



## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДА В ОБЛАСТИ ОДИНОЧНОЙ ВМЯТИНЫ И ВМЯТИНЫ С ДЕФЕКТОМ УМЕНЬШЕНИЯ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ

А.А.Игнатик, А.В.Сальников\*, А.М.Шарыгин

Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия

### Investigation of the Stress-Strain State of the Pipeline in the Area of Single Dent and Dent Interacting with Metal Loss Defect

A.A.Ignatik, A.V.Salnikov, A.M.Sharygin

Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia

#### Abstract

The stress-strain state in the region of a single dent and in the area of a dent interacting with a metal loss defect is experimentally investigated. The object of research was a pipe (outside diameter is 114 mm, wall thickness is 4.5 mm, length is 1 m) with artificially made dent and loss of metal. The experiments were carried out on a laboratory stand to generate internal pressure in the pipe and measure deformations in the pipe wall. Dependences of hoop and longitudinal deformations on the internal pressure for different points of the dent region, as well as the distributions of hoop and longitudinal deformations in the axial and circumferential directions of the pipe in the dent region are obtained. The criterion for determining the combined defect «dent with metal loss» is recommended to use.

#### Keywords:

Deformation;  
Stress intensity;  
Combined defect;  
Metal loss;  
Dent.

© 2018 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

### Введение

Целью исследований является экспериментальное изучение напряжённо-деформированного состояния стенки трубы в области одиночной вмятины и в области вмятины, взаимодействующей с дефектом потери металла, а также получение критерия для определения комбинированного дефекта типа «вмятина с потерей металла».

Вмятины на магистральных трубопроводах (МТ) являются концентраторами напряжений и деформаций в стенке труб, что приводит к уменьшению прочности трубопроводов. Это уменьшение прочности выражается в снижении давления разрушения секции МТ относительно давления разрушения бездефектной секции МТ. Давление разрушения для трубопроводов с дефектами рассчитывается по методикам из документа РД-23.040.00-КТН-011-16 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Определение прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами». При вычислениях применяются деформационные критерии предельных состояний, а именно: критерий

предельной прочности (или исчерпания несущей способности)  $\Theta_u$  и критерий предельной пластичности (или разрушения)  $\Theta_c$ . Для определения критериев  $\Theta_u$  и  $\Theta_c$  следует знать величины компонентов деформированного состояния стенки трубы. Этими компонентами являются: тангенциальная  $\varepsilon_\theta$ , продольная  $\varepsilon_z$ , радиальная  $\varepsilon_r$  относительные деформации; интенсивность деформаций  $\varepsilon_i$ ; объёмная деформация  $\varepsilon_0$ . Поэтому в данной работе проводится исследование деформированного и напряжённого состояний в области дефекта.

При подготовке статьи использовались литературные источники [1–8], в которых приведена теоретическая и практическая информация для исследования напряжённо-деформированного состояния дефектных зон трубопроводов.

### Материалы и технология эксперимента

Экспериментальная работа проводилась на лабораторном стенде, описание которого приводится в источнике [9]. Объектом исследования служил образец трубы из стали ВСтЗ. Механические характеристики образца трубы: предел прочности  $\sigma_b = 430$  МПа, предел текучести  $\sigma_T = 310$  МПа. Геометрические параметры

\*E-mail: [ugtusovet@yandex.ru](mailto:ugtusovet@yandex.ru)

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP20180400369>

трубы: наружный диаметр  $D = 114$  мм, толщина стенки  $d = 4.5$  мм, длина  $L = 1$  м.

На поверхности образца трубы была изготовлена искусственная вмятина посредством гидравлического пресса. Применялся при этом пуансон диаметра 30 мм. Максимальное приложенное усилие составило 4 тонны. Геометрические параметры вмятины таковы: длина (расстояние между крайними точками дефекта в осевом направлении)  $L_{вм} = 134$  мм, ширина (расстояние между крайними точками дефекта в окружном направлении)  $W_{вм} = 64$  мм, глубина  $H_{вм} = 3,4$  мм. Вмятина симметрична относительно осевого и окружного направлений трубы.

Труба с вмятиной устанавливалась на опоры лабораторного стенда и подключалась к гидравлической системе, к которой присоединялся ручной опрессовочный насос НА-100. Насос заполняет водой внутреннюю полость трубы и повышает давление в трубе.

В области вмятины устанавливались тензорезисторы типа 2ФКП-5-200 для измерения относительных деформаций на наружной поверхности дефекта. На рисунке 1 изображены эти тензорезисторы. Всего было установлено семь розеток тензорезисторов: шесть розеток в области вмятины и одна розетка в бездефектной зоне (на рисунке

ке 1 не изображена). В одной розетке находится два тензорезистора для измерения тангенциальной и продольной относительных деформаций в одной «точке» стенки трубы. Так как вмятина является симметричной относительно осевого и окружного направлений трубы, то измеренные относительные деформации считаются главными деформациями.

В таблице 1 приведены осевые координаты  $z$  и окружные координаты  $\Theta$  всех тензорезисторов. Эти координаты отсчитываются от центра вмятины ( $z = 0, \Theta = 0$ ) в осевом и окружном направлениях трубы соответственно. Координата определяется по местоположению центра решётки тензорезистора.

Измерения относительных деформаций осуществлялись при увеличении внутреннего давления  $p$  в образце трубы от нуля до  $p_{max} = 6.2$  МПа с шагом  $D_p = 0.1$  МПа. На каждом шаге фиксировались значения тангенциальной и продольной относительных деформаций.

