

## REFERENCES

1. G a g a r i n, V. G. (2008) Economic Analysis of Heat Protection Improvement Pertaining to Building Enclosure Structures. *Stroitelnye Materialy [Construction materials]*, 8, 41–47.
2. M a t r o s o v, Yu. A., Beliaev, V. S. (2010) Evaluation of Building Energy Consumption. *Zhilishchnoye Stroitelstvo [Housing Construction]*, 8, 5–8.
3. K h r o u s t a l e v, B. M., Nesenчук, A. P., Timoshpol'sky, V. I., Akel'ev, V. D., Sednin, V. A., Kopko, V. M., & Nerez'ko, A. V. (2007) *Heat- and Mass Transfer*. Part 1. Minsk: Belarusian National Technical University.
4. B o g o s l o v s k y, V. N. (1982) *Construction Thermal Physics: Thermal Physics Principles of Heating, Ventilation and Conditioning of Air*. Moscow: Vysshaya Shkola.
5. F o k i n, K. F. (2006) *Construction Heat Technology for Building Enclosure Structures*. Moscow: AVOK-Press.
6. P i l i p e n k o, V. M. (2008) Simulation of Heat Regime in Housing Premises. *Stroitelstvo I Arkhitektura [Construction and Architecture]*, 12, 58–63.
7. T a b u n s h c h i k o v, Yu. A., Brodach, M. M., & Shilkin, N. V. (2003) *Energy-Efficient Buildings*. Moscow: AVOK-Press.
8. V o r o n o v a, N. P. (2009) *Mathematical Simulation and Control Over Technologies of Construction Industry*. Minsk: BNTU.
9. L y k o v, A. V. (1967) *Theory of Heat Conduction*. Moscow: Vysshaya Shkola.
10. A m o s o v, A. A., Dubinsky, Yu. A., & Kopchenova, N. V. (1994) *Calculative Methods for Engineers*. Moscow: Vysshaya Shkola.
11. V o r o n o v a, N. P. (2006) *Mathematical Simulation of Energy Saving Heating, Drying and Thermal Processing Regimes*. Minsk: BNTU.

Представлена кафедрой  
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 05.12.2013

УДК [621.165+621.186.3]:620.172.251.2

### **ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РАБОТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Канд. техн. наук, доц. ГЕРАСИМОВА А. Г.,  
магистры техн. наук КРИКСИНА Е. Н., ГОЛОВЧУК Е. А.**

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: gerasimova\_alinabntu@mail.ru

### **RESIDUAL OPERATIONAL RESOURCE ASSESSMENT OF HIGH TEMPERATURE ELEMENTS OF POWER ENGINEERING EQUIPMENT**

**GERASIMOVA A. G.,  
KRIXINA E. N., GOLOVCHUK E. A.**

*Belarusian National Technical University*

Предложен подход к оценке остаточного ресурса теплоустойчивых сталей, основанный на определении времени выхода пор на границу зерен с учетом рабочей температуры, химического состава и структуры исследуемых сталей.

**Ключевые слова:** теплоустойчивые стали, паропроводы, ползучесть, продление ресурса.

Ил. 4. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

The paper proposes a specific assessment of heat resistant steel residual resource which is based on time determination of pore output on grain boundary with due account of an operational temperature, chemical composition and structure of the investigated steel.

**Keywords:** heat resistant steel, steam lines, creep flow, service life extension.

Fig. 4. Tab. 1. Ref.: 7 titles.

Одну из основных проблем, с точки зрения надежной и безопасной эксплуатации, представляет высокотемпературное оборудование ТЭС, большая часть которого в настоящее время эксплуатируется за пределами паркового ресурса. Наибольшее ограничение ресурса, обусловленное длительным воздействием высокой температуры, характерно для элементов паропроводов и котлов, изготовленных из теплоустойчивых сталей 12Х1МФ и 15Х1М1Ф. Первоначально большинство паропроводов рассчитывали на ресурс  $10^5$  ч при рабочей температуре, но по мере приближения к выработке расчетного ресурса рабочую температуру паропроводов снижали, что позволило продлить их дальнейшую эксплуатацию. В настоящее время почти половина паропроводов, изготовленных из сталей 12Х1МФ и 15Х1М1Ф, эксплуатируются за пределами паркового ресурса, в некоторых случаях наработка паропроводов составляет порядка 250–300 тыс. ч.

