

УДК 621.181

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТРУБ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛОВ С УЧЕТОМ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПУСКО-НАЛАДОЧНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.А. Ташлыков, А.С. Заворин, Р.Н. Фисенко

Томский политехнический университет

E-mail: tashlykov@tpu.ru

*Проблема диагностики зарождения, накопления и развития повреждаемости на микроскопическом и субмикроскопическом уровне становится актуальной, т. к. основной ресурс работы энергетического оборудования реализуется в условиях развития микроструктурно коротких трещин и микроповреждаемости. Это обстоятельство потребовало введения специальных параметров субструктуры, таких как внутренние структурные остаточные напряжения, влияющие на ресурсную стабильность, которые позволяют использовать микроскопические подходы к оценкам внутренних физических структурных резервов металла труб поверхностей нагрева котлов его надежности и долговечности. В настоящей работе показана возможность учета внутренних структурных напряжений при проведении гидроиспытаний как важнейшей контролирующей операции при пуско-наладочных работах в условиях эксплуатации котлов различных типов. Сделан вывод, что используемое на практике давление для проведения гидроиспытаний, рассчитанное по нормативной методике, может приводить к разрушению структурного зерна стальных элементов котлов, работающих под внутренним давлением, и снижению их эксплуатационной надежности.*

### **Ключевые слова:**

*Структурное зерно, внутренние структурные напряжения, хрупкое разрушение, параметры гидроиспытаний, ресурс.*

### **Введение**

Гидроиспытания (опрессовка) как важнейшая контролирующая операция предусматривают увеличение напряжения в трубах больше расчетного значения в предположении, что внутрискруктурные напряжения составляют малозначительную величину и ими можно пренебречь без последствий для сплошности и разупрочнения металла. Несмотря на то, что условия и параметры гидроиспытаний отработаны практикой, критерии успешного проведения этой операции определяются последствиями испытаний на герметичность, на деформируемость и разрушение, а время и температура выдержки при проведении гидроиспытаний ограничиваются начальной стадией ползучести, когда формоизменение не определяется заметными размерными признаками (наружный диаметр труб, толщина стенки).

Разупрочнение стали труб при опрессовке может приобретать скрытый характер и способно проявлять себя в измельчении зерна в процессе структурного трещинообразования и развития микроструктурной пористости, когда остаточная деформация незаметно приобретает необратимые свойства на участке первой стадии ползучести. Образующиеся внутри зерна структурные микротрещины достигают размера зерна и в ходе пластического течения перерастают в микропоры, процесс последующего слияния которых в цепочки приводит в дальнейшем к образованию и развитию видимой магистральной трещины.

### **Требования к гидравлическим испытаниям**

Несмотря на то, что основная цель гидравлических испытаний заключается в проверке плотности и прочности корпусных элементов, трубопроводов, трубных пучков и арматуры котла, проявляемое при нагружении перераспределение схе-

мы действующих напряжений способно привести уровень внутренних структурных напряжений до значения, когда при последующем гидроиспытании возникнут внутризеренные структурные разрушения. По техническим условиям гидравлические испытания проводятся при пробном давлении с выдержкой времени не менее 10 минут. Инспектирование проводится при рабочем давлении, при этом температура металла должна быть не менее 60 °С.

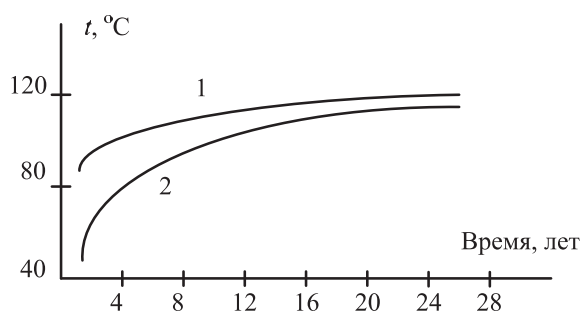
Гидравлические испытания системы циркуляции котла проводятся после каждого его разуплотнения в соответствии с инструкциями по эксплуатации, но не реже одного раза в четыре года. Перед подъемом давления в контуре оборудование и трубопроводы прогреваются до температуры, соответствующей графику зависимости минимально допустимой температуры от времени эксплуатации и превышающей значение критической температуры хрупкости металла при продолжительной эксплуатации.