### Результаты и обсуждение. Первый этап

В результате экспериментальным путём были найдены зависимости относительных деформаций от давления в области вмятины и в бездефектной зоне. Эти зависимости представлены на рисунках 2 и 3, где также построены теоретические графики, выполненные по методике из РД-23.040.00-КТН-011-16.

После получения экспериментальных значений относительных деформаций производился расчёт компонентов плоского напряжённого состояния по формулам перехода от относительных деформаций к напряжениям для упругой работы материала:

$$\begin{cases} \sigma_{\Theta} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\epsilon_{\Theta} + \nu \cdot \epsilon_z), \\ \sigma_z = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot (\epsilon_z + \nu \cdot \epsilon_{\Theta}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma_{\Theta}, \sigma_z$  – тангенциальное и продольное напряжения соответственно;  $E$  – модуль упругости;  $\nu$  – коэффициент Пуассона, а затем расчёт интенсивности напряжений  $\sigma_i$  по формуле:

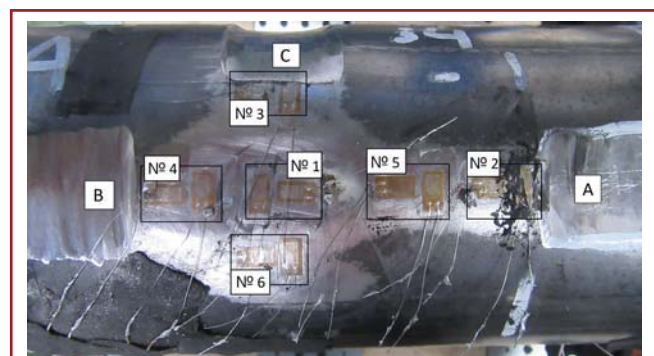


Рис.1. Установленные на поверхности вмятины тензорезисторы: №№ 1–6 – нумерация зон области вмятины; А, В, С – дефекты потери металла

Осевые и окружные координаты тензорезисторов					Таблица 1
№ зоны	Тензорезисторы для измерения тангенциальной относительной деформации $\epsilon_{\Theta}$		Тензорезисторы для измерения продольной относительной деформации $\epsilon_z$		
	Осевая координата $z$ , мм	Окружная координата $\Theta$ , мм	Осевая координата $z$ , мм	Окружная координата $\Theta$ , мм	
1	3	0	6	0	
2	66	0	58	0	
3	4	28	4	28	
4	18	0	26	0	
5	42	0	34	0	
6	4	16	4	16	

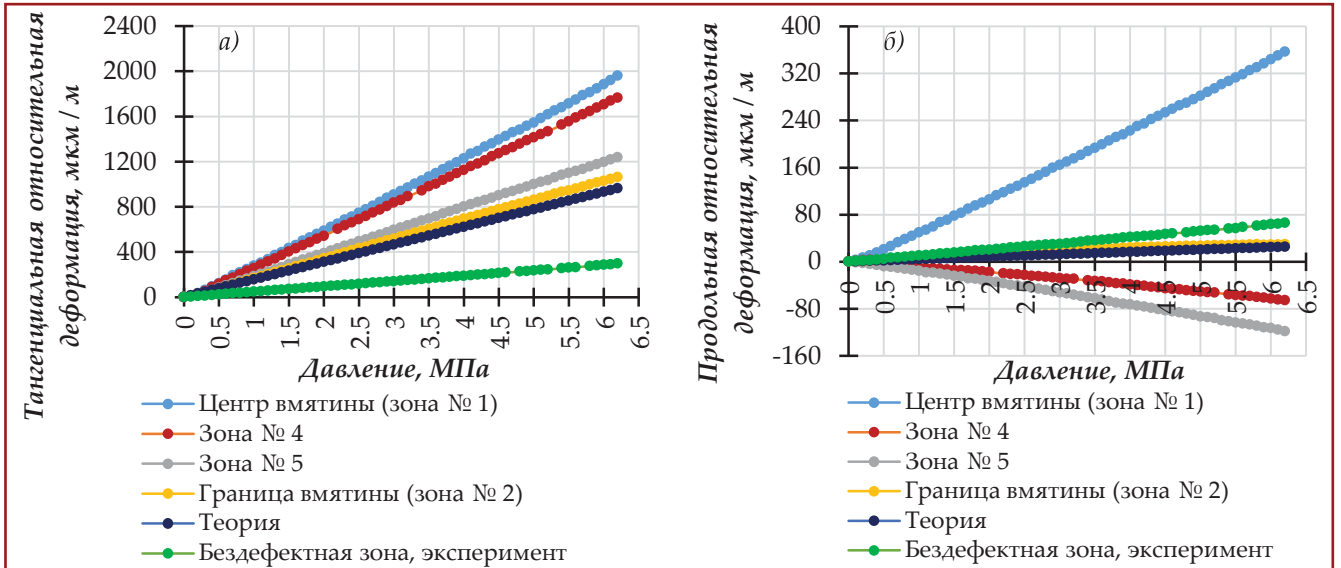


Рис.2. Графики зависимости тангенциальной относительной деформации (а) и продольной относительной деформации (б) от давления для зон вмятины № 1, 2, 4, 5

