



ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТРЕЩИН НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Сообщение 2. Напряжения в стенке трубы*

С.А. НЕДОСЕКА, А.Я. НЕДОСЕКА

ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В Сообщении 2 рассмотрен характер и величины температурных и остаточных напряжений, возникающих при внезапном приложении высокой температуры к внутренней стенке трубы. Показано влияние динамической составляющей напряжений, вызванной внезапным приложением тепловой нагрузки к внутренней стенке трубы. Установлено, что высокий градиент распределения температуры в направлении радиуса в начальные моменты времени приводит к появлению сжимающих напряжений, превышающих предел текучести материала на внутренней поверхности трубы. Последнее вызывает пластические деформации и, как следствие, остаточные растягивающие напряжения. Образовавшиеся напряжения могут быть достаточными для возникновения трещин, ориентированных вдоль образующей трубы. Библиогр. 5, рис. 5.

Ключевые слова: тепловая нагрузка, температурные и остаточные напряжения, сжимающие напряжения, остаточные растягивающие напряжения

В Сообщении 1 рассмотрен характер температурного поля и величины температур, возникающих при внезапном приложении тепловой нагрузки к внутренней поверхности трубы [1]. В этой части публикации рассмотрим температурные напряжения, вызванные этим полем и последствия его воздействия на материал трубы. Как было показано [1], возникающие трещины распространяются внутрь стенки трубы на небольшую глубину и имеют достаточно большую протяженность вдоль ее образующей (рис. 1).

Фото, представленные на рис. 1, показывают, что сеть трещин является достаточно густой, что свидетельствует о наличии равномерного поля растягивающих напряжений в области образования этих трещин.

Рассмотрим механизм возможного образования поля растягивающих напряжений на внутренней стенке трубы. Напряженное состояние элемента трубы при воздействии на него неравномерно распределенной температуры описывается в плоском варианте известным уравнением [2]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\varphi r) \right] = -\alpha_{\theta} E \frac{\partial \theta}{\partial r}, \quad (1)$$

где φ – функция напряжений, кг/см; θ – температура, °С; α_{θ} – коэффициент линейного расширения материала трубы, 1/°С; E – нормальный модуль упругости, МПа.

Решив приведенное дифференциальное уравнение и приняв во внимание выражения для на-

пряжений через функцию φ ($\sigma_r = \varphi/r$; $\sigma_{\theta} = d\varphi/dr$), получим формулы для напряжений σ_r и σ_{θ} (см. рис. 2). При этом соблюдены граничные условия, когда $\sigma_r = 0$ при $r = a$ и b – на внутреннем и наружном радиусе трубы. Тогда с учетом того, что динамическая составляющая температуры в стенке трубы описывается уравнением [1, 4]:

$$\theta = \frac{Q_a}{\pi \lambda_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_n^2 \alpha_k J_0(\alpha_n a) J_0(\alpha_n r)}{(\alpha_n^2 + h^2) b^2 J_0^2(\alpha_n b)} \exp(-\alpha_n^2 \alpha_k t),$$

выражения для расчета напряжений в направлении окружности и радиуса будут иметь вид:

$$\sigma_{\theta} = \alpha_{\theta} E \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n \left\{ -J_0(\alpha_n r) + \frac{J_1(\alpha_n r)}{\alpha_n r} + \frac{J_1(\alpha_n a)}{\alpha_n a} - \frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \frac{b^2}{r^2} \left[\frac{J_1(\alpha_n a)}{\alpha_n a} - \frac{J_1(\alpha_n b)}{\alpha_n b} \right] \right\},$$

$$\sigma_r = \alpha_{\theta} E \sum_{n=1}^{\infty} \gamma_n \left\{ -\frac{J_1(\alpha_n r)}{\alpha_n r} + \frac{J_1(\alpha_n a)}{\alpha_n a} - \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \frac{b^2}{r^2} \left[\frac{J_1(\alpha_n a)}{\alpha_n a} - \frac{J_1(\alpha_n b)}{\alpha_n b} \right] \right\}. \quad (2)$$

Здесь общий член суммы обозначен через γ_n и входит как множитель в выражения для напряжений (2):

