УДК 622.691

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЯХ СТАЛЬНЫХ ТРУБ ПРИ АТМОСФЕРНОМ ХРАНЕНИИ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

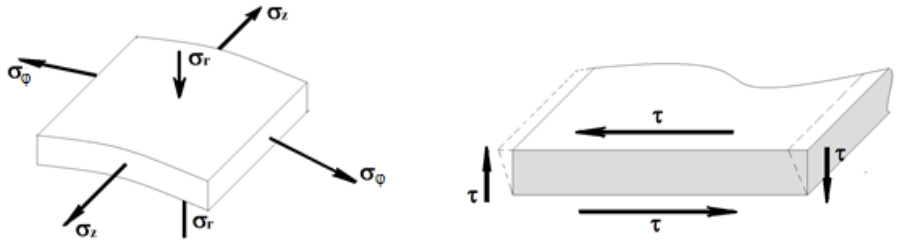
DISTRIBUTION OF INTERNAL STRESSES IN THE POLYMER COATINGS OF STEEL PIPES AT OPEN-AIR STORING IN THE CONDITIONS OF NEGATIVE TEMPERATURES

М. М. Бердник, И. Ю. Быков, А. Л. Пак
M. M. Berdnik, I. Yu. Bykov, A. L. Pak

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта
ООО «Газпромтрансгаз Ухта», г. Ухта

Ключевые слова: ***трубы, защитные покрытия, внутренние напряжения, отрицательная температура***
Key words: ***pipes, coverings, internal tension, negative temperature***

Покрытие трубопроводов под воздействием температурных нагрузок находится в сложном напряженном состоянии, которое предполагает наличие нормальных и касательных напряжений. За счет существенной разности коэффициентов температурного расширения трубной стали и полимерной оболочки покрытие при низких температурах натягивается на поверхность трубы, испытывая двухосное растяжение в плоскости поверхности и сжатие в поперечном сечении (рис. 1 а).



а) б)

Рис. 1. ***Нормальные (а) и касательные (б) напряжения, действующие на элемент и в сечении покрытия при понижении температуры***

Ранее была разработана упрощенная методика, в соответствии с которой могут быть определены значения кольцевых (σ_φ) и продольных (σ_z) напряжений. В покрытии возникают и радиальные напряжения (σ_r), величина которых определяется приближенно. Однако методика предлагает решение этой задачи в предположении, что значения кольцевых напряжений по толщине покрытия не изменяются. Если не принимать во внимание этого допущения и при определении параметров напряженного состояния учитывать толщину самого покрытия, то при воздействии температуры также будут возникать деформации по толщине покрытия. Таким образом, в радиальном направлении будут возникать напряжения сжатия. В первом приближении можно предполагать, что характер напряженного состояния покрытия при низких температурах качественно совпадает с напряженным состоянием трубы, нагруженной внутренним давлением.

Кроме нормальных напряжений покрытие дополнительно испытывает напряжение сдвига, которое также обеспечивается разностью коэффициентов температурного рас-

ширения стали и полимера. Особенно сильно такие напряжения проявляются в адгезионном подклеивающем слое покрытия, который находится на границе двух материалов с разными свойствами.

Касательные напряжения возникают за счет появления температурных деформаций в контактирующих слоях материалов с разными значениями температурных напряжений (рис. 1 б).

Таким образом, прочность покрытия определяется рядом условий:

- нормальные кольцевые (σ_ϕ) и продольные (σ_z) напряжения не должны превышать предела прочности полимерного слоя

$$\sigma_\phi \le [\sigma_n]; \sigma_z \le [\sigma_n], \quad (1)$$

- радиальные напряжения не должны превышать величины прочности адгезии, определенной методом отрыва

$$\sigma_r \le \left[\sigma_a^n\right]; \quad (2)$$

- касательные напряжения не должны превышать величины прочности адгезии, определенной методом сдвига

$$\tau \le \left[\sigma_a^\tau\right]. \quad (3)$$

Для определения прочности полимерного покрытия необходимо определить все компоненты тензора напряжений, которые состоят из трех нормальных напряжений и шести касательных.