При гидравлических испытаниях на плотность проводится визуальный осмотр оборудования котла. В случае обнаружения трещин, разрывов, течей, видимых деформаций давление снижается.

При гидравлических испытаниях на прочность давление поднимается насосом гидроопрессовки до пробного значения, затем после 10 минутной выдержки снижается до расчетного и проводится контроль плотности.

Пуск и промывка контура циркуляции осуществляются в условиях подъема температуры котловой воды до величины не более 80 °С со скоростью, не превышающей 10...20 °С/ч, в соответствии с графиком разогрева.

Подъем давления воды в контуре до рабочего значения осуществляется после предварительного прогрева металла до 105...110 °С (рисунок) [1].



**Рисунок.** Зависимость минимально-допустимой температуры разогрева при гидроиспытаниях от времени эксплуатации металла: 1) минимальная допустимая температура, при которой разрешается подъем давления; 2) критическая температура хрупкости металла [1]

В соответствии с действующими правилами гидравлических испытаний металлических сосудов величина пробного давления  $P_{пр}$  определяется [2–4]:

$$P_{пр} = 1,25P \frac{\sigma_{20}}{\sigma_t}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{20}$ ,  $\sigma_t$  – допускаемые напряжения при 20 °С и расчетной температуре.

Время выдержки при гидравлических испытаниях устанавливается в зависимости от толщины стенки – от 10 до 60, но не менее 5 минут.

Трубопроводы, блоки трубопроводов и их детали подвергаются гидравлическим испытаниям  $1,25P$ , МПа, при температуре воды от +5 до +40 °С на время не менее 10 минут, если они предварительно не подвергались неразрушающей дефектоскопии.

Значение пробного давления  $P_{пр}$  паровых и водогрейных котлов принимается в зависимости от рабочего в диапазоне от 0,3 и свыше 0,5 МПа равным  $1,25P$ , а при 0,2...0,5 МПа равным  $1,5P$ .

Испытания проводятся водой при температуре от +5 до +40 °С, которая может быть увеличена по рекомендации научно-исследовательской организации до +80 °С. Время подъема давления должно быть не менее 10 минут с последующей выдержкой под пробным давлением больше 10 минут.

Таким образом, пробные давления и температура воды при проведении гидравлических испытаний используют запасы прочности в 25...50 % без учета релаксации, термоциклирования, структурного трещинообразования и других явлений низко- и высокотемпературной ползучести. Вопросы повреждаемости металла труб и влияния условий гидроиспытаний на ползучесть после проведения теплогидравлических испытаний не обсуждаются из-за отсутствия объективных показателей структурного состояния металла как на этапе обследования, так и после проведения опрессовочных операций, хотя проблема структурного трещинообразования приобретает немаловажное в диагностике значение.

### Расчетные оценки

Несмотря на то, что процесс дальнейшей эксплуатации трубопроводов и котлов сопровождается контролем диаметра труб и замерах толщины стенок при периодическом освидетельствовании Госгортехнадзором [5, 6], структурное состояние металла стенок труб и показатели прочности не подвергаются текущему контролю, а визуально выявленные дефектные трубы заменяются при ремонтах до окончания выработки ресурса металла котла. Хотя заложенные расчетные показатели прочности металла труб предусматривают эксплуатацию в течение 200...300 тыс. часов, практика свидетельствует о значительном снижении ресурса при применяемых толщинах стенок 2,5...5 мм, поэтому и актуальность исследований в этой области не снимается свыше 50 лет.

Принимая за основу энергетический критерий хрупкого разрушения Гриффитса  $G$  (не путать с модулем Гука), усилие, необходимое для продвижения трещины на длину  $l$ , равно:

$$G = \frac{\pi(l \cdot \sigma^2)_{кр}}{E}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина трещины;  $\sigma$  – напряжение;  $E$  – модуль нормальной упругости.