* Сообщение 1 см. в журнале «Техническая диагностика и неразрушающий контроль». – 2015. – №3. – С. 11–14

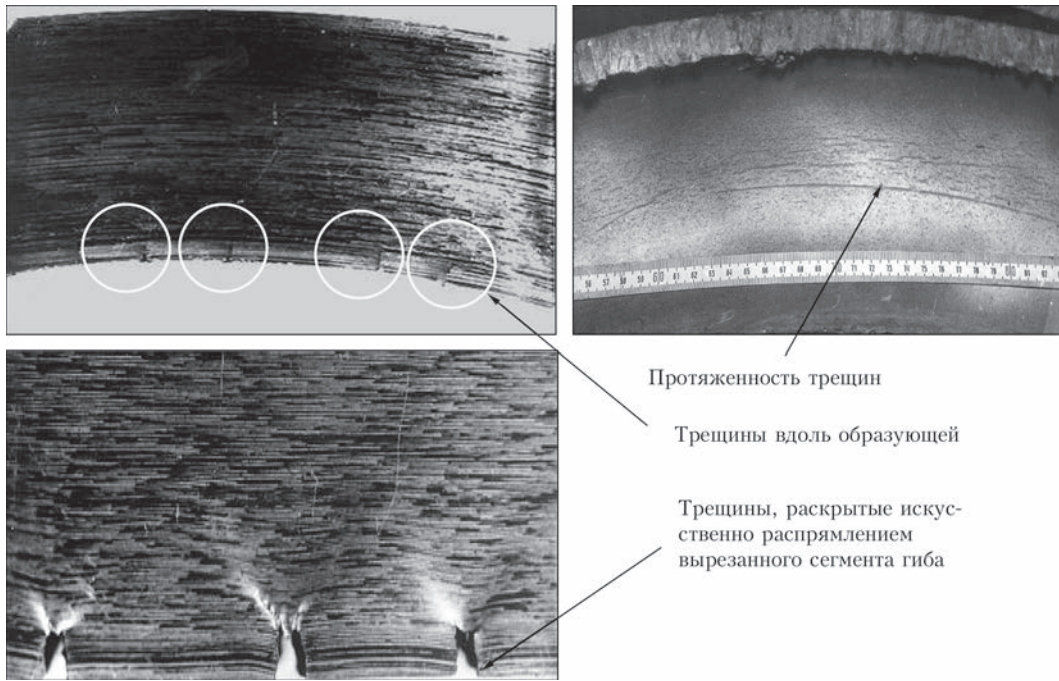


Рис. 1. Трещины на внутренней стенкегиба трубы диаметром 159×16 мм из стали 12Х1МФ после 180 тыс. ч наработки (по данным Л.А. Латушенко, Змиевская ГЭЦ)

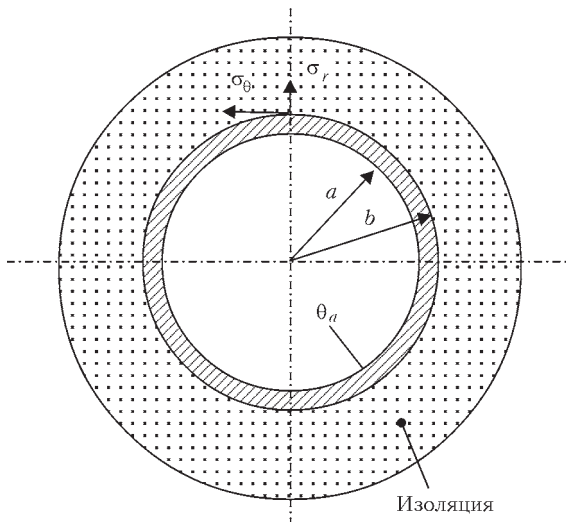


Рис. 2. Схематическое изображение трубы паропровода в изоляционном пакете

$$\gamma_n = \frac{Q}{\pi \lambda_0} \frac{\alpha_n^2 a_k \exp(-\alpha_n^2 a_k t) J_0(\alpha_n a_0)}{(\alpha_n^2 + h^2) b^2 J_0^2(\alpha_n b)}$$

В выражения (2) входят также функции Бесселя нулевого и первого порядка первого рода для действительного переменного J_0 и J_1 . Значения этих функций легко вычисляются на персональных компьютерах и не представляют трудностей для расчетов. Коэффициенты α_n определяются [1] как положительные корни характеристического уравнения:

$$\alpha_n J_1(\alpha_n b) + h J_0(\alpha_n b) = 0.$$

Напряженное состояние для элемента трубы, подсчитанное по формулам (2), приведено на рис. 3.