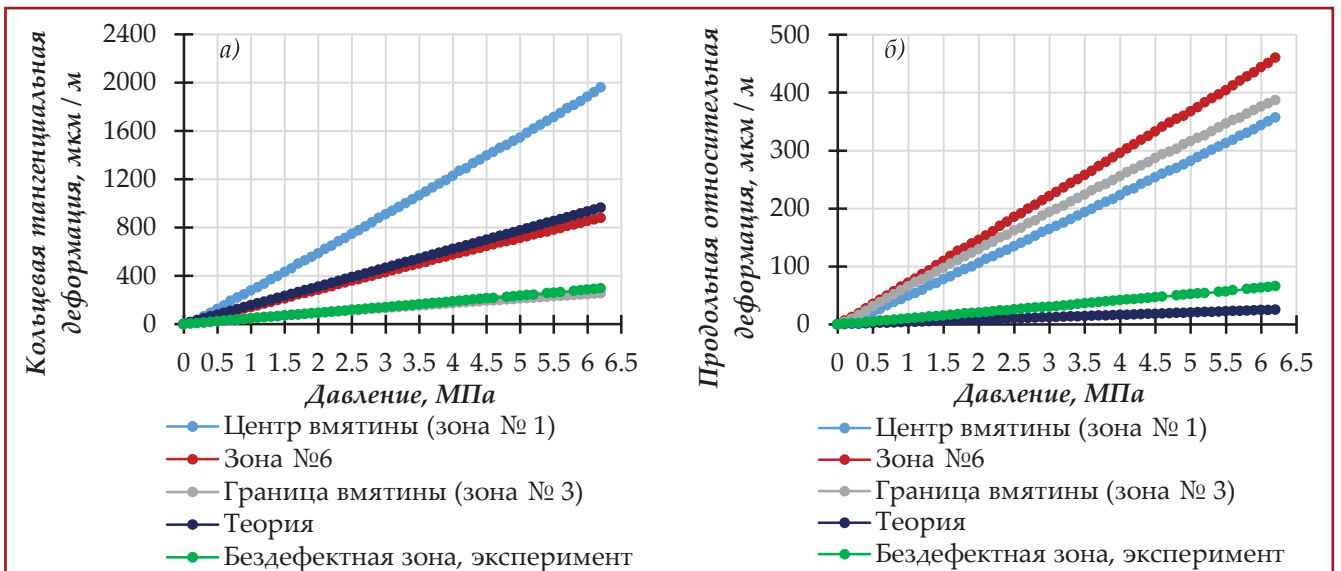


Рис.3. Графики зависимости тангенциальной относительной деформации (а) и продольной относительной деформации (б) от давления для зон вмятины № 1, 3, 6

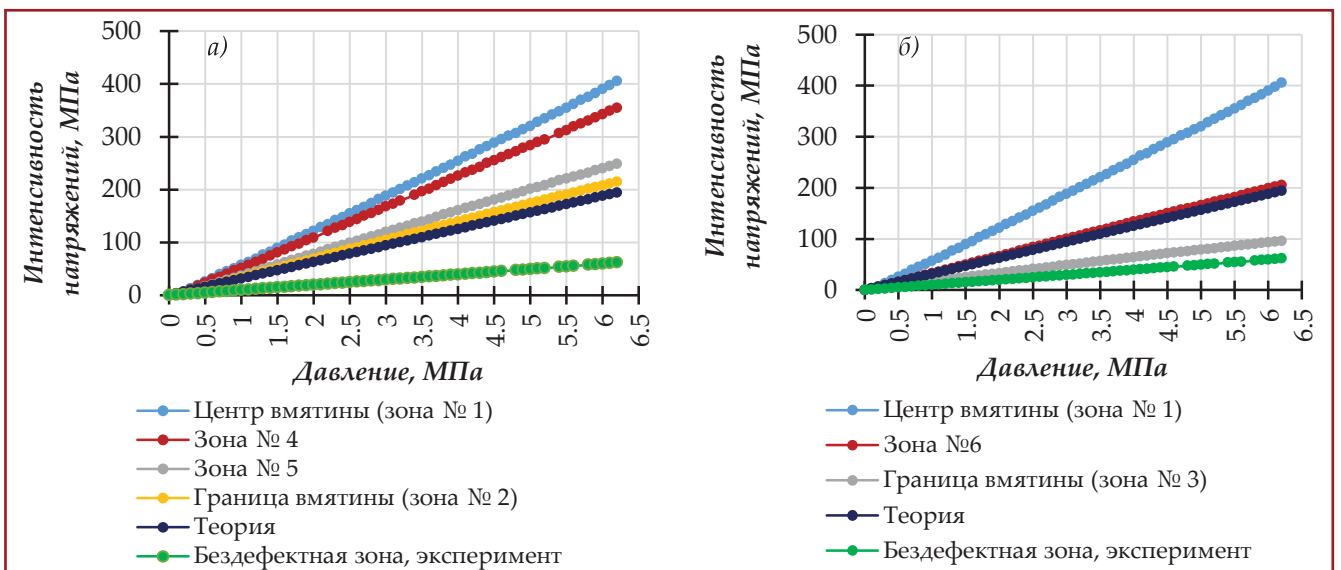


Рис.4. Графики зависимости интенсивности напряжений от давления в области вмятины для зон № 1, 2, 4, 5 (а) и для зон № 1, 3, 6 (б)

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_\Theta^2 + \sigma_z^2 - \sigma_\Theta \cdot \sigma_z}. \quad (2)$$

По результатам расчётов с использованием формул (1) и (2) выполнено построение графиков зависимости интенсивности напряжений от давления для всех исследуемых зон вмятины и бездефектной зоны (рис. 4).

Все зависимости на рисунках 2–4, очевидно, подчиняются линейному закону, поэтому можно говорить о том, что во всех исследованных случаях действует обобщённый закон Гука и стадия работы материала трубы – упругая.