Условия финансового и инвестиционного кризиса не позволяют обеспечить массовое замещение изношенного оборудования, поэтому срок службы действующего оборудования стараются продлить в пределах возможной безопасной эксплуатации. В процессе длительного использования на ряде паропроводных труб и их гнутых участках наблюдается явление ползучести. В результате развития ползучести увеличивается диаметр и уменьшается толщина стенок труб. Длительная эксплуатация в условиях ползучести приводит к накоплению в металле повреждений в виде пор и разрыхлений. Как правило, процесс порообразования начинается в конце второй стадии ползучести (рис. 1) [1].

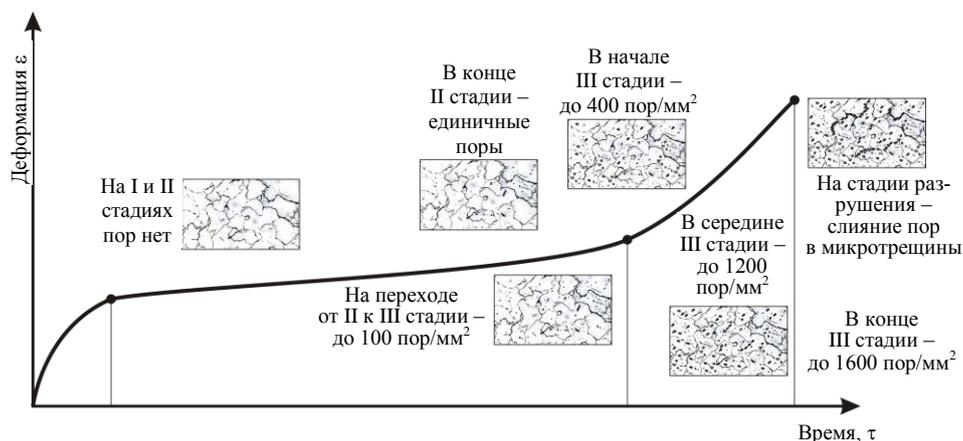


Рис. 1. Порообразование на стадиях ползучести

Установлено, что в результате длительной эксплуатации при температурах 550–570 °С и рабочих напряжениях 40–70 МПа в металле паропроводных труб по границам зерен количество пор достигает  $10^3$ – $10^5$  мм<sup>-2</sup>,

а их размер изменяется от 0,05 до 8,00 мкм. Такое повреждение материала приводит к снижению служебных свойств, а при накоплении микропор, приводящем к снижению плотности материала на 1–2 %, вызывает его разрушение из-за исчерпания запаса длительной прочности [2]. Расчетный срок службы высокотемпературных паропроводов устанавливается исходя из накопления пластической деформации до определенной величины в процессе ползучести и снижения длительной прочности [3].

В соответствии с действующей инструкцией по контролю за металлом паропроводных сталей [4] предусмотрен замер остаточной деформации, которая не должна превышать для: прямых труб из стали 12Х1МФ – 1,5 %, других марок сталей – 1,0 %, гибов из всех сталей – 0,8 %. При отсутствии данных измерений в исходном состоянии оценка годности труб к дальнейшей эксплуатации производится по скорости ползучести, которая для стали 12Х1МФ не должна превышать  $1,5 \cdot 10^{-5}$  %/ч, а для труб из других сталей –  $1,0 \cdot 10^{-5}$  %/ч.

