

УДК 621.791.771

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ ТРУБОПРОВОДА

Федосеева Е.М.<sup>1</sup>, Ольшанская Т.В., Игнатов М.Н.

*Пермский государственный технический университет, г. Пермь*  
*e-mail: <sup>1</sup>lyalyaf@mail.ru*

Шестаков А.П.

*Институт механики сплошных сред*  
*Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь*

**Аннотация.** *Проведено моделирование нестационарных процессов в сварном соединении трубопровода. Рассмотрено изменение напряженно-деформированного состояния в кольцевых сварных швах трубопровода. Максимальные значения напряжений создаются на границе перехода основного металла к усилению корня шва. Теоретический коэффициент концентрации напряжений равен 1,8, который необходимо учитывать при расчете на циклическую прочность линейной части трубопроводов.*

**Ключевые слова:** *трубопровод, интенсивность напряжений, неметаллические включения, сварное соединение, ANSYS*

К трубопроводам предъявляются высокие требования по обеспечению надежности и безопасности их функционирования. Сварные соединения, особенно корень шва магистральных трубопроводов находятся в жестких условиях под действием напряжений в процессе эксплуатации [1].

Установлено влияние неметаллических включений в сварных соединениях, как первичного очага зарождения дефекта, приводящего к образованию магистральной трещины, и как следствие к разрушению трубопровода [2].

В производственную практику специалистов предприятий трубопроводного транспорта и соответствующих надзорных организаций внедряются и разрабатываются программные модули для полной автоматизации процедуры численного прочностного анализа трубопроводов в среде программы ANSYS методом конечных элементов (МКЭ) сложного напряженного-деформированного состояния линейной части трубопровода.

В связи с этим анализ процессов изменения интенсивности напряжений в неметаллических включениях сварных соединений трубопроводов численным моделированием является актуальным.

Целью работы являлось моделирование нестационарных процессов в сварных соединениях трубопроводов.

Моделирование нестационарных процессов методом конечных элементов осуществлено с помощью расчетно-программного комплекса ANSYS. Полагаем,

что: материал трубы изотропный, упругий и подчиняется закону Гука; деформации малы и описываются линейными геометрическими соотношениями.

Для расчета интенсивности заданы геометрические и физические параметры трубы и сварного шва (табл. 1).

Неметаллические включения представляют собой некоторые скопления (площадь равна примерно  $0,46 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2$ ), расположенные произвольно в сварном шве. Физические характеристики неметаллических включений:  $E = 1,6 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ , Коэффициент Пуассона равен 0,17.

Таблица 1. Параметры для расчета интенсивности напряжений

Геометрические параметры шва		Физические параметры шва		
Ширина $H_w$ , м	Длина $L_w$ , м	$E$ , Н/м <sup>2</sup>	Коэффициент Пуассона	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
$H_{w1} = 2,4 \cdot 10^{-3}$ ; $H_{w2} = 2,1 \cdot 10^{-3}$	$L_{w1} = 7 \cdot 10^{-3}$ ; $L_{w2} = 30 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{11}$	0,3	7800
Геометрические параметры трубы		Физические параметры трубы		
Ширина $H_r$ , м	Длина $L_m$ , м	$E$ , Н/м <sup>2</sup>	Коэффициент Пуассона	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
$15,7 \cdot 10^{-3}$	$200 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{11}$	0,3	7800

В работе рассмотрен случай, когда нестационарное воздействие, приложенное к стенке трубы, имеет вид (рис. 1):

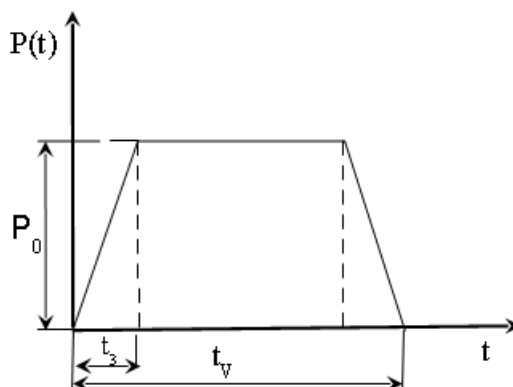


Рис. 1. Схема нагружения ( $P_0$  – амплитуда силового воздействия ( $1 \cdot 10^3 \text{ Па}$ );  $t_v$  – продолжительность силового воздействия)

Отраженная на рис.1 нагрузка математически выражена так:

$$F(t) = (P_0/t_3) \cdot ((t-t_0) \cdot h \cdot (t-t_0) - (t-t_1) \cdot h \cdot (t-t_1) - (t-t_2) \cdot h \cdot (t-t_2) + (t-t_3) \cdot h \cdot (t-t_3)), \quad (1)$$

где  $h(t)$  – функция Хэвисайда;  $t_0 = 0$ ;  $t_1 = t_3$ ;  $t_2 = t_v - t_3$ ;  $t_3 = t_v$ .

