ -Fe с ОЦК кристаллической решеткой. Морфологическими составляющими  $\alpha$ -фазы являются пластинчатый перлит и феррит (рис. 1). Объемная доля пластинчатого перлита в металле гибов паропроводящих и водоопускных труб после наработки и без дефектов составляет 25 %, феррита – 75 %.

Таблица 2. Химический состав (масс. %) стали 20

Массовая доля элементов, %							
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P
0,17...0,24	0,17...0,37	0,35...0,65	до 0,25	до 0,3	до 0,3	до 0,04	до 0,035

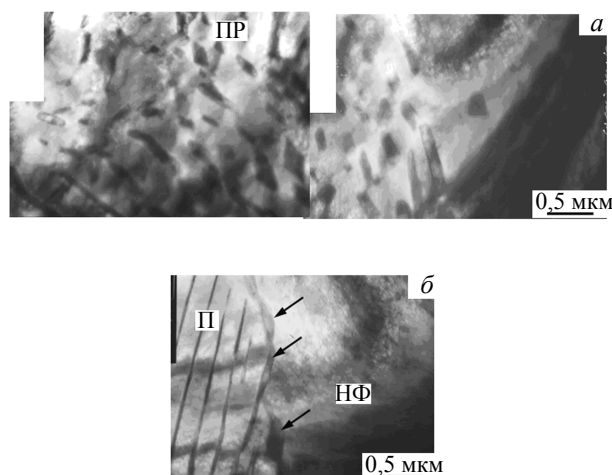


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры металла гибов пароотводящих и водоопускных труб после наработки и без дефектов. Ферритоперлитная смесь: НФ – нефрагментированный феррит, П – пластинчатый неразрушенный перлит, ПР – пластинчатый разрушенный перлит. Стрелками отмечены частицы цементита, расположенные на границе зерен перлит – феррит

Пластинчатый перлит представляет собой конгломерат чередующихся параллельных (или почти параллельных) пластин феррита и цементита (см. рис. 1). Однако, как показали проведенные исследования, в материале встречаются перлитные зерна (или участки перлитных зерен), в которых цементитные пластины оказались дефектными. Это проявляется в виде заметной непрямолинейности пластин в пределах одного перлитного зерна или одной перлитной колонии.

Встречаются в материале ( $\approx 5\%$  объема материала) перлитные зерна с разрушенным перлитом (рис. 1, а). В таких зернах пластины цементита разрушены и представляют собой отдельные различные по размеру осколки. Фактически такая структура является ферритокарбидной смесью, но здесь (и в дальнейшем по тексту) будем называть ее разрушенным перлитом. Объемная доля цементита в разрушенном перлите составляет  $\approx 8\%$  (в неразрушенном перлите объемная доля  $Fe_3C - 12\%$ ).

Дислокационная структура в перлите представлена в основном плотными дислокационными сетками и поляризована, на что указывает наличие в нем изгибных экстинкционных контуров.

Наряду с пластинчатым перлитом присутствует феррит занимающий основную часть объема материала ( $\approx 75\%$ ). Электронно-микроскопическое изображение феррита представлено на

рис. 1, б. Как видно из представленных рисунков, в стали присутствует как нефрагментированный (рис. 1, б), так и фрагментированный (рис. 2) феррит. Объемная доля зерен нефрагментированного феррита составляет  $35\%$ , фрагментированного –  $40\%$ .

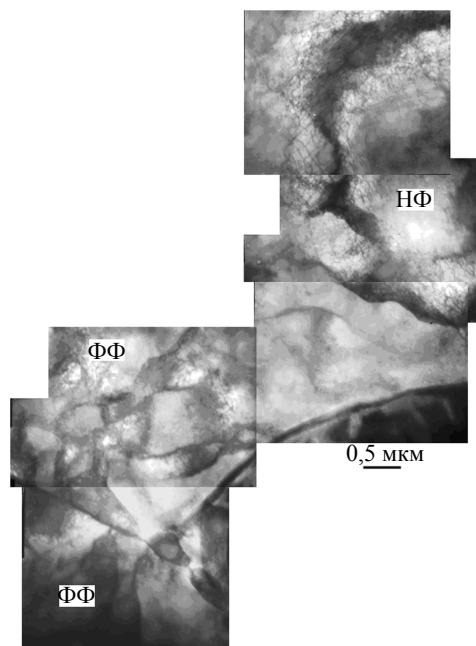


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры металла гибов пароотводящих и водоопускных труб после наработки и без дефектов: зерна фрагментированного (ФФ) и нефрагментированного (НФ) феррита