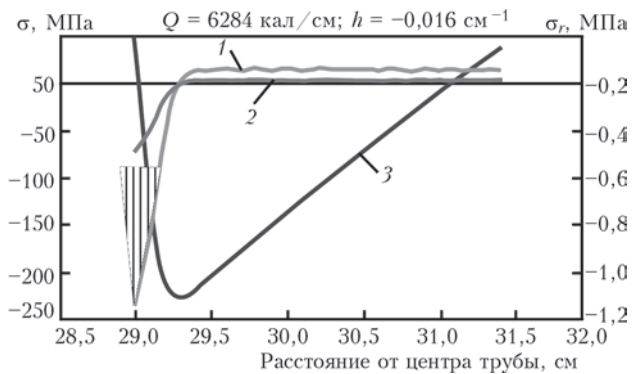


Рис. 3. Напряжения в стенке трубы через 0,1с после приложения температуры (штриховкой показана область пластических деформаций)

Как видно из рисунка, напряжения на внутренней поверхности трубы превосходят предел текучести материала, который после наработки материала в течение более 200 тыс. ч равен $\sigma_t \approx 0,7 \sigma_b = 60$ МПа [3]. Показанная штриховкой на рисунке область пластических деформаций распространяется внутрь трубы на незначительную (в данном случае 2 мм) глубину. Хотя этого вполне достаточно для возникновения растягивающих напряжений, способствующих образованию неглубоких трещин. Расчеты показывают, что даже незначительное динамическое приложение температуры к стенке трубы вызывает большие внутренние напряжения. Так, 80 °С, мгновенно приложенные к внутренней стенке трубы, вызывают окружающие сжимающие напряжения, равные 180 МПа в области на расстоянии 0,1 мм от границы стенки.

Остаточные напряжения в стенке трубы подсчитаем по формулам (3) подобным приведенным выше, но вместо температуры воспользуемся ве-



личной пластических деформаций, возникших при нагреве стенки трубы:

$$\sigma_{\theta,o} = -\varepsilon_0 E \left\{ \left[1 + \frac{1}{2\beta^2 r^2} \right] \exp[-\beta^2(r^2 - a^2)] + \frac{1}{2\beta^2 a^2} \right\} - \frac{\varepsilon_0 E}{2\beta^2(b^2 - a^2)} \left[-\left(\frac{b^2}{a^2} + \frac{b^2}{r^2} \right) + \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \times \exp(-\beta^2(b^2 - a^2)) \right] - \frac{\varepsilon_0 E}{\beta^2 a^2}, \quad (3)$$

$$\sigma_{r,o} = -\varepsilon_0 E \frac{\exp[-\beta^2(r^2 - a^2)]}{2\beta^2 r^2} - \frac{\varepsilon_0 E}{2\beta^2 a^2} \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left[\left(\frac{a^2}{r^2} - 1 \right) + \frac{a^2}{b^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \times \exp(-\beta^2(b^2 - a^2)) \right] - \frac{\varepsilon_0 E}{\beta^2 a^2}.$$

В формулах (3) коэффициент β характеризует крутизну распределения пластических деформаций в стенке трубы. Величина $\varepsilon_0 E$ равна пределу текучести материала в остывшем состоянии. В данном случае эта величина равна 60 МПа и $\beta = 0,5 \text{ см}^{-2}$ [4].