По Гриффитсу, разрушение произойдет тогда, когда при малом удлинении трещины будет выделяться больше упругой энергии, чем это требуется для удельной энергии образования новых поверхностей (поверхностей трещины). Это значит, что поверхностная энергия должна быть меньше освобождающейся упругой энергии, что возможно при достижении трещиной критической длины. Таким образом, величина  $G$  достигнет критического значения, когда критическое значение приобретет произведение  $(l\sigma^2)$  в выражении (2).

Решение Гриффитса о растяжении упругой плоскости с трещиной приводит к выражению для напряжений:

$$\sigma = \frac{K}{\sqrt{\pi l}}, \quad (3)$$

где  $K$  – коэффициент интенсивности напряжений, однозначно связанный с приложенным напряжением и длиной трещины и, по сравнению с  $G$ , удобным тем, что может определяться экспериментально.

Используя (3), определим эффективный диаметр зерна,  $d$ :

$$d = \frac{K^2}{\pi\sigma^2}, \quad (4)$$

разрушение которого возможно под действием напряжения  $\sigma$ .

Согласно данным [7] значение  $K_{1c}$  зерна определяется:

$$K_{1c} = 0,1Ea^{0,5}, \quad (5)$$

где  $a$  – параметр кристаллической решетки.

Выражение (5) позволяет перейти к характеристикам материала – параметру решетки и модулю

нормальной упругости. Тогда критический диаметр зерна с учетом (4) можно оценить по параметру кристаллической решетки ( $a$ ):

$$d_{кр} = 0,01E^2 \frac{a}{\pi\sigma_{\max}^2}. \quad (6)$$

На основании (6) имеем:

$$\sigma = 0,1E\sqrt{\frac{a}{\pi d}}, \quad (7)$$

где  $d$  – средний размер зерна.

С учетом (4)–(7) выражение для вычисления критического давления для гидравлических испытаний трубы имеет вид [8]:

$$P_{опр} = 4\delta \frac{\left(0,1E\sqrt{\frac{a}{\pi d}}\right) - \sigma_{стр}}{d_{нар} + d_{вн}}, \quad (8)$$

где  $d_{нар}$ ,  $d_{вн}$  – наружный и внутренний диаметр трубы,  $\delta$  – толщина стенки трубы,  $\sigma_{стр}$  – внутрискруктурные напряжения.

Величина определяемого по формуле (8) давления должна корректироваться температурой, временем выдержки и структурными параметрами.

В качестве примера можно предложить следующий расчет, основанный на экспериментальном определении внутрискруктурных напряжений, размера зерна и параметра элементарной ячейки для трубной стали 10.

Для трубы из стали 10 диаметром 60 мм и толщиной стенки 3 мм рабочее давление определяется по формуле:

$$P_{раб} = \frac{4\varphi\sigma_{доп}\delta}{d_{нар} + d_{вн}} = \frac{4 \cdot 1 \cdot 100 \cdot 3}{60 + 54} = 10,5 \text{ МПа},$$

где  $\sigma_{доп}=100$  МПа – допускаемое напряжение для данной марки стали при температуре 300 °С.

Необходимое давление для гидравлических испытаний по нормативной методике рассчитывается по выражению (1):

$$P_{раб} = 1,25 \cdot 10,5 \frac{130}{100} = 17,1 \text{ МПа}.$$

С учетом внутрискруктурных напряжений и неравномерности распределения напряжений по длине трубы это давление, при экспериментально измеренных диаметре зерна  $d=1500 \text{ \AA}$  и размере параметра элементарной ячейки  $a=2,8722 \text{ \AA}$  со-

гласно (8), должно соответствовать следующим величинам:

- для  $\sigma_{стр}=100$  МПа –  

$$P_{опр} = 4 \cdot 3 \frac{0,1 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{2,8722}{3,14 \cdot 1500}} - 100}{60 + 54} = 44 \text{ МПа};$$
- для  $\sigma_{стр}=220$  МПа –  $P_{опр}=31$  МПа;
- для  $\sigma_{стр}=300$  МПа –  $P_{опр}=23$  МПа;
- для  $\sigma_{стр}=420$  МПа –  $P_{опр}=10$  МПа.