Отличие теоретически и экспериментально полученных результатов вызвано тем, что измерения относительных деформаций выполнялись на поверхности трубы, а по теории из источника РД-23.040.00-КТН-011-16 вычисляются усреднённые по толщине стенки трубы относительные деформации.

Следует отметить, что на границе вмятины в продольном направлении (зона № 2) значения  $\varepsilon_z$  близки к номинальному значению  $\varepsilon_{zном}$  в бездефектной зоне, а значения  $\varepsilon_\Theta$  больше номинальных  $\varepsilon_{\Thetaном}$  и присутствует концентрация тангенциальных относительных деформаций  $\varepsilon_\Theta/\varepsilon_{\Thetaном} = 3.6$ . А на границе вмятины в окружном направлении (зона № 3) значения  $\varepsilon_\Theta$  близки к номинальному  $\varepsilon_{\Thetaном}$ , а значения  $\varepsilon_z$  больше  $\varepsilon_{zном}$  и присутствует концентрация продольных относительных деформаций  $\varepsilon_z/\varepsilon_{zном} = 6.1$ . Приведённые значения концентраций относительных деформаций являются средними значениями в интервале давления от 0.1 до 6.2 МПа.

Распределения интенсивности напряжений вдоль осевого и окружного направлений трубы показаны на рисунке 5.

Предлагается вычислять значения средней тангенциальной относительной деформации, средней продольной относительной деформации и средней интенсивности напряжений в области вмятины в осевом направлении по следующим

формулам:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\Theta oc}^{cp} &= \frac{2}{L_{BM}} \cdot \int_0^{L_{BM}/2} \varepsilon_\Theta(z) dz, & \varepsilon_{z oc}^{cp} &= \frac{2}{L_{BM}} \cdot \int_0^{L_{BM}/2} \varepsilon_z(z) dz, \\ \sigma_{i oc}^{cp} &= \frac{2}{L_{BM}} \cdot \int_0^{L_{BM}/2} \sigma_i(z) dz, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $z$  – продольная координата; индекс «*ср*» – среднее значение; индекс «*ос*» – осевое направление трубы.

Аналогичные формулы для вычисления средних величин относительных деформаций и интенсивности напряжений в области вмятины в окружном направлении:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\Theta окр}^{cp} &= \frac{2}{W_{BM}} \cdot \int_0^{W_{BM}/2} \varepsilon_\Theta(\Theta) d\Theta, & \varepsilon_{z окр}^{cp} &= \frac{2}{W_{BM}} \cdot \int_0^{W_{BM}/2} \varepsilon_z(\Theta) d\Theta, \\ \sigma_{i окр}^{cp} &= \frac{2}{W_{BM}} \cdot \int_0^{W_{BM}/2} \sigma_i(\Theta) d\Theta, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\Theta$  – окружная координата; индекс «*окр*» – окружное направление трубы.

Зависимости тангенциальной относительной деформации от осевой координаты и окружной координаты предлагается представлять в виде линейного закона:

$$\varepsilon_\Theta(z) = k_1 \cdot z + b_1 \text{ и } \varepsilon_\Theta(\Theta) = k_2 \cdot \Theta + b_2,$$

где  $k_{1,2}$  – угловой коэффициент,  $b_{1,2}$  – свободный член.

Зависимости продольной относительной деформации от осевой координаты и окружной координаты предлагается представлять в виде:

$$\varepsilon_z(z) = B_1 \cdot z + C_1 \text{ и } \varepsilon_z(\Theta) = B_2 \cdot \Theta + C_2,$$

где  $B_{1,2}$  – коэффициент,  $C_{1,2}$  – свободный член.

Так как характер графиков распределения интенсивности напряжений (рис. 6) одинаков с характером графиков распределения тангенциальных относительных деформаций (рис. 5а и 7а), то зависимость интенсивности напряжений от координат предлагается представлять в виде