Трехслойное полиэтиленовое покрытие в первом приближении может быть рассмотрено как покрытие, состоящее из внешнего полиэтиленового слоя, подстилаемого клеевым слоем сополимера этилена. Поскольку второй подслой из полиолефиновых композиций и наружный полиэтиленовый слой имеют схожие значения коэффициентов температурного расширения, то в рамках заданной модели можно предположить, что имеет место один слой суммарной толщиной 3 мм. При этом при определении прочности всего покрытия максимальные полученные значения механических напряжений будем сравнивать с прочностными характеристиками того материала, на который приходится максимум на эпюре напряжений в зависимости от толщины.

Рассмотрим трубу наружным диаметром 1 420 мм с нанесенным на нее покрытием. Труба находится на хранении и внешним силовым факторам не подвергается. В рамках рассматриваемой задачи необходимо определить величины напряжений в покрытии, возникающие при понижении температуры окружающей среды до заданного значения T_2. Начальной температурой будем считать значение равное 20 ^{0}C (T_0 = 20 ^{0}C). Величина значения начальной температуры выбрана исходя из условий нанесения покрытия на трубу. Было установлено, что при полном остывании покрытия на трубе при температуре 20 ^{0}C в нем формируются остаточные напряжения, максимальное значение которых наблюдается в кольцевом направлении, в слое, располагающемся на границе металла и полиэтилена. Таким образом, при расчете общей прочности необходимо учитывать наличие остаточных напряжений [1, 2].

При хранении трубы в течение некоторого периода времени меняется температура окружающей среды, и температурное воздействие оказывает существенное влияние на напряженное состояние покрытия.

За счет большего значения коэффициента температурного расширения при нагревании полиэтиленовое покрытие получает положительные деформации по величине большие, чем основной металл трубы. Следовательно, в результате нагрева в полиэтиленовом слое будут возникать деформации сжатия, обусловленные тем, что клеевой слой и слой эпоксидной композиции будет удерживать покрытие на трубе и препятствовать естественному расширению. При понижении температуры по причине разницы коэффициентов β покрытие будет сжиматься гораздо сильнее металла трубы. Влияние трубы и ее препятствие к естественному сжатию полиэтиленового слоя приведет к возникновению напряжений растяжения в кольцевом и в продольном направлениях. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что наиболее опасным с точки зрения

прочности покрытия является понижение температуры, кроме того, понижение температуры приводит к увеличению хрупкости полимеров и к изменению их прочностных характеристик. Остановимся на построении математических зависимостей для определения параметров напряженного состояния при некотором конечном значении температуры T_2, которая существенно ниже первоначальной, принятой равной 20 ^{0}C [2]. Продольная деформация металла может быть представлена в виде

$$\varepsilon_{z\_m} = \frac{L_m^* - L}{L} = \beta_m \cdot \Delta t, \tag{4}$$

где L — исходная длина трубы, м; L_m^* — конечная длина трубы при заданной температуре T_2, м; β_m — коэффициент температурного расширения металла, ^{0}C^{-1}; Δt — перепад температуры, определяемый как $(T_2 - T_0)$, ^{0}C.

Конечный размер трубы в продольном направлении составит

$$L_m^* = L\beta_m \Delta t + L\,. \tag{5}$$

Аналогично определяется конечное значение длины полимерного покрытия при условии, что его деформациям ничего не препятствует

$$L_n^* = L\beta_n \Delta t + L, \tag{6}$$

где L_n^* — конечная длина полимерного покрытия, при заданной температуре T_2, при условии беспрепятственного деформирования, м; β_n — коэффициент температурного расширения материала покрытия, ^{0}C^{-1}.