Таким образом, применяя в расчетах внутрискруктурные напряжения, приходим к выводу, что используемое на практике давление гидроиспытания, равное  $P_{пр}=17,1$  МПа, приведет к разрушению структурного зерна и отбраковке труб с высокими значениями внутренних напряжений порядка 350...400 МПа и выше.

С другой стороны, учитывая существенную неоднородность внутренних структурных напряжений, структурная повреждаемость труб, к которым применены расчетные давления гидроиспытаний, может наступить в процессе эксплуатации при достаточно небольших наработках.

Так, отмечается, что для нескольких трубчатых экономайзеров (типоразмером 32×4 мм) при давлении заводского гидравлического испытания 26,3 МПа количество дефектных труб составило 53. Такой экономайзер был демонтирован в период приработки из-за массовых отказов. При давлении при гидроиспытании 55,7 МПа вышло из строя только 19 труб, а после наработки 4800 часов поврежденных труб не обнаружено [9].

#### Заключение

Таким образом, главная задача при назначении параметров проведения гидравлических испытаний и промывок контуров циркуляции котлов определяется установленной величиной предельной механической нагрузки, исключающей хрупкое разрушение структурного зерна. Поэтому величина пробного давления с учетом внутрискруктурных напряжений при проведении гидравлических испытаний является фактором долговечности и эксплуатационной надежности труб котлов как на этапе входного, так и текущего диагностического контроля.

*Работа поддержана грантом РФФИ «Фундаментальные основы инженерных наук» № 012011598308 (№ 11-08-00782а) в 2011 г.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ташлыков О.Л., Кузнецов А.Г., Арефьев О.Н. Эксплуатация и ремонт ядерных паропроизводящих установок АЭС: 2-х кн. Кн. 2. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 352 с.
2. ПБ 10-573-03. Правила устройства безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 11.06.03. № 90. – 112 с.
3. Беляйкина И.В., Витальев В.П., Громов Н.К. и др. Водяные тепловые сети / под ред. Н.К. Громова, Е.П. Шубина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 376 с.

4. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (ПБ 03-576-03). Серия 03. Выпуск 24. – М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. – 193 с.
5. Лебедев Б.В., Почувев В.Ф. Результаты технического диагностирования парового котла ДКВР-20-13 Томского завода ДСП // Энергетика: экология, надежность, безопасность: матер. докладов IV Всеросс. научно-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 1999. – С. 106–107.

6. Лебедев Б.В., Воронин А.Н., Почуев В.Ф. Результаты технического освидетельствования металлоконструкций котла ТП-230-2 (стан № 6) Северной ТЭЦ // Энергетика: экология, надежность, безопасность: матер. докладов VII Всерос. научно-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – С. 178–179.
7. Кремнев Л.С. Критический коэффициент интенсивности напряжения и вязкость разрушения высокопрочных инструментальных материалов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1996. – № 1. – С. 30–34.
8. Ташлыков А.А., Почуев В.Ф. Рентгенометрическое выявление признаков разупрочнения котельных сталей // Ползуновский вестник. – 2004. – № 1. – С. 168–171.
9. Сотников И.А., Липец А.У., Орехова Н.И. Повышение надежности поверхностей нагрева путем их ужесточенных опрессовок // Надежность котельных поверхностей нагрева и актуальные вопросы теплообмена и гидравлики: сб. тезисов докладов. – Ленинград–Подольск, 1984. – С. 63–65.

Поступила 18.09.2013 г.