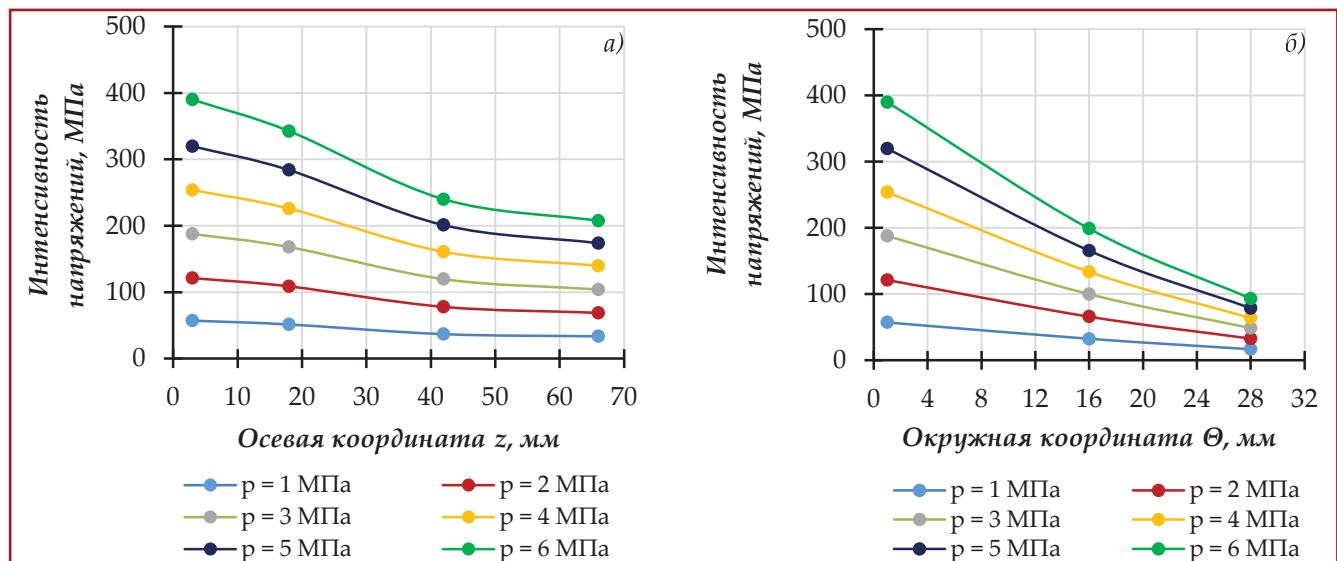
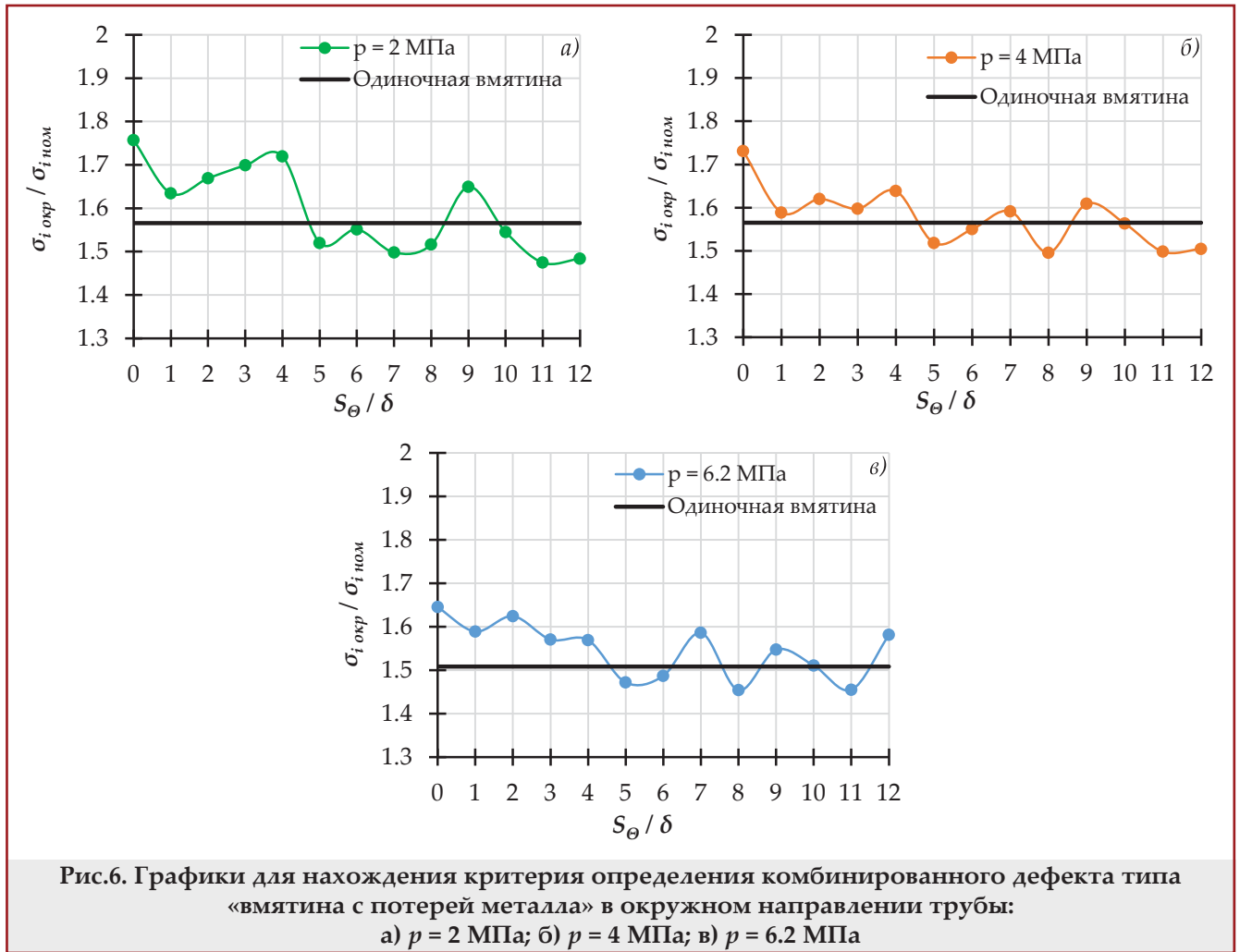


Рис.5. Распределение интенсивности напряжений в области вмятины вдоль осевого направления трубы (а) и вдоль окружного направления трубы (б)



линейного закона:

$$\sigma_i(z) = k_3 \cdot z + b_3 \text{ и } \sigma_i(\Theta) = k_4 \cdot \Theta + b_4,$$

где  $k_{3,4}$  – угловой коэффициент,  $b_{3,4}$  – свободный член.