Для решения поставленной задачи применен метод конечных элементов. Данная задача является нестационарной, для ее решения использован прямой метод интегрирования по времени. Для аппроксимации трубы используем плоские, 4-х угловые, 8-ми узловые, с квадратичной аппроксимацией перемещений на срединной поверхности конечные элементы

Расчетная схема задачи показана на рис. 2.

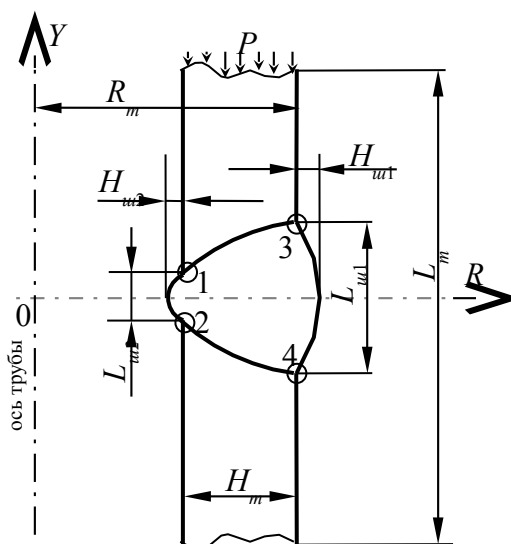


Рис. 2. Расчетная схема задачи:

$H_m$  – толщина трубы;  $L_m$  – длина трубы;  $L_{w1}$  – ширина шва;  
 $L_{w2}$  – ширина корня шва;  $H_{w1}$  – высота шва;  $H_{w2}$  – высота корня шва;  
 $R_m$  – радиус трубы;  $P$  – действующая нагрузка (напряжение);  
 $Y$  – ось действия продольных напряжений;  $R$  – ось действия радиальных напряжений;  
 цифрами 1, 2, 3 и 4 показаны места перехода основного металла в шов,  
 являющиеся концентраторами напряжений

На рис. 3 показано разнообразие волн, возникающих при действии нагрузки, изменение фронта и преломление волны при изменении конфигурации трубы в сварном шве. Наблюдается неравномерное напряженно-деформированное состояние в сварном шве, на границе основного металла и шва в точках 1, 2, 3 и 4 (см. рис. 2) происходит увеличение напряжений. Наибольшее увеличение (до  $1,8 \cdot 10^3$  Па) происходит в корне шва (рис. 4а). Теоретический коэффициент концентрации напряжений  $K\sigma$ , определяемый как отношение расчетного напряжения к действующему, составил 1,8.

Корень шва имеет меньшие размеры в сравнении с облицовочным слоем шва, и соответственно является сосредоточенным концентратором напряжений в трубопроводе.

Из-за различия физических характеристик стальной матрицы и неметаллических включений вблизи включений на границе раздела с матрицей напряжения

растут, происходит увеличение интенсивности напряжений (рис. 4б). Установлен максимальный прогиб, характеризующий изменение перемещения продольной волны вследствие встречи с границей металл – включение. Кроме того, выявлен скачек, характеризующий образование изгибной волны и последующие ее пульсации.

В неметаллических включениях сварного соединения трубы под действием заданной нагрузки происходит увеличение интенсивности напряжений в среднем от 18 до 35 %. Наибольшее увеличение напряжений наблюдается на границе металл – неметаллические включения в корне шва (до 35 - 38 %), что связано с изменением размеров в корне шва. Теоретический коэффициент концентрации напряжений составил 1.3 (рис. 4б).