Известно, что фрагментированная структура – это такая субструктура, которая состоит из дислокационных субграниц (стенок фрагментов) и внутреннего пространства, содержащего или не содержащего дислокации [13, 14]. Известно, что накопление дислокаций влечет за собой фрагментацию материала [15] – образование разориентированных объемов, разделенных границами дислокационного типа. Известно также, что в ОЦК металлах и сплавах формируется фрагментированная субструктура на заключительной стадии активной деформации, предшествующей разрушению [16, 17]. Фрагментированная субструктура является тем типом субструктуры, в которой при определенной степени ее совершенства по границам фрагментов начинают зарождаться и развиваться микротрещины, после слияния которых может образоваться магистральная разрушающая трещина. Совершенствование фрагментированной субструктуры уменьшает пластичность материала, а ее разрушение – увеличивает [18]. В исследуемой стали присутствуют фрагменты как изотропные, т. е.  $L/D \approx 1$ , где  $L$  – продольный,  $D$  – поперечный размер фрагментов, так и анизотропные, т. е.  $L/D > 1$ .

Внутри фрагменты содержат сетчатую дислокационную субструктуру. Дислокационная структура в зернах нефрагментированного феррита также представляет собой плотные дислокационные сетки. Средняя скалярная плотность дислокаций в нефрагментированном феррите составляет величину  $2,57 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Внутри фрагментов величина скалярной плотности дислокаций несколько ниже ( $\rho = 2,20 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ). При сравнении величины  $\rho$  в ферритных зернах с зернами пластинчатого перлита видно, что средняя скалярная плотность дислокаций в феррите выше, чем в ферритных прослойках перлитных зерен.

Дислокационная структура в феррите, как и в перлите, поляризована, о чем свидетельствует наличие в нем изгибных экстинкционных контуров. Проведенные измерения показали, что в феррите кривизна-кручение кристаллической решетки  $\alpha$ -фазы носит, как и в пластинчатом перлите, пластический характер. Средняя амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки, определенная из средней толщины изгибных экстинкционных контуров, в нефрагментированном феррите равна  $\chi = \chi_{\text{пл}} = 370 \text{ см}^{-1}$ , во фрагментированном –  $545 \text{ см}^{-1}$ .

Средняя избыточная плотность дислокаций  $\rho_{\pm}$ , измеренная также из ширины контуров, в нефрагментированном феррите оказалась рав-

ной  $1,48 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , внутри фрагментов феррита ее величина существенно выше:  $\rho_{\pm} = 2,18 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Сравнение величин  $\rho_{\pm}$  с величинами  $\rho$  свидетельствует, что дислокационная структура в нефрагментированном феррите поляризована лишь частично, в то время как внутри фрагментов дислокационная структура поляризована практически полностью. Амплитуда внутренних напряжений в нефрагментированном феррите оказалась равной  $\sigma_{\text{л}} = 320 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\text{д}} = 45 \text{ МПа}$ , во фрагментированном феррите  $\sigma_{\text{л}} = 295 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\text{д}}$  также оказалась равной  $295 \text{ МПа}$ .

Таким образом, металл образцов гибов паропроводящих и водоопускных труб после наработки и без дефектов в среднем по материалу обладает следующими количественными параметрами тонкой структуры:  $\langle \rho \rangle = 2,26 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ,  $\langle \rho_{\pm} \rangle = 1,85 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ,  $\langle \chi \rangle = \langle \chi_{\text{пл}} \rangle = 460 \text{ МПа}$ ,  $\langle \sigma_{\text{л}} \rangle = 365 \text{ МПа}$ ,  $\langle \sigma_{\text{д}} \rangle = \langle \sigma_{\text{д}}^{\text{пл}} \rangle = 270 \text{ МПа}$ , т. е. выполняются условия  $\rho > \rho_{\pm}$ ,  $\chi = \chi_{\text{пл}}$ ,  $\sigma_{\text{л}} > \sigma_{\text{д}}$ . Это означает, что опасность зарождения микротрещин в образцах металла гибов паропроводящих и водоопускных труб без дефектов отсутствует.

В образцах металла гибов паропроводящих и водоопускных труб после наработки и с дефектами деформация привела к изменению всех параметров внутри каждой морфологической составляющей структуры стали. Пластины цементита в перлитных зернах стали более дефектными. Вследствие превращения неразрушенного пластинчатого перлита в разрушенный объемная доля пластинчатого неразрушенного перлита уменьшилась до 10 %, а разрушенного, наоборот, увеличилась до 15 %. Аналогичные изменения произошли и с ферритной составляющей структуры стали. Объемная доля нефрагментированного феррита уменьшилась до 15 %, а фрагментированного – увеличилась до 60 %.