Тогда формулы (3) переписутся в следующем виде:

$$\varepsilon_{\Theta oc}^{cp} = \frac{k_1}{4} \cdot L_{BM} + b_1, \quad \varepsilon_{z oc}^{cp} = \frac{B_1}{4} \cdot L_{BM} + C_1,$$

$$\sigma_{i окр}^{cp} = \frac{k_3}{4} \cdot L_{BM} + b_3, \tag{5}$$

а формулы (4) следует представить так:

$$\varepsilon_{\Theta oc}^{cp} = \frac{k_2}{4} \cdot L_{BM} + b_2, \quad \varepsilon_{z oc}^{cp} = \frac{B_2}{4} \cdot L_{BM} + C_2,$$

$$\sigma_{i окр}^{cp} = \frac{k_4}{4} \cdot L_{BM} + b_4, \tag{6}$$

Значения угловых коэффициентов  $k_{1,2,3,4}$ ; свободных членов  $b_{1,2,3,4}$ ; коэффициентов  $B_{1,2}$ ; свободных членов  $C_{1,2}$  были найдены с помощью метода наименьших квадратов на ЭВМ.

В таблицах 2 и 3 представлены результаты расчётов средних значений компонентов напряжённо-деформированного состояния в области вмятины по формулам (5) и (6), а также величины  $\sigma_{i окр}^{cp} / \sigma_{i ном}$ , где  $\sigma_{i ном}$  – интенсивность напряжений в бездефектной зоне.

### Результаты и обсуждение. Второй этап

На втором этапе экспериментов выполнялось исследование напряжённо-деформированного состояния в области вмятины, взаимодействующей с потерей металла. Для этого в осевом, а затем в окружном направлении относительно уже имеющейся вмятины, исследованной на первом этапе, на некотором расстоянии от её границы создавался дефект потери металла шлифованием.

Итак, слева и справа относительно вмятины на расстоянии  $S_z = 45$  мм от её границы были выполнены дефекты потери металла (рис. 1, позиции А и В) с первоначальными размерами  $L_{п.м} = 26$  мм,  $W_{п.м} = 30$  мм,  $H_{п.м} = 1.5$  мм; величина  $S_z$  – это минимальное расстояние между вмятиной и потерей металла в осевом направлении трубы. Затем проводились измерения тангенциальной и продольной относительных деформаций в зонах № 1, 2, 4, 5. Слева от вмятины была выполнена потеря металла, чтобы измерять относительные деформации в зоне № 4.

Далее по направлению к вмятине увеличивалась длина потери металла  $L_{п.м}$  на величину  $\delta = 4.5$  мм, где  $\delta$  – толщина стенки образца трубы, а размеры  $W_{п.м}$  и  $H_{п.м}$  сохранялись неизменными. Затем снова регистрировались значения относительных деформаций в области вмятины. Такой порядок действий выполнялся до

**Таблица 2**

**Средние значения компонентов напряжённо-деформированного состояния  
в области вмятины в осевом направлении трубы**

$p$ , МПа	1	2	3	4	5	6
$\varepsilon_{\Theta oc}^{cp}$ , мкм/м	218.15	459.03	705.57	950.08	1190.94	1435.40
$\varepsilon_{z oc}^{cp}$ , мкм/м	7.64	16.78	25.04	32.25	39.06	46.49
$\sigma_{i oc}^{cp}$ , МПа	71.00	93.12	14314	192.73	241.61	291.22
$\sigma_{i oc}^{cp} / \sigma_{i ном}$	4.46	4.76	4.90	4.91	4.91	4.89

**Таблица 3**

**Средние значения компонентов напряжённо-деформированного состояния  
в области вмятины в окружном направлении трубы**

$p$ , МПа	1	2	3	4	5	6
$\varepsilon_{\Theta окр}^{cp}$ , мкм/м	145.89	301.47	461.04	618.54	772.34	933.16
$\varepsilon_{z окр}^{cp}$ , мкм/м	65.38	133.07	202.10	269.77	335.72	404.58
$\sigma_{i окр}^{cp}$ , МПа	33.99	70.02	107.00	143.42	179.05	216.27
$\sigma_{i окр}^{cp} / \sigma_{i ном}$	3.42	3.58	3.67	3.65	3.64	3.63

тех пор, пока не были зафиксированы значения относительных деформаций, когда вмятина и потеря металла находились вплотную друг к другу ( $S_z = 0$ ).

Аналогичная процедура выполнялась при исследовании взаимодействия дефектов в окружном направлении трубы. Здесь регистрировались относительные деформации только в зонах № 1 и № 3 при разных значениях величины  $S_{\Theta}$ ;  $S_{\Theta}$  – минимальное расстояние между вмятиной и потерей металла в окружном направлении трубы. Первоначально данная величина составляла  $S_{\Theta} = 12 \cdot \delta = 54$  мм, в конце исследований  $S_{\Theta} = 0$ . Потеря металла, взаимодействующая с вмятиной в окружном направлении, на рисунке 1 имеет позицию С. Её первоначальные и дальнейшие геометрические параметры такие же, как и у потерь металла А и В. Влияния дефекта потери металла С на относительные деформации в зоне вмятины № 1 не выявлено, а в зоне № 3 выявлено.

Затем при использовании экспериментально полученных значений относительных деформаций по формулам (1) рассчитывались значения напряжений, а по формуле (2) – интенсивность напряжений.

Далее при рассмотрении дефектов, взаимодействующих в осевом направлении, определялась величина  $\sigma_{i oc}^{cp}$  по формуле (5) и величина  $\sigma_{i oc}^{cp} / \sigma_{i ном}$ . А для дефектов, взаимодействующих в окружном направлении, рассчитывалась интенсивность напряжений в зоне № 3  $\sigma_{i №3}$  и отношение  $\sigma_{i №3} / \sigma_{i ном}$  (в дальнейшем  $\sigma_{i окр} / \sigma_{i ном}$ ).