Если покрытие нанесено на трубу, то его свободному сжатию в продольном направлении будет препятствовать металл трубы, и в покрытии возникнут растягивающие деформации, которые численно будут равны разности свободных деформаций материала трубы и покрытия

$$\varepsilon_{z\_nm} = \frac{L_m^* - L}{L} - \frac{L_n^* - L}{L} = \left(\beta_m - \beta_n\right)\Delta t\,. \tag{7}$$

Таким образом, в продольном направлении выражение для определения величины относительной деформации полимерного покрытия трубы может быть определено при условии, что имеют место упругие деформации

$$\sigma_{z\_nm} = \frac{E_n \cdot \varepsilon_{z\_nm}}{1-\mu_n} = \frac{E_n\left(\beta_m - \beta_n\right)\Delta}{1-\mu_n} t, \tag{8}$$

где E_n — модуль упругости материала покрытия, МПа; μ_n — коэффициент Пуассона полимерного покрытия.

По толщине в радиальном направлении деформациям покрытия ничего не препятствует, соответственно относительная деформация материала покрытия при изменении температуры составит

$$\varepsilon_{r\_nm} = \beta\ \Delta t. \tag{9}$$

Вследствие того, что деформация происходит беспрепятственно, напряжения в радиальном направлении отсутствуют. Следует учесть тот факт, что при деформировании верхних слоев в окружном направлении нижние (внутренние) слои покрытия будут испытывать сжатие, и суммарная деформация нижних слоев покрытия в радиальном направлении будет складываться из относительной деформации материала покрытия и деформации (δ — начальная толщина покрытия; δ^* — конечная толщина покрытия; $\Delta\delta^t$ — изменение толщины стенки, обусловленное температурной деформацией материала; $\Delta D/2$ — изменение наружного диаметра, вызванное температурны-

ми деформациями материала трубы и покрытия в кольцевом направлении (рис. 2)).

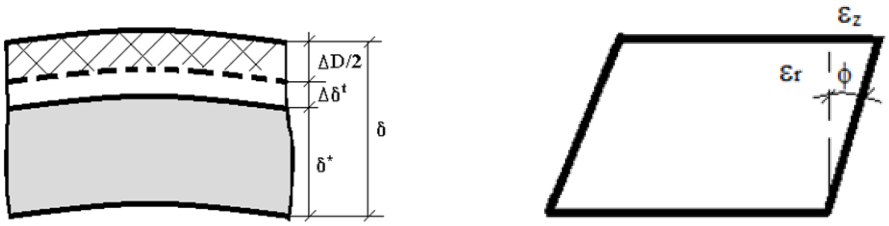


Рис. 2. ***Суммарные деформации полимерного слоя покрытия в радиальном направлении (а) и расчетная схема для определения касательных напряжений (б)***

Суммарные деформации в радиальном направлении могут быть представлены в виде

$$\varepsilon_{r\_nm} = \frac{\delta_{nm}^{*} - \delta_{n\_0}}{\delta_{n\_0}}, \tag{10}$$

где ε_{r_nm} — суммарная относительная деформация материала покрытия в радиальном направлении; δ_{nm}^{*} — конечное значение толщины покрытия в результате температурных деформаций.

Конечное значение толщины покрытия может быть определено из выражения

$$\delta_{nm}^{*} = \delta_n\left(\beta_n \cdot \Delta t + 1\right) - \frac{\Delta D}{2}, \tag{11}$$

где δ_n — толщина покрытия; мм; δ_{n_0} — первоначальное значение толщины покрытия, мм; ΔD — изменение диаметра трубы, вызванное температурными деформациями в кольцевом направлении, мм.

Изменение диаметра трубы вследствие температурных деформаций может быть рассчитано по выражению

$$\Delta D = \left(D_n + \delta_n\right) - D_n \cdot \sqrt{\left(\beta_m \Delta t + 1\right)} - \delta_n\left(\beta_n \Delta t + 1\right), \tag{12}$$

где D_n — наружный диаметр трубопровода, мм.