Согласно критериям оценки состояния металла паропроводов, работающих в условиях ползучести [4], количество пор, ориентированных в виде цепочек по границам зерен, не должно превышать пяти штук в одном поле зрения при увеличении 1000 крат. Практика показала, что паропроводы эксплуатируются при разных температурах и напряжениях. При этом в одних случаях определяющим является предел ползучести, в других – предел длительной прочности. Однако во всех вариантах разрушение идет по механизму ползучести – перестройка дислокационной структуры и процесс порообразования. На прямых участках труб определяющим является предел ползучести, на гнутых – предел длительной прочности. Повреждение труб из-за ползучести начинается с наружной поверхности и характеризуется межзеренным растрескиванием [1].

Для предупреждения повреждений и продления ресурса необходимо прогнозировать состояние металла. В настоящее время существует ряд методик прогнозирования состояния металла и оценки остаточного ресурса при ползучести, в соответствии с которыми прогноз и оценка остаточного ресурса осуществляются исходя из положений, что разрушение наступает при:

- сравнении приведенных напряжений, действующих в металле, с пределом длительной прочности;
- исчерпанию допустимой остаточной деформации;
- скорости ползучести выше допустимой;
- определенном количестве микропор по наружной поверхности.

Основными факторами, влияющими на скорость ползучести и процесс порообразования, являются напряжение, температура, химический состав и структура материала. В [5] были получены расчетные зависимости коэффициентов самодиффузии сталей 12Х1МФ и 15Х1М1Ф от температуры и химического состава (рис. 2).

Анализ полученной диаграммы (рис. 2) подтверждает, что температура имеет определяющее значение при высокотемпературной ползучести. Кроме того, видно, что коэффициенты самодиффузии стали 15Х1М1Ф меньше, чем 12Х1МФ, что обусловлено более высоким содержанием хрома и молибдена, которые относятся к тугоплавким металлам. Наличие этих

элементов в составе сплава является одной из причин, обуславливающих снижение коэффициента самодиффузии.

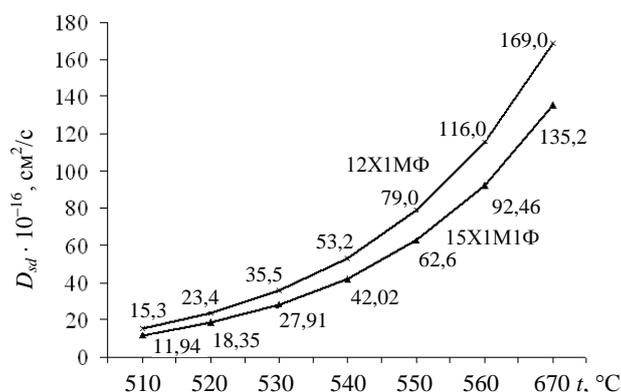


Рис. 2. Расчетные зависимости коэффициентов самодиффузии паропроводных сталей от температуры

Однако стойкость материалов при высокой температуре определяется не только параметрами диффузии, но и структурным состоянием металла или сплава, его субструктурой, величиной зерна и наличием дисперсных выделений вторых фаз. В металловедении есть понятие предельного уровня диффузной подвижности элементов в сплаве. Когда значение диффузной подвижности атомов достигает в сплаве определенной величины, сплав начинает интенсивно разупрочняться под действием температуры. Установлено, что если коэффициент самодиффузии ( $D_{sd}$ ) элементов сплава находится на уровне  $10^{-13}$  или  $10^{-14}$   $\text{cm}^2/\text{c}$ , то сплав оказывает достаточное сопротивление пластической деформации. Если коэффициент самодиффузии выше этих значений, то сплав начинает интенсивно разупрочняться [6].