На рисунке 7 представлена зависимость вида  $\sigma_{i oc}^{cp} / \sigma_{i ном} - S_z / \delta$ , благодаря которой изучается взаимодействие дефектов в осевом направлении. На рисунке 6 изображена зависимость вида  $\sigma_{i окр} / \sigma_{i ном} - S_{\Theta} / \delta$ , а также горизонтальная линия, соответствующая величине  $\sigma_{i окр} / \sigma_{i ном}$  одиночной вмятины, с помощью которых изучается взаимодействие дефектов в окружном направлении.

Из графиков рисунка 7 видно, что взаимодействие дефектов в осевом направлении начинает проявляться при  $S_z \leq 5 \cdot \delta$ , так как наблюдается рост значений  $\sigma_{i oc}^{cp} / \sigma_{i ном}$  при уменьшении  $S_z$  начиная с  $S_z = 5 \cdot \delta$ .

Из графиков на рисунке 6 можно сделать вывод, что дефекты взаимодействуют в окружном направлении, когда выполняется неравенство  $S_{\Theta} \leq 5 \cdot \delta$ , поскольку тогда отношение  $\sigma_{i окр} / \sigma_{i ном}$  при рассмотрении комбинации дефектов всегда больше, чем при рассмотрении одиночной вмятины.

Следовательно, получен критерий определения комбинированного дефекта типа «вмятина с потерей металла» (или критерий взаимодействия вмятины и дефекта потери металла) в следующем виде:

$$\begin{cases} S_z \leq 5 \cdot \delta, \\ S_{\Theta} \leq 5 \cdot \delta, \end{cases} \quad (7)$$

где  $S_z$  – минимальное расстояние в осевом направлении между дефектами, мм;  $S_{\Theta}$  – минимальное расстояние в окружном направлении между дефектами, мм;  $\delta$  – толщина стенки трубы, мм.

Если верны оба неравенства (7), то вмятина и потеря металла образуют один комбинированный дефект, то есть вмятина и потеря металла взаимодействуют. Если неверно хотя бы одно неравенство, то вмятину и дефект потери металла следует рассматривать как одиночные.

### Выводы

В работе экспериментально исследованы зависимости тангенциальной относительной деформации, продольной относительной деформации и интенсивности напряжения от внутреннего давления в разных точках области вмятины, находящейся на трубе. Найдены распределения относительных деформаций на наружной поверхности вмятины в осевом и в окружном направлениях трубы. Предлагаются формулы для расчёта средних значений относительных деформаций и интенсивности напряжений в области вмятины в осевом и в окружном направлениях трубы. В ходе экспериментального изучения напряжённо-деформированного состояния образца трубы в области вмятины, взаимодействующей с дефек-

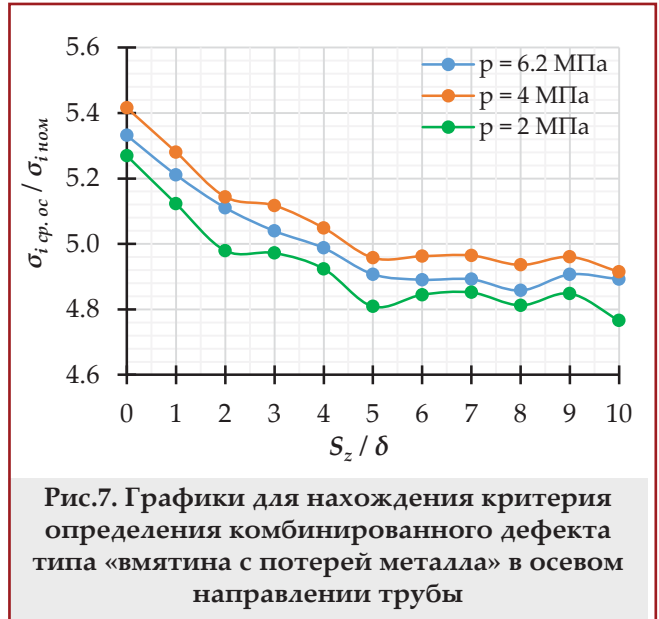


Рис.7. Графики для нахождения критерия определения комбинированного дефекта типа «вмятина с потерей металла» в осевом направлении трубы

том потери металла, был найден критерий определения комбинированного дефекта типа «вмятина с потерей металла».

### Литература

1. В.В.Аладинский, Р.С.Гаспарянц, В.Н.Маханев. Методика расчёта на прочность и долговечность труб с дефектами геометрии // Нефтегазовое дело. – 2007. – Т. 5. – № 5. – С. 119–124.
2. М.В.Закирьянов, Г.Е.Коробков. Коррозионные дефекты газопроводов: моделирование и оценка опасности // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2016. – № 4. – С. 33–39.
3. Ф.М.Мустафин, Т.Р.Мустафин, Э.Р.Абсаламов. Экспериментальные исследования напряжённо-деформированного состояния трубопроводов с дефектами типа вмятина // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2013. – № 1. – С. 23–27.
4. И.Н.Бирилло, А.Я.Яковлев, Ю.А.Теплинский и др. Оценка прочностного ресурса газопроводных труб с коррозионными повреждениями. М.: Центр ЛитНефтеГаз, 2008.
5. В.В.Салюков, В.В.Харионовский. Магистральные газопроводы. Диагностика и управление техническим состоянием. М.: ООО «Издательский дом Недра», 2016.
6. Г.М.Хажинский. Механика мелких трещин в расчётах прочности оборудования и трубопроводов. М.: Физматкнига, 2008.
7. S.Karuppanan, A.S.Aminudin, A.A.Wahab. Burst pressure estimation of corroded pipeline with interacting defects using finite element analysis // Journal of Applied Sciences. – 2012. – No. 12. – P. 2626–2630.
8. B.C.Mondal, A.S.Dhar. Burst pressure assessment for pipelines with multiple corrosion defects. London: Resilient Infrastructure, June 1-4, 2016. – P.STR-953
9. А.А.Игнатик. Экспериментальное и теоретическое исследование деформированного состояния дефектных зон трубопровода // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – Т. 8. – № 2. – С. 147–153.