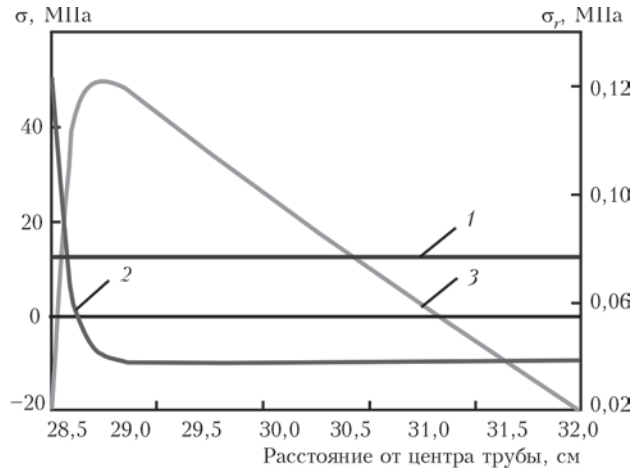


Рис. 4. Остаточные напряжения в стенке трубы, образованные после выравнивания температуры (1 – рабочие напряжения при давлении 22 ат); 2 – $\sigma_{\text{напр}}$; 3 – $\sigma_{\text{ост}}$

Необходимо также учесть, что при формировании поля остаточных напряжений, связанных со снижением и выравниванием температур по сечению трубы с течением времени, последние приведут к образованию остаточных напряжений на момент формирования равных или меньших предела текучести материала трубы. На рис. 4 представлены остаточные напряжения в стенке трубы, связанные с формированием на момент спустя 0,1 с от начала процесса нагрева трубы. В последующие моменты времени будет расширяться лишь область распространения остаточных напряжений в глубину трубы. Однако это уже существенно не повлияет на величину остаточных напряжений, учитывая, что их поле формирует начальный, максимальный уровень.

Анализируя графики, приведенные на рис. 4, можно сделать вывод о том, что остаточные напряжения, действующие по окружности, достигают предела текучести материала, а значит, могут способствовать появлению трещин по образующей трубы. Радиальные напряжения незначительны и ими можно пренебречь.

Одновременно с динамической составляющей температурного поля действует и квазидинамическая составляющая, которая растет от нулевого значения вплоть до достижения стационарного состояния. В этом случае основным фактором, влияющим на напряженное состояние стенки трубы, является интенсивность теплоотвода, определяемая качеством изоляции наружной поверхности трубы. Следует обратить внимание на влияние этого фактора. На рис. 5 показаны два варианта теплоотвода при установившемся тепловом поле. Как видим, напряженное состояние в стенке трубы существенно зависит от теплоотвода. Так, в случае достаточно надежной изоляции трубы ($h = 0,003 \text{ см}^{-1}$) напряжения в ее стенке невелики и не превосходят 4,5 МПа (рис. 5, справа). Повышение интенсивности теплоотвода за счет ухудшения качества изоляции вызывает увеличение напряжений. В данном случае при $h = -0,016 \text{ см}^{-1}$ напряжения в окружном направлении увеличи-

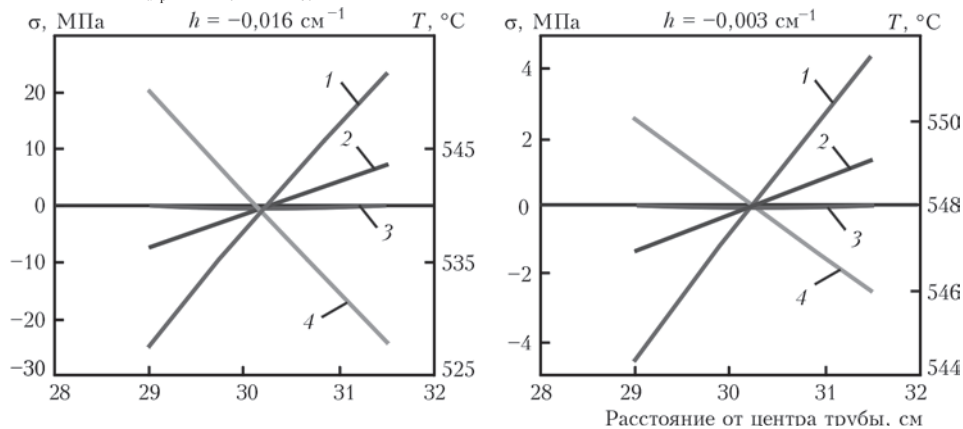


Рис. 5. Напряжения в стенке трубы при стационарном температурном поле: 1 – σ_{θ} ; 2 – σ_r ; 3 – σ_{θ} ; 4 – θ