Предполагая, что материал покрытия работает в упругой стадии, напряжения, возникающие в радиальном направлении, могут быть определены по выражению

$$\sigma_{r\_nm} = \frac{E_n \cdot \varepsilon_{r\_nm}}{1 - \mu_n}. \tag{13}$$

Относительную деформацию в кольцевом направлении можно представить как отношение изменения длины окружности, вызванного температурным перепадом, к первоначальному значению длины окружности

$$\varepsilon_{\varphi\_nm} = \frac{\left(D_n + \delta_n\right)^2 \left(\left(\beta_m - \beta_n\right)\Delta t\right)}{\left(D_n + \delta_{n\_0}\right)^2}, \tag{14}$$

где ε_{φ_nm} — суммарная относительная деформация материала покрытия в кольцевом направлении. Кольцевые напряжения могут быть найдены из закона Гука

$$\sigma_{\varphi\_nm} = \frac{E_n \cdot \varepsilon_{\varphi\_nm}}{1 - \mu_n}. \tag{15}$$

Касательные напряжения определяются по выражению

$$\tau = G \cdot \phi = \frac{E}{1+\mu}\phi\,, \tag{16}$$

где φ — угловая деформация.

Возникновение касательных напряжений можно условно представить в виде расчетной схемы (рис. 2 б).

Касательные напряжения могут быть определены по выражениям

$$\tau_{zr} = \frac{E_n}{1+\mu_n} arctg\left(\frac{\varepsilon_{z\_nm}}{\varepsilon_{r\_nm}}\right), \tag{17}$$

$$\tau_{\varphi r} = \frac{E_n}{1+\mu_n} arctg\left(\frac{\varepsilon_{\varphi\_nm}}{\varepsilon_{r\_nm}}\right). \tag{18}$$

Методика с учетом внесенных допущений реализована в программном комплексе MathCad. Анализ выполнен для случая охлаждения полимерного покрытия на поверхности стальной трубы. При расчете параметров напряженного состояния защитного покрытия труб предполагается, что минимальная температура T_2 равна минус 50 ^{0}C. Соответственно, все значения параметров напряженно-деформированного состояния рассчитываются из условия, что температурный перепад Δt составляет минус 70 ^{0}C. Продольные и радиальные напряжения, в соответствии с выражениями 8 и 13, для рассматриваемой трубы, при температуре окружающей среды равной минус 50 ^{0}C, распределены по толщине покрытия в соответствии с функциями, представленными на рис. 3.

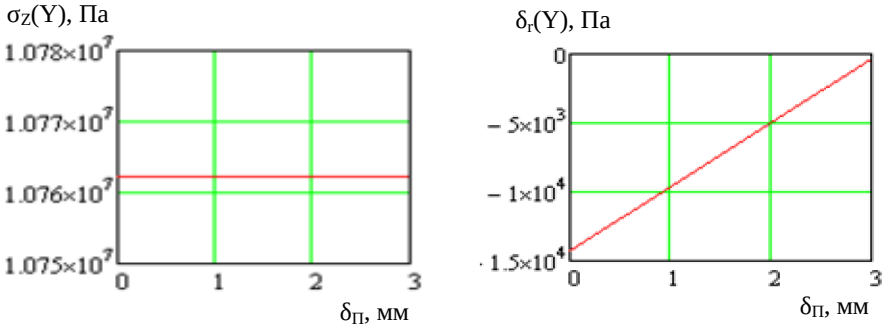


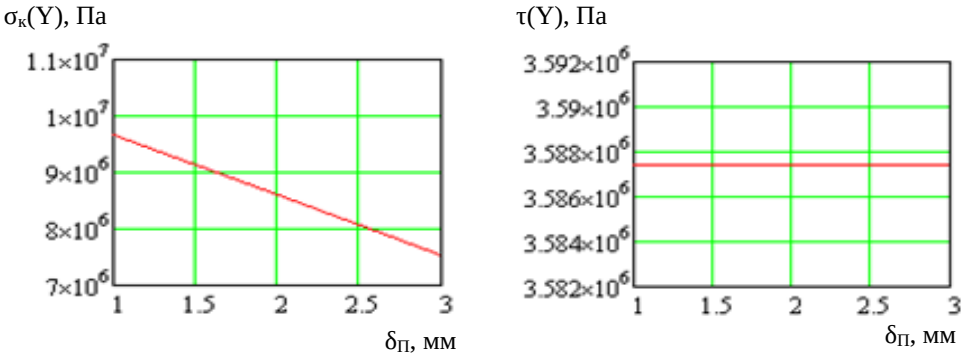
Рис. 3. ***Распределение продольных (а) и радиальных (б) напряжений по толщине покрытия при температуре минус 50 ^{0}C***

В продольном направлении напряжения являются постоянными по толщине покрытия и при минус 50 ^{0}C составляют 10,76 МПа. Радиальные напряжения по толщине покрытия отрицательные (сжимающие). Максимальное значение (15 кПа) наблюдается у внутреннего слоя, контактирующего с металлом трубы. На поверхности покрытия радиальные напряжения отсутствуют.