### References

1. V.V. Aladinsky, R.S. Gasparyants, V.N.Makhanov. Methods of calculating the strength and durability of pipes with geometry defects // Oil and gas business. - 2007. - Vol. 5. - No. 5. - P. 119–124.
2. M.V.Zakiryaynov, G.E.Korobkov. Corrosion defects of gas pipelines: modelling and assessment of danger // Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons. – 2016. – No. 4. – P. 33–39.
3. F.M. Mustafin, T.R. Mustafin, E.R. Absalyamov. Experimental study of stress-strain state pipelines with defects type dent // Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons. – 2013. – No. 1. – P. 23–27.
4. I.N.Birillo, A.Ya.Yakovlev, Yu.A.Teplinskiy, et al. Assessment of the strength resource of gas pipes with corrosion damage. Moscow: TsentrLitNefteGaz, 2008.
5. V.V.Salyukov, V.V.Kharionovskiy. Trunk gas pipelines. Diagnostics and technical condition management. M.: LLC Publishing House Nedra, 2016.
6. G.M. Khazhinsky. Mechanics of small cracks in the equipment and pipelinestrength calculation. M.: Fizmatkniga Publ.; 2008.
7. S.Karuppanan, A.S.Aminudin, A.A.Wahab. Burst pressure estimation of corroded pipeline with interacting defects using finite element analysis // Journal of Applied Sciences. – 2012. – No. 12. – P. 2626–2630.
8. B.C.Mondal, A.S.Dhar. Burst pressure assessment for pipelines with multiple corrosion defects. London: Resilient Infrastructure, June 1-4, 2016. – P.STR-953
9. A.A.Ignatik. Experimental and theoretical investigation of the strain state of the pipeline defective areas // Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation. – 2018. – Vol. 8. – No. 2. – P. 147–153.

## Исследование напряжённно-деформированного состояния трубопровода в области одиночной вмятины и вмятины с дефектом уменьшения толщины стенки

*А.А.Игнатик, А.В.Сальников, А.М.Шарыгин*  
Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия

### Реферат

В статье приведены результаты экспериментального исследования напряжённно-деформированного состояния стенки трубы в области одиночной вмятины и в области вмятины, взаимодействующей с дефектом потери металла. Объектом исследований служил образец трубы (наружный диаметр 114 мм, толщина стенки 4.5 мм, длина 1 м) с искусственно изготовленными дефектами вмятина и потеря металла. Эксперименты проводились на лабораторном стенде, предназначенном для создания внутреннего давления в трубе и измерения относительных деформаций в стенке трубы.

Получены зависимости тангенциальной и продольной относительных деформаций от внутреннего давления для различных точек области вмятины, а также распределения тангенциальных и продольных относительных деформаций в осевом и окружном направлениях трубы в области вмятины.

Рекомендуется критерий определения комбинированного дефекта типа «вмятина с потерей металла».

**Ключевые слова:** вмятина, деформация, интенсивность напряжений, комбинированный дефект, потеря металла.

## Boru kəmərinin tək əzik və divar qalınlığının nazikləşməsi ilə müşaiyət olunan əzik sahələrində gərginlik-deformasiya vəziyyətinin tədqiqi

*A.A. İqnatik, A.V.Salnikov, A.M.Şarıqin*  
Uxta Dövlət Texniki Universiteti, Uxta, Rusiya

### Xülasə

Məqalədə boru divarının tək əzik və əziklə yanaşı boru divarının nazikləşməsi ilə müşaiyət olunan qüsurlu sahələrində gərginlik-deformasiya vəziyyətinin eksperimental tədqiqinin nəticələri göstərilmişdir. Tədqiqat obyektini kimi üzərində süni olaraq əzik və boru divarının nazikləşməsi qüsurları yaradılan boru nümunəsi (xarici diametri 114 mm, divarının qalınlığı 4.5 mm, uzunluğu 1 m) götürülmüşdür. Eksperimentlər boruda daxili təzyiqin yaradılması və boru divarında nisbi deformasiyaların ölçülməsi üçün nəzərdə tutulmuş laboratoriya stendində aparılmışdır.

Əzik sahəsinin müxtəlif nöqtələri üçün tangensial və uzununa nisbi deformasiyaların daxili təzyiqdən asılılıqları, həmçinin əzik sahəsində borunun oxboyu və dairəvi istiqamətlərində tangensial və uzununa nisbi deformasiyaların paylanması əldə edilmişdir. «Divar qalınlığının nazikləşməsi ilə müşaiyət olunan əzik» tipli kombinasiya edilmiş qüsurun təyin edilmə meyarları tövsiyə edilmişdir.

**Açar sözlər:** əzik, deformasiya, gərginliklərin intensivliyi, kombinasiya edilmiş qüsurlar, divar qalınlığının nazikləşməsi.