Из структурных параметров наиболее сильное влияние на скорость высокотемпературной ползучести оказывает размер зерна. По современным представлениям, разрушение в процессе ползучести подготавливается постепенно. Процесс накопления повреждений в металле можно представить в виде суммы двух элементарных процессов: зарождение новых пор и рост уже образовавшихся. Первые поры обычно появляются на границах зерен, расположенных перпендикулярно максимальным нормальным растягивающим напряжениям. По границам зерен скорость диффузии значительно превышает скорость диффузии в теле зерна. Установлено, что коэффициент самодиффузии  $D_{sd}$  по границам зерен обычно на два порядка выше, чем в теле зерна [6]. Следовательно, для исследуемых авторами сталей он составляет порядка  $10^{-14}$   $\text{cm}^2/\text{c}$ . Это связано с меньшими значениями энергии активации  $Q$ , что указывает на ослабление энергии связи атомов по границам по сравнению с телом зерна. По этим границам в дальнейшем происходит наиболее интенсивный рост пор (за счет их слияния и диффузии из тела зерна) и перерастание их в трещины. Поэтому в условиях высоких температур применение крупнозернистых сталей способствует уменьшению протяженности границ зерен и снижению ползучести.

На основании полученной в [5] зависимости  $D_{sd} = f(t)$  можно оценить остаточный ресурс исследуемых сталей с учетом размера зерна. Рассмотрим схему расчета ресурса (рис. 3). Предположим, что время исчерпания ресурса наступает в момент выхода пор на границу зерен, т. е. при  $x = r$  (где  $r$  – средний радиус зерна).

Примем

$$D_{sd} = \frac{x^2}{\tau},$$

откуда

$$x = \sqrt{D_{sd} \tau},$$

где  $x$  – перемещение пор, см;  $\tau$  – время перемещения пор, с.

В соответствии с ГОСТ 20072–74 рекомендуемая номинальная величина зерна должна быть не крупнее 5 баллов. Как правило, применяемые стали имеют размер зерна от 3 до 5 баллов. Сталь с меньшим зерном отличается пониженной жаропрочностью, а с большим – пониженной длительной пластичностью [7]. Размеры зерна по ГОСТ 5639–82 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Условный диаметр зерна, соответствующий эталонам шкалы G (–3) – 14

| Номер зерна G | Средний диаметр зерна d, мм | Средний радиус зерна r, см |
|---------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1             | 0,250                       | 0,01250                    |
| 2             | 0,177                       | 0,00885                    |
| 3             | 0,125                       | 0,00625                    |
| 4             | 0,088                       | 0,00440                    |
| 5             | 0,062                       | 0,00310                    |
| 6             | 0,044                       | 0,00220                    |

**Примечание.** К крупнозернистым сталям принято относить стали с размером зерна до 6 баллов.

С учетом вышесказанного были построены зависимости перемещения пор  $x$  от времени  $\tau$  для стали 12X1МФ при различных температурах (рис. 4).

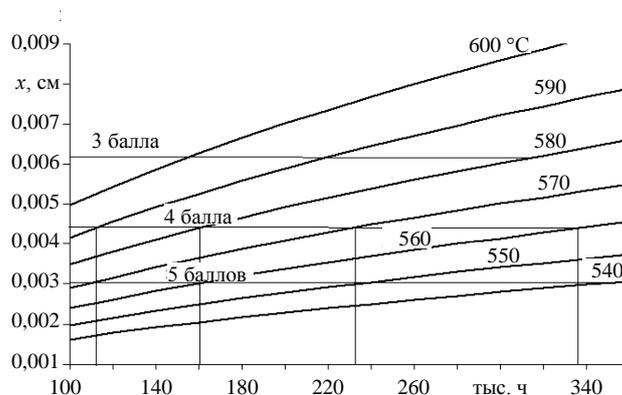


Рис. 4. Зависимость перемещения пор от времени для стали 12X1МФ при различных температурах

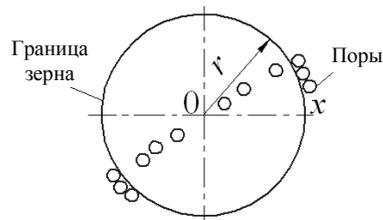


Рис. 3. Схема для расчета ресурса паропроводных сталей в условиях высокотемпературной ползучести

## ВЫВОДЫ

1. Предложен подход к оценке остаточного ресурса теплоустойчивых сталей, основанный на определении времени выхода пор на границу зерен с учетом рабочей температуры, химического состава и структуры исследуемых сталей.