Результаты измерения акустических характеристик (табл. 3) показали, что для образцов №№ 2, 3 и 7, имеющих дефекты, характерны более высокие значения  $R$  и  $K_{\text{зат}}$ , чем для образцов №№ 1, 4, 5, 6. Так как в образцах №№ 1, 4, 5 и 6 нет дефектов, то средние значения  $R$  и  $K_{\text{зат}}$  для этих образцов ниже не имеют и ярко выраженных пиковых значений. Наименьшие значения  $R$  и  $K_{\text{зат}}$  зарегистрированы для образца № 4 (металл без эксплуатации).

По результатам измерений были построены графики распределения  $R$  для гибов паропроводящих и водоопускных труб (рис. 3 и 4).

Для всех исследованных образцов авторами был выполнен расчет комплексного критерия предельного состояния длительно работающе-

го металла (табл. 4) [19], который определяется по формуле

$$K_f = \frac{R_\tau - R_0}{R_f - R_0} \frac{R_f}{R_\tau} \gamma, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – коэффициент, учитывающий материал контролируемого элемента;  $\gamma = 1,0 \dots 1,1$ ;  $R_\tau$  – время задержки ПАВ в металле в момент контроля;  $R_0$  – время задержки ПАВ в металле с исходным состоянием структуры;  $R_f$  – время задержки ПАВ в металле, исчерпавшем свой ресурс работоспособности. Для исследуемой стали  $R_0 = 5136 \pm 4$  нс, а  $R_f = 5218 \pm 4$  нс.

Комплексный критерий предельного состояния, выраженный в относительных единицах, позволяет судить о количественной величине поврежденности и прекращать эксплуатацию ТУОПО для замены контролируемого элемента, исходя из соотношения  $K_f \geq 0,7$ .

Для образца № 1  $K_f = 0,589$ ; для образца № 2  $K_f = 0,85$ ; для образца № 3  $K_f = 0,97$ ; для образца № 4  $K_f = 0$ ; для образца № 5  $K_f = 0,512$ ; для

образца № 6  $K_f = 0,742$ ; для образца № 7  $K_f = 1,08$ .

Таблица 3. Результаты измерения акустических характеристик ( $R, K_{\text{зат}}$ ) в металле гибов пароотводящих и водооупускных труб после наработки без дефектов и с дефектами

№ образца	Среднее значение $R, \text{нс}$	Среднее значение $K_{\text{зат}}, 1/\text{мкс}$
1	5178	0,209
2	5195	0,229
3	5203	0,264
4	5140	0,205
5	5173	0,245
6	5188	0,248
7	5210	0,296

Таким образом, без проведения ремонтно-восстановительных работ могут эксплуатироваться образцы №№ 1, 4 и 5, для образцов №№ 2, 3, 6 и 7 необходимо проведение ремонтно-восстановительных работ.

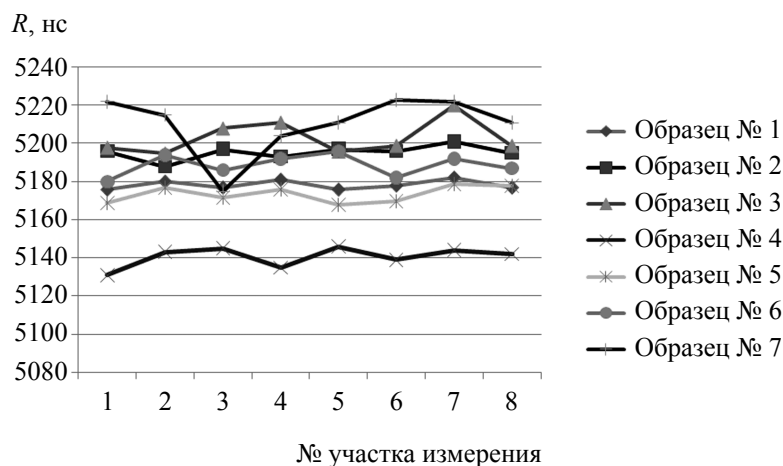


Рис. 3. Распределение времени задержки ПАВ по поверхности образцов гибов пароотводящих и водооупускных труб