ваются до 25 МПа (рис. 5, слева). Дальнейшее усиление теплопровода за счет обдува наружной поверхности трубы с полностью нарушенной изоляцией может еще более повысить напряжения в ее стенке. Напряжения в окружном направлении являются сжимающими и не достигают больших величин при хорошем качестве изоляции. При нарушении изоляции возросшие напряжения могут привести к появлению пластических деформаций в зоне своего действия и, как следствие, появлению дополнительной области растягивающих напряжений.

При построении графиков (рис. 5) использованы формулы расчета напряжений в трубах при стационарном температурном поле [1, 2]:

$$\sigma_r = \alpha_T E \frac{\theta_a - \theta_b}{2} \left[\frac{\ln\left(\frac{r}{a}\right)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} - \frac{b^2}{r^2} \frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \right],$$

$$\sigma_\theta = \alpha_T E \frac{\theta_a - \theta_b}{2} \left[\frac{1 + \ln\left(\frac{r}{a}\right)}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} - \frac{b^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \right].$$

Здесь θ_a – температура на внутренней стенке трубы, °С; α_0 – коэффициент линейного температурного расширения материала, 1/°С; h – коэффициент теплоотвода, см⁻¹.

Выводы

При внезапном динамическом термоударе по внутренней поверхности трубы возникает временное температурное поле с высоким градиентом, вызывая большие сжимающие напряжения. Последнее приводит к появлению пластических деформаций в узкой области внутренней стенки

Information 2 deals with the nature and magnitude of temperature and residual stresses, arising at sudden application of high temperature to pipe inner wall. The influence of dynamic component of stresses, induced by sudden application of thermal load to pipe inner wall, is shown. It is found that high gradient of temperature distribution in the direction of the radius at initial moments of time, induces compressive stresses, exceeding material yield point on pipe inner surface. The latter creates plastic deformations and, consequently, residual tensile stresses. The formed stresses can be sufficient for initiation of cracks, oriented along the pipe generatrix. 5 References, 5 Figures.

Keywords : thermal load, temperature and residual stresses, compressive stresses, residual tensile stresses

трубы и, как следствие, к остаточным растягивающим напряжениям, создающим условия для образования трещин.

Возникающее при динамическом термоударе температурное поле достаточно быстро, на протяжении времени до 30 с, уменьшается. Тем не менее, за данный период успевают создаться условия для возникновения и развития трещин. Одновременно с динамическим полем температур и напряжений растет и начинает оказывать влияние на процессы, протекающие в материале трубы, вторая, квазидинамическая составляющая температурного поля. Эта часть поля действует вплоть до насыщения и появления установившегося стационарного температурного поля.

Градиент распределения температуры при стабильном стационарном состоянии теплового поля незначителен, но существенно зависит от интенсивности теплоотвода от наружной стенки трубы и увеличивается с увеличением теплоотвода. Увеличение градиента температуры приводит к увеличению напряжений в стенке трубы, что также будет вызывать дополнительные пластические деформации.

1. Недосека С. А., Недосека А. Я. О трещинах, возникающих на внутренней поверхности трубопроводов, работающих при высокой температуре. Сообщение 1. Тепловые нагрузки на стенки труб при пуске и эксплуатации // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2015. – № 3. – С. 11–14.
2. Недосека А. Я. Основы расчета и диагностики сварных конструкций / Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Индпром, 2008. – 815 с.
3. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования. – М.: Наука, 1971. – 288 с.
4. Грантер К. Дж. Интегральные преобразования в математической физике. – М.: Гостехиздат, 1956. – 204 с.
5. ТУ14-3-460. Длительная прочность сталей при рабочих температурах. Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов. – Введ. 2009.

Поступила в редакцию
13.03.2015