UDC 621.181

## PERFORMANCE FORECAST FOR BOILER HEATING SURFACES REGARDING THE INTERNAL STRESSES DURING THE START-UP OPERATIONS

L.L. Lyubimova, A.A. Makeev, A.A. Tashlykov, A.S. Zavorin, R.N. Fisenko

Tomsk Polytechnic University

*The problem of diagnosing the origin, development and accumulation of damage to the microscopic and submicroscopic level becomes relevant, because the main resource of energy equipment is implemented in the development of short microstructure cracks and micro defects. This required the introduction of specific parameters of the substructure, such as internal structural residual stresses affecting the stability of the resource, which allow the use of the microscopic approaches to the assessment of natural internal structural reserves of pipe metal of boiler heating surfaces of its reliability and durability. The paper demonstrates the possibility of considering internal structural stresses during hydraulic testing as a critical controlling operation at start-up operations of various types boilers. It is concluded that pressure used in practice for hydraulic testing calculated by a standard procedure can result in destruction of structural grain of boiler steel members under internal pressure and in reduction of their operational reliability.*

### Key words:

*Structural granule, internal stress, brittle fracture, hydraulic testing parameters, lifetime.*

### REFERENCES

1. Tashlykov O.L., Kuznetsov A.G., Arefyev O.N. *Ekspluatatsiya i remont yadernykh paroproizvodyashchikh ustanovok AES*. (Operation and maintenance of steam supply systems). Moscow, Energoatomizdat, 1995. 2, 352 p.
2. PB 10-573-03. *Pravila ustroystva bezopasnoy ekspluatatsii truboprovodov para i goryachey vody* (The rules of safe operation of steam and hot water line). Uтверждены постановлением Госгортехнадзора России (Approved by the Act of the State Mining and Safety Organization of Russia), 11.06.03, no 90. 112 p.
3. Belyaykina I.V., Vitalev V.P., Gromov N.K. *Vodyanye teplovye seti* (Water-based heating networks). Moscow, Energoatomizdat, 1988. 376 p.
4. *Pravila ustroystva i bezopasnoy ekspluatatsii sudov, rabotayushchih pod davleniem (PB 03-576-03)* (Rules for the design and operation of tanks under pressure (PB 03-576-03)). Ser. 03. Iss. 24. Moscow, Nauchno-tekhnicheskii tsentr po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii, 2003. 193 p.
5. Lebedev B.V., Pochuev V.F. Rezultaty tekhnicheskogo diagnostirovaniya parovogo kotla DKVR-20-13 Tomskogo zavoda DSP (The results of technical diagnosis of the boiler DKVR-20-13 of Tomsk DSP plant). *Energetika: ekologiya, nadezhnost, bezopasnost. Materialy dokladov IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (Power engineering: ecology, reliability, safety. Proc. IV All-Russian scientific and technical conference). Tomsk, 1999. pp. 106–107.
6. Lebedev B.V., Voronin A.N., Pochuev V.F. Rezultaty tekhnicheskogo osvidetelstvovaniya metallokonstruktsiy kotla TP-230-2 (stan № 6) Severskoy TETs (The results of technical certification of metal work of the boiler TP-230-2 (body № 6) of Seversk TPP). *Energetika: ekologiya, nadezhnost, bezopasnost. Materialy dokladov VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* (Power engineering: ecology, reliability, safety. Proc. VII All-Russian scientific and technical conference). Tomsk, 2001. pp. 178–179.
7. Kremnev L.S. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1996. 1, pp. 30–34.
8. Tashlykov A.A., Pochuev V.F. *Polzunovskiy vestnik*, 2004. 1, pp. 168–171.
9. Sotnikov I.A., Lipets A.U., Orekhova N.I. Povyshenie nadezhnosti poverkhnostey nagreva putem ikh uzhestochennykh opressovok (The increase of heating surface reliability by their tightened pressurization). *Nadezhnost kotelnykh poverkhnostey nagreva i aktualnye voprosy teploobmena i gidravliki. Sbornik tezisev dokladov* (Proc. Boiler surface reliability and urgent issues of heat exchange and hydraulics). Leningrad–Podolsk, 1984. pp. 63–65.