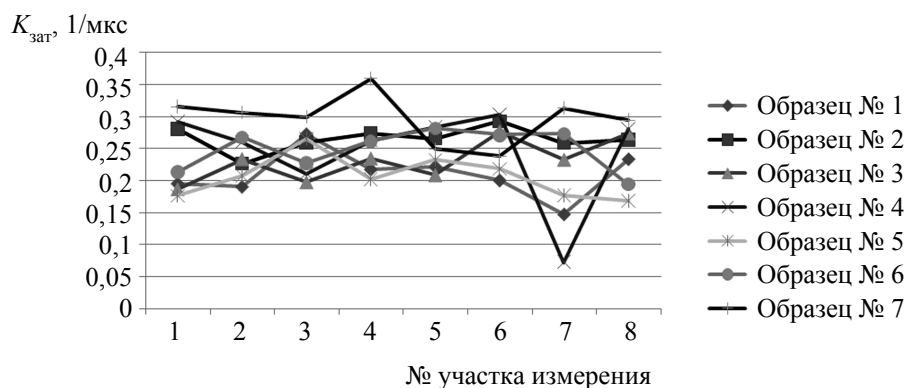


Рис. 4. Распределение значений коэффициента затухания ПАВ по поверхности образцов гибов пароотводящих и водооупускных труб

### Выводы

1. Выполнены исследования образцов металла эксплуатируемых и поврежденных гибов паропроводящих труб с наработкой 214 тыс. часов и 242 тыс. часов спектрально-акустическим методом контроля и методом электронной микроскопии.

2. Изучено структурное состояние образцов, выполнена количественная оценка таких параметров, как плотность дислокаций и величина локальных полей внутренних напряжений. Структура металла гибов паропроводящих и водоопускных труб после наработки и без дефектов состоит из ферритоперлитной смеси. В пластинчатом перлите имеется доля дефектного цементита. Феррит, занимающий основную часть объема материала, присутствует как нефрагментированный, так и фрагментированный. В металле гибов паропроводящих и водоопускных труб после наработки и с дефектами увеличилась доля дефектного цементита в перлитных зернах, а также доля фрагментированного феррита.

3. Результаты измерения акустических показали, что для образцов, имеющих дефекты, характерны более высокие значения  $R$  и  $K_{\text{зат}}$ , чем для образцов без дефектов. Наименьшие значения  $R$  и  $K_{\text{зат}}$  зарегистрированы для образца металла без эксплуатации. Построены графические зависимости акустических характеристик от времени наработки. Установлены значения акустических характеристик, соответствующие дефектному состоянию для металла гибов водоопускных и паропроводящих труб, изготовленных из стали 20.

4. Выполнен расчет комплексного критерия предельного состояния для всех исследованных образцов, в соответствии с которым без проведения ремонтно-восстановительных работ могут эксплуатироваться образцы №№ 1, 4 и 5, а для образцов №№ 2, 3, 6 и 7 необходимо проведение ремонтно-восстановительных работ.

### Библиографические ссылки

1. Шкляр М. И., Осмаков В. Н., Едачев Г. М. Некоторые особенности выделения структурно свободного графита в сварных соединениях паропроводов из углеродистой стали // Теплоэнергетика. 1999. № 5. С. 21–26.
2. РД 34.17.421–92. Типовая инструкция по контролю и продлению срока службы металла основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций.
3. СТО-021-21-21–2003. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов тепловых электрических станций. Контроль состояния металла. Нормы и требования.

4. Смирнов А. Н., Абабков Н. В. Анализ проблем, связанных с безопасной эксплуатацией элементов энергетического машиностроения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2010. № 2. С. 12–17.

5. Структурно-фазовое состояние, поля внутренних напряжений и акустические характеристики в длительно работающем металле поврежденного барабана котла высокого давления / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, Э. В. Козлов [и др.] // Контроль. Диагностика. 2012. № 7. С. 13–17.

6. Смирнов А. Н., Муравьев В. В., Абабков Н. В. Разрушение и диагностика металлов. М.; Кемерово: Инновационное машиностроение. 2016. 479 с.

7. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Металлография, 1970. 376 с.

8. Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хирш [и др.]. М.: Мир, 1968. 574 с.

9. Конева Н. А., Козлов Э. В. Физическая природа стадийности пластической деформации // Структурные уровни пластической деформации и разрушения; под ред. В. Е. Панина. Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1990. С. 123–186.

10. Конева Н. А., Козлов Э. В. Природа субструктурного упрочнения // Изв. вузов. Физика. 1982. № 8. С. 3–14.