2. Приведенная методика не учитывает напряжения, поэтому может использоваться только для оценки ресурса прямых участков паропроводов при постоянных напряжениях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. П о с о б и е по оценке причин повреждений металла труб, котлов, паропроводов и их сварных соединений. Основные виды изломов поврежденных деталей тепломеханического оборудования / Ю. М. Гофман [и др.]. – Верхняя Пышма: Свердловскэнергоремонт, 1990. – 84 с.
2. К у м а н и н, В. И. Залечивание повреждений в перлитной стали методом ТЦО / В. И. Куманин, Л. А. Ковалева, И. Л. Алейникова // Термоциклическая обработка металлических изделий: материалы конференции. – Л.: Наука, 1982. – С. 78–81.
3. М а т ю н и н, В. М. Металловедение в теплоэнергетике: учеб. пособие для вузов / В. М. Матюнин. – М.: МЭИ, 2008. – 328 с.
4. И н с т р у к ц и я по контролю металла и продлению срока эксплуатации основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций концерна «Белэнерго»: СТП 09110.17.400–03 (РД РБ 09110.17.400–03) / Утв. Концерном «Белэнерго» 19.02.2003; введ. 01.02.03; разработ. БЭРН. – Минск, 2003. – 52 с. – Изменение № 1 к РД РБ 09110.17.400–03. – Минск, 2005. – 52 с.
5. Г е р а с и м о в а, А. Г. Оценка влияния температуры на скорость ползучести высокотемпературных элементов паровых турбин и паропроводов / А. Г. Герасимова, Е. Н. Криксина // Энергетика. – 2011. – № 4. – С. 51–55.
6. Т а й р а, С. Теория высокотемпературной прочности материалов / С. Тайра, Р. Отани; пер. с япон. – М.: Metallurgia, 1986. – 280 с.
7. А н т и к а й н, П. А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. 4-е изд. / П. А. Антикайн. – М.: Энергоиздат, 2001. – 440 с.

## REFERENCES

1. G o f m a n, Yu. M. (1990) *Manual for Assessment of Metal Damage Causes in Pipes, Boilers, Steam Lines and their Welded Joints. Main Types of Fractures in Damaged Parts of Heat Machinery Equipment*. Verkhnyaya Pyshma: Sverdlovskenergorremont.
2. K u m a n i n, V. I., Kovaliova, L. A., & Aleynikova, I. L. (1982) Healing of Damages in Perlite Steel Using Thermal Cyclic Treatment Method. *Thermal Cyclic Treatment of Metal Products. Conference Proceedings*. Leningrad: Nauka, 78–81.
3. M a t i u n i n, V. M. (2008) *Material Science in Heat Engineering*. Moscow: MEI.
4. I n s t r u c t i o n on Metal Control and Extension of Operational Service Life of Main Boiler, Turbine and Pipe Line Elements of “Belenergo” Thermal Power Stations: STP 09110.17.400–03 (RD RB 09110.17.400–03). Minsk, 2005. (In Russian, unpublished).
5. G e r a s i m o v a, A. G., & Krixina, E. N. (2011) Assessment of Temperature Influence on Creep Rate of Turbine and Steam Line High Temperature Elements. *Energetika [Power Engineering]*, 4, 51–55.
6. T a i r a, S., & Otani, R. (1986) *Theory of Material High Temperature Strength*. Moscow: Metallurgia.
7. A n t i k a y n, P. A. (2001) *Metals and Strength Calculation of Boilers and Pipe Lines*. Moscow: Energoizdat.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 04.10.2013