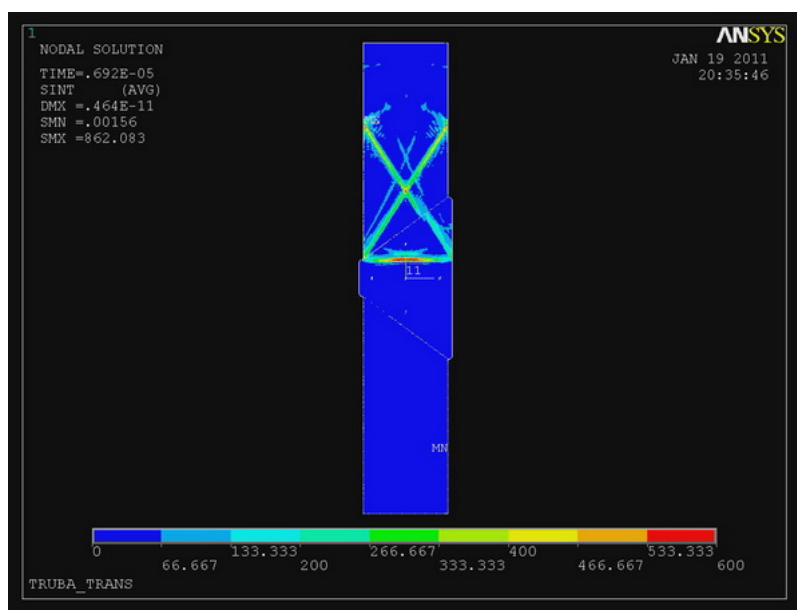


Рис. 3. Характер изменения продольной волны и интенсивности напряжений при изменении конфигурации трубы в сварном шве

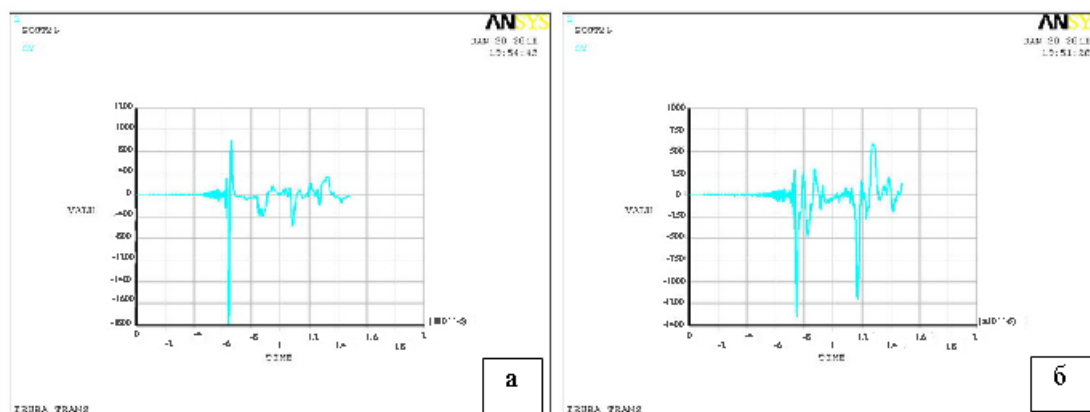


Рис. 4. Количественные изменения напряжений в сварном соединении:

- а – на границе осн. металл - корень шва;
- б – на границе металл - неметаллические включения

С учетом  $K\sigma$  выполнена оценка работоспособности трубопроводов с кольцевыми швами, используя критерий циклической прочности. Допускаемое рабочее давление в трубопроводе определено по методике, предложенной М.Х. Муфтаховым [3] и определяется:

$$P = P_0 \left( \frac{n \cdot n_\varepsilon \cdot D_{\text{вн}} \cdot K\sigma^{2/(1+c)} \cdot P_{\text{раб}}}{2 \cdot \chi \cdot E \cdot \delta \cdot (n_\sigma \cdot \psi^{-1})^{(1-c)/(1+c)}} \right)^{\frac{1}{m_c}} \cdot Np, \quad (1)$$

где  $P_0$  – относительный показатель структурной повреждаемости металла;

$n$  – коэффициент надежности по нагрузке;

$\psi$  – относительное сужение;

$P_{\text{раб}}$  – рабочее давление, МПа;

$n_\varepsilon$  – коэффициент запаса по деформации;

$Np$  – минимальное число циклов до начала разрушения при малоцикловой усталости;

$\delta$  – толщина стенки трубы, мм;

$n_\sigma$  – коэффициент запаса по напряжениям;

$D_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубы, мм;

$m_c$  – коэффициент условий работы металла;

$E$  – модуль упругости, МПа;

$\chi$  – коэффициент, характеризующий пластические свойства металла;

$c$  – коэффициент деформационного упрочнения;

$K\sigma$  – теоретический коэффициент концентрации напряжений.