11. Конева Н. А., Козлов Э. В. Закономерности субструктурного упрочнения // Изв. вузов. Физика. 1991. № 3. С. 56–70.

12. Дальнедействующие поля напряжений, кривизна-кручение кристаллической решетки и стадии пластической деформации. Методы измерений и результаты / Н. А. Конева, Э. В. Козлов, Л. И. Тришкина [и др.] // Новые методы в физике и механике деформируемого твердого тела. Ч. 1 / под ред. академика В. Е. Панина. Томск: Изд-во ТГУ, 1990. С. 83–93.

13. Козлов Э. В., Попова Н. А., Конева Н. А. Фрагментированная субструктура, формирующаяся в ОЦК-сталях при деформации // Изв. РАН. Серия физическая. 2004. Т. 68, № 10. С. 1419–1427.

14. Смирнов А. Н., Козлов Э. В. Субструктура, внутренние поля напряжений и проблема разрушения паропроводов из стали 12Х1МФ. Кемерово: Кузбассвузиздат, 2004. 163 с.

15. Конева Н. А., Козлов Э. В. Физическая природа стадийности пластической деформации // Изв. вузов. Физика. 1990. № 2. С. 89–106.

16. Рыбин В. В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.

17. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических материалов / В. И. Трефилов, В. Ф. Моисеев, Э. П. Печковский [и др.]. Киев: Наук. думка, 1989. 256 с.

18. Козлов Э. В., Теплякова Л. А., Тришкина Л. И. Субструктура и закономерности развития микротрещин (электронно-микроскопическое исследование) // Прочность и разрушение гетерогенных материалов. Л.: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 1990. С. 3–23.

19. Смирнов А. Н., Хапонен Н. А. Способ неразрушающего контроля степени поврежденности ме-

таллов эксплуатируемых элементов теплоэнергетического оборудования : Патент РФ, № 2231057. 2004.