Кольцевые и касательные напряжения, в соответствии с выражениями 14, 16 и 17, для рассматриваемой трубы, при температуре минус 50 ^{0}C, распределены по толщине покрытия в соответствии с функциями, представленными на рис. 4.

Кольцевые напряжения растягивающие (положительные). По толщине покрытия изменяются линейно. Максимальное значение (9,8 МПа) наблюдается у внутреннего слоя, контактирующего с металлом трубы. Приближаясь к поверхности, значения этих

напряжений снижаются и на поверхности принимают значение равное 7,5 МПа. Касательные напряжения растягивающие (положительные). По толщине покрытия постоянны. Приближенно величина касательных напряжений при температуре минус 50 ^{0}C составляет 3,58 МПа.



а б

Рис. 4. ***Распределение кольцевых (а) и касательных (б) напряжений по толщине покрытия при температуре минус 50 ^{0}C***

Выводы

- Установлено, что при понижении температуры окружающего воздуха при хранении труб значения напряжений в полимерном покрытии увеличиваются по модулю.
- Значения продольных и касательных напряжений по толщине покрытия при заданной температуре распределены равномерно, что объясняется отсутствием препятствий для температурных деформаций в данном направлении.
- Распределения кольцевых и радиальных напряжений по толщине покрытия при заданной температуре носят линейный характер. При этом кольцевые напряжения являются растягивающими, их максимальное значение наблюдаются в слое, граничащем с металлом трубы, что объясняется разницей коэффициентов температурного расширения металла трубы и материала покрытия. Напряжения в радиальном направлении имеют сжимающий характер, максимальное по модулю значение также соответствует внутреннему слою покрытия, что объясняется дополнительным воздействием внешних слоев.

Список литературы

1. Биргер И. А. Остаточные напряжения. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1963. – 233 с.
2. Теплинский Ю. А., Быков И. Ю. Управление эксплуатационной надежностью магистральных газопроводов. – М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2007. – 400 с.
3. Ряснов В. Б., Шаповалов В. М. Особенности изменения температурных напряжений в полимерном покрытии при нанесении на трубу // Автоматика. Информатика. Управление. Приборы. Т. 17. – Тамбов: Вестник ТГТУ, 2011. – № 2 – С. 563-570.

Сведения об авторах

Бердник Мария Михайловна, *к. т. н., доцент кафедры «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов», Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, тел. 8(8216)774482, e-mail: m-berdnik@yandex.ru*

Быков Игорь Юрьевич*, д. т. н., профессор кафедры «Машины и оборудование нефтяной и газовой промышленности», Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта, тел. 8(8216)774492; e-mail: i-bykov@ugtu.net*

Пак Алексей Львович*, главный инженер управления технологическим транспортом и специальной техникой, ООО «Газпром трансгаз Ухта», г. Ухта, тел. 8(912) 416815, e-mail: alex.pak@mail.ru*

Information about the authors

Berdnik M. M.*, Candidate of Science in Engineering, associate professor of the chair «Designing and operation of trunk gas and oil pipelines», Ukhta State Technical University, phone: 8(8216)774482, e-mail: m-berdnik@yandex.ru*

Bykov I. Yu.*, Doctor of Engineering, professor of the chair «Machines and equipment of oil and gas industry», Ukhta State Technical University, phone: 8(8216)774492; e-mail: i-bykov@ugtu.net*

Pak A. L.*, chief engineer of the technological transport and specialized technique management, LLC «Gasprom transgas», Ukhta, phone: 8(912)9416815, e-mail: alex.pak@mail.ru*