С учетом относительного показателя повреждаемости металла трубы в концентраторе напряжений определяется коэффициент изменения рабочего давления в трубопроводе:

$$m_y = (1 - P)^{m_c \cdot (1+c)/2}. \quad (2)$$

Допускаемое рабочее давление в трубопроводе с кольцевыми швами в этом случае определяется:

$$P = P_{\text{раб}} \cdot m_y. \quad (3)$$

Входящие в (1), (2) и (3) параметры являются характеристиками трубы и определяются условиями эксплуатации по нормативным документам, кроме  $K\sigma$ , который определен по исследованиям напряженно-деформированного состояния в трубопроводе.

Проведенный расчет показал, что для обеспечения безопасной эксплуатации трубопровода с учетом кольцевых сварных швов для трубы размером диаметром 1220 мм и толщиной стенки 11 мм допускаемое рабочее давление составляет 6,1 МПа, а для трубы диаметром 1420 мм и толщиной стенки 15,7 мм – 7,9 МПа (при нормативном 9,8 МПа).

### Выводы

Проведено моделирование нестационарных процессов в сварных соединениях трубопроводов. Определено влияние неметаллических включений на изменение напряжений в металле шва сварных соединений трубопроводов, теоретический коэффициент концентрации напряжений равен 1,3. Вблизи включений, на границе раздела с матрицей, напряжения растут из-за различия физических характеристик стальной матрицы и неметаллических включений. Установлено, что для линейной части трубопроводов с кольцевыми швами характерно неравномерное напряженно-деформированное состояние. Максимальные значения напряжений создаются на границе перехода основного металла к усилению корня шва. Теоретический коэффициент концентрации напряжений равен 1,8; его необходимо учитывать при расчете на циклическую прочность линейной части трубопроводов, что позволяет скорректировать рабочее допускаемое рабочее давление в трубопроводе для безопасной эксплуатации.

### Литература

1. Роль трубопроводного транспорта в развитии регионов. Под ред. Иваницкой Е.В. // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2009. № 2(14). С. 4 - 5.
2. Гафаров Н.А., Митрофанов А.В., Гончаров А.А., Третьяк А.Я., Киченко Б.В. Анализ повреждений оборудования и трубопроводов на объектах добычи, переработки и транспорта продукции Оренбургского НГКМ // Серия «Диагностика оборудования и трубопроводов». ИРЦ Газпром. Москва, 2000. 39 с.
3. Муфтахов М.А. Повышение безопасности эксплуатации магистральных трубопроводов с дефектом типа ликвационной полосы: Автореферат канд. техн. наук. Уфа, 2006. 24 с.

## MODELLING OF NON-STATIONARY PROCESSES IN WELDED CONNECTION OF THE PIPELINE

E.M. Fedoseeva<sup>1</sup>, T.V. Olshanskaya, M.N. Ignatov  
*Perm State Technical University, Perm, Russia*  
*e-mail: <sup>1</sup>lyalyaf@mail.ru*

A.P. Shestakov

*Institute of continuous media mechanics UB RAS, Perm, Russia*

**Abstract.** *Modeling of non-stationary processes in welded connection of the pipeline has been realized. Change of intensity of pressure in welded connection of a pipe, formation of flexural waves at passage of a longitudinal wave through nonmetallic inclusions is considered. It is shown that on certain sites pulse changes of intensity of pressure which can promote occurrence of critical pressure are possible.*

**Keywords:** *pipeline, stress intensity, nonmetallic inclusions, welded connection, ANSYS*

### References

1. Rol' truboprovodnogo transporta v razvitii regionov (The role of pipeline transportation in regional development), Ed. Ivanitskaya. E.V. *Truboprovodnyi transport: teoriya i praktika*, 2009, Issue 2 (14), pp. 4 - 5.
2. Gafarov N.A., Mitrofanov A.V., Goncharov A.A., Tret'yak A.Ya., Kichenko B.V. Analiz povrezhdenii oborudovaniya i truboprovodov na ob'ektakh dobychi, pererabotki i transporta produktsii Orenburgskogo NGKM (Analysis of damage to equipment and piping at the sites of production, processing and transportation of products at Orenburg condensate field), *Seriya "Diagnostika oborudovaniya i truboprovodov"* ("Diagnosis of equipment and pipelines" Series). Moscow, IRC "Gazprom". 39 p.
3. Muftakhov M.A. Povyshenie bezopasnosti ekspluatatsii magistral'nykh truboprovodov s defektom tipa likvatsionnoi polosy (Improving operational safety of pipelines with a defect such as segregation streamer). PhD Thesis. Ufa, 2006. 24 p.