### References

1. Shklyarov M. I., Osmakov V. N., Yedachev G. M. (1999). *Teploenergetika* [Thermal Engineering], vol. 45, no. 5, pp. 21-26 (in Russ.).
2. *Tipovaya instruktsiya po kontrolyu i prodleniyu sroka sluzhby metalla osnovnykh elementov kotlov, turbin i truboprovodov teplovykh elektrostantsiy, RD 10-577-03* [Typical instructions for controlling and extending the service life of the main elements of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants, RD 10-577-03]. Moscow, *Nauchno-tekhnicheskiy tsentr po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii* (in Russ.).
3. *Osnovnyye elementy kotlov, turbin i truboprovodov teplovykh elektricheskikh stantsiy. Kontrol' sostoyaniya metalla. Normy i trebovaniya, STO 17230282.27.100.005-2008* [The main elements of boilers, turbines and pipelines of thermal power plants. Monitoring the state of metal. Norms and requirements, SRT 17230282.27.100.005-2008]. Moscow, *Vserossiyskiy teplotekhnicheskiy institut* (in Russ.).
4. Smirnov A. N., Ababkov N. V. (2010). *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of KuzSTU], vol. 12, no. 2, pp. 12-17 (in Russ.).
5. Smirnov A. N., Ababkov N. V., Kozlov E. V., Murav'yev V. V. (2012). *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], vol. 15, no. 7, pp. 13-17 (in Russ.).
6. Smirnov A. N., Murav'yev V. V., Ababkov N. V. (2016). *Razrusheniye i diagnostika metallov* [The destruction and diagnostics of metals]. Moscow: *Innovatsionnoye mashinostroyeniye* (in Russ.).
7. Saltykov S. A. (1970). *Stereometricheskaya metallografiya* [Stereometric metallography]. Moscow: *Metallografiya* (in Russ.).
8. Khirsh P., Khovi A., Nikolson R., Peshli D., Uelan M. (1968). *Elektronnaya mikroskopiya tonkikh kristallov* [Electron microscopy of thin crystals]. Moscow: *Mir* (in Russ.).
9. Koneva N. A., Kozlov E. V. (1990). *Fizicheskaya priroda stadiynosti plasticheskoy deformatsii* [Physical nature of the stagedness of plastic deformation]. *Strukturnyye urovni plasticheskoy deformatsii i razrusheniya* [Structural levels of plastic deformation and fracture]. Novosibirsk: *Nauka* (in Russ.).
10. Koneva N. A., Kozlov E. V. (1982). *Izv. vuzov. Fizika* [Russian Physics Journal]. vol. 25, no. 8, pp. 3-14 (in Russ.).
11. Koneva N. A., Kozlov E. V. (1991) *Izv. vuzov. Fizika* [Russian Physics Journal]. vol. 34, no. 3, pp. 56-70 (in Russ.).
12. Koneva N. A., Kozlov E. V., Trishkina L. I., Popova N. A. (1990). *Dal'nodeystvuyushchiye polya napryazheniy, krivizna-krucheniye kristallicheskoy reshetki i stadii plasticheskoy deformatsii. Metody izmereniy i rezul'taty* [Long-range stress fields, curvature-torsion of the crystal lattice and the stage of plastic deformation. Measurement methods and results]. *Novyye metody v fizike i mekhanike deformiruyemogo tverdogo tela. Ch. 1* [New methods in physics and mechanics of a deformable solid. Part 1]. Tomsk: *TGU* (in Russ.).
13. Kozlov E. V., Popova N. A., Koneva N. A. (2004). *Izv. RAN. Seriya fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics], vol. 68, no. 10, pp. 1419-1427 (in Russ.).
14. Smirnov A. N., Kozlov E. V. (2004). *Substruktura, vnutrenniye polya napryazheniy i problema razrusheniya paroprovodov iz stali 12KHIMF* [Substructure, internal stress fields and the problem of destruction of steam pipelines made of Cr-Mo-Va steel]. Kemerovo: *Kuzbassvuzizdat* (in Russ.).
15. Koneva N. A., Kozlov E. V. (1990). *Izv. vuzov. Fizika* [Russian Physics Journal], vol. 33, no. 2, pp. 89-106 (in Russ.).
16. Rybin V. V. (1986). *Bol'shiye plasticheskiye deformatsii i razrusheniye metallov* [Large plastic deformations and destruction of metals]. Moscow: *Metallurgiya* (in Russ.).
17. Trefilov V. I., Moiseyev V. F., Pechkovskiy E. P., Gornaya I. D., Vasil'yev A. D. (1989). *Deformatsionnoye uprochneniye i razrusheniye polikristallicheskikh materialov* [Deformation hardening and destruction of polycrystalline materials]. Kiyev: *Nauk. dumka* (in Russ.).
18. Kozlov E. V., Teplyakova L. A., Trishkina L. I. (1990). *Substruktura i zonomernosti razvitiya mikrotrreshchin (elektronno-mikroskopicheskoye issledovaniye)* [Substructure and regularities of development of microcracks (electron microscope study)]. *Prochnost' i razrusheniye geterogennykh materialov* [Durability and destruction of heterogeneous materials]. Leningrad: *A. F. Ioffe FTI* (in Russ.).
19. Smirnov A. N., Khaponen N. A. Patent RU 2231057, 2004.

### Acoustic Control of Metal of Operated and Damaged Curved Sections of Water and Steam Tubes TPP

A. N. Smirnov, DSc in Engineering, Professor, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

N. A. Popova, PhD in Engineering, Associate Professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Tomsk, Russia

N. V. Ababkov, PhD in Engineering, Associate Professor, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

*Investigation of the metal of operated and damaged bends of water and steam-removing pipes by the spectral-acoustic control method and by the method of electron microscopy was carried out in the work. In particular, a sam-*



*ple without damages, a specimen with a corrosion-fatigue crack and a sample with a technological sunset type defect were investigated. All samples are made of steel 20, but have different operating time. The structural state of the samples is studied; a quantitative evaluation of such parameters as the dislocation density, the values of local fields of internal stresses is performed. The structure of the metal of the bends of the steam-guiding and water-supply pipes after the operating time and without defects consists of a ferrite-pearlite mixture. Ferrite, which occupies the bulk of the volume of material, is present both unfragmented and fragmented. In the metal of the bends of the steam-guiding and water-supply pipes after use and with defects, the proportion of defective cementite in perlite grains, as well as the proportion of fragmented ferrite increased. Graphic dependencies of acoustic characteristics on the time of operation are constructed. The values of the acoustic characteristics corresponding to the defective state for the metal of the bends of the water and steam-removing pipes made of steel 20 have been established. A complex criterion for the limiting state for all the samples studied is calculated. Samples that can be operated without carrying out repair and restoration works, and for which the carrying out of repair and restoration work is necessary, are determined in accordance with the calculation.*

**Keywords:** bending pipes, steam-removing pipes, water pipes, spectral-acoustic method, metal research, electron microscopy, dislocation density, internal stresses.

Получено 20.03.2018