

Дмитриенко Р. И. Ведущий инженер-технолог ИЭС им. Е. О. Патона, (г. Киев).

Анализ результатов испытаний до разрушения гидравлическим давлением цилиндрического образца трубы с дефектом.

Ключевые слова: труба, дефект, деформация, внутреннее давление, испытания, несущая способность.

Представлены результаты испытаний внутренним гидравлическим давлением вплоть до разрушения, цилиндрического образца с днищами имеющим искусственный на наружной поверхности дефект. Приведена экспериментальная проверка коэффициента несущей способности.

1. Испытания.

Статическим испытаниям внутренним гидравлическим давлением до разрушения подвергся образец с дефектом, изготовленный из бесшовной горячедеформированной трубы 219×6, сталь 20. Труба произведена на ОАО «ИНТЕРПАЙП НИЖНЕДНЕПРОВСКИЙ ТРУБОПРОКАТНЫЙ ЗАВОД» в соответствии с ГОСТ 8732-78 и ГОСТ 8731-74 п. 1.2. Испытания проводились институтом электросварки им. Е. О. Патона (г. Киев), в рамках проекта: Marie Curie, SP-3 People «INNOPIPES», 7-й рамочной программы ЕС, грант PIRSES-GA-2012-318874. Условное сквозное обозначение образца: I2.

Из трубы была вырезана гильза длиной около одного метра, на гильзе механическим путем - фрезерование на станке с ЧПУ, был нанесен дефект, после изготовления дефекта, к гильзе были приварены плоские днища толщиной по 32 мм.

Параметры образца и дефекта до проведения испытаний.

Средняя длина гильзы, замеренная по нескольким образующим, составила 947,25 мм. Среднее расстояние между внутренними поверхностями торцов, после их приварке к гильзе, составило 953,25 мм. На расстоянии порядка 45 мм от границ дефекта были выделены сечения I и II (см. рисунок 1, 2). Первоначальные значения наружных периметров $P_{нар}$, сечений I и II составили по 692,3 мм. Отсюда эквивалентный наружный диаметр согласно

[1], равен: $D_H = \frac{P_{нар}}{3,1416} - 2h_{рул} - 0,2 = 219,77 \text{ мм}$, где $h_{рул}$ - толщина рулетки, в нашем случае

равна 0,2 мм. Толщина стенки гильзы и дефекта замерялась ультразвуковым толщиномером ТУЗ-2 с погрешностью $\pm 0,1$ мм. Первоначальные значения толщины стенки в сечениях составили, (min/средняя/max), I: 6,4/6,76/7,3 мм, II: 6,1/6,76/7,3 мм. Первоначальная средняя толщина стенки в дефекте - 2,70 мм, вокруг дефекта - 6,59 мм, и она незначительно отличается от средней по сечениям, по которой и производятся дальнейшие расчеты (6,76). Внутренний объем, определенный через разницу в весе пустого и заполненного водой образца I2, составил $31,9 \pm 0,1$ л. Линейные размеры дефекта вдоль оси и поперек: 133×102 мм. Ширина дефекта по наружному контуру трубы - 106 мм. Длина бездефектной части окружности образца по уровню середины дефекта: 586 мм.

Процесс проведения испытаний.

Гидравлические испытания проводились при температуре воды порядка $12,5 \pm 1$ °С. Нагружение образца внутренним гидравлическим давлением, производилось этапами, давление каждого последующего этапа, было выше, чем предыдущего. На каждом этапе производилась выдержка под давлением (0,5...4 мин.), необходимая для стабилизации, а на начальных этапах для измерения деформаций. После каждого этапа давление сбрасывалось до нуля.

Деформации в дефекте и в бездефектной части трубы измерялись посредством тензорезисторов с базой 10 мм, наклеенных в кольцевом и осевом направлениях. Тензорезисторы в дефекте и в бездефектной части трубы находились на одной «образующей». После незначительных пластических деформаций в зоне дефекта, все тензорезисторы были удалены. В дальнейшем определялись только остаточные (после сброса давления) кольцевые и осевые деформации в зоне дефекта - по изменению расстояния между точками, нанесенными на его наружную поверхность методом кернения. Расстояния между точками измерялись гибкой линейкой путем сопряжения с поверхностью дефекта. Первоначальные базы составляли, для кольцевого направления: 44,8 мм, для осевого: 44,6. Также измерялись линейные размеры дефекта.

Результаты испытаний.

В процессе испытаний, после разгрузки в конце этапов уже со снятыми тензорезисторами, а также после разрушения образца, остаточных деформаций осевого размера дефекта и осевой базы нанесенной методом кернения не обнаружено. Изменение соответствующих кольцевых размеров приведено в таблице 1 и на рисунке 7. Наряду с измерением размеров дефекта за исключением последнего этапа измерялся вес образца (наполненного водой) - изменений тоже не зафиксировано, т.е. остаточный объем образца значительно не изменился, по крайней мере, если эти изменения и были, то менее 0,1 л. После разрушения образца, изменений наружных периметров в сечениях I и II, и толщин стенки в этих сечениях не зафиксировано. Также не обнаружено изменения длины бездефектной части окружности образца по уровню середины дефекта.

После нагружения давлением 11,78 МПа (этап № 10), центральная часть дефекта достигла уровня образующей образца, (см. рис. 3). После давления 13,49 МПа (этап № 11), центральная часть дефекта поднялась над уровнем образующей около 2 мм.

Давление разрушения образца I2 составило: $P_B = 13,83$ МПа. Разрушение произошло по минимальным толщинам в зоне дефекта. После разрушения образца, замеренная штангенциркулем толщина стенки дефекта по линии разрыва составила 1,7 ... 2,2 мм, средняя толщина стенки в дефекте составила - 2,44 мм, вокруг дефекта не изменилась.

Размеры кольцевой базы и ширины дефекта, измеряемые после этапов тензометрирования, приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Изменение параметров дефекта, образца I2, мм.

После этапа №	P, МПа	Кольцевая база	Ширина дефекта
0	0	44,8	102
9	9,64	44,8	102
10	11,78	45,9	-
11	13,49	47,2	107,2
12	13,83	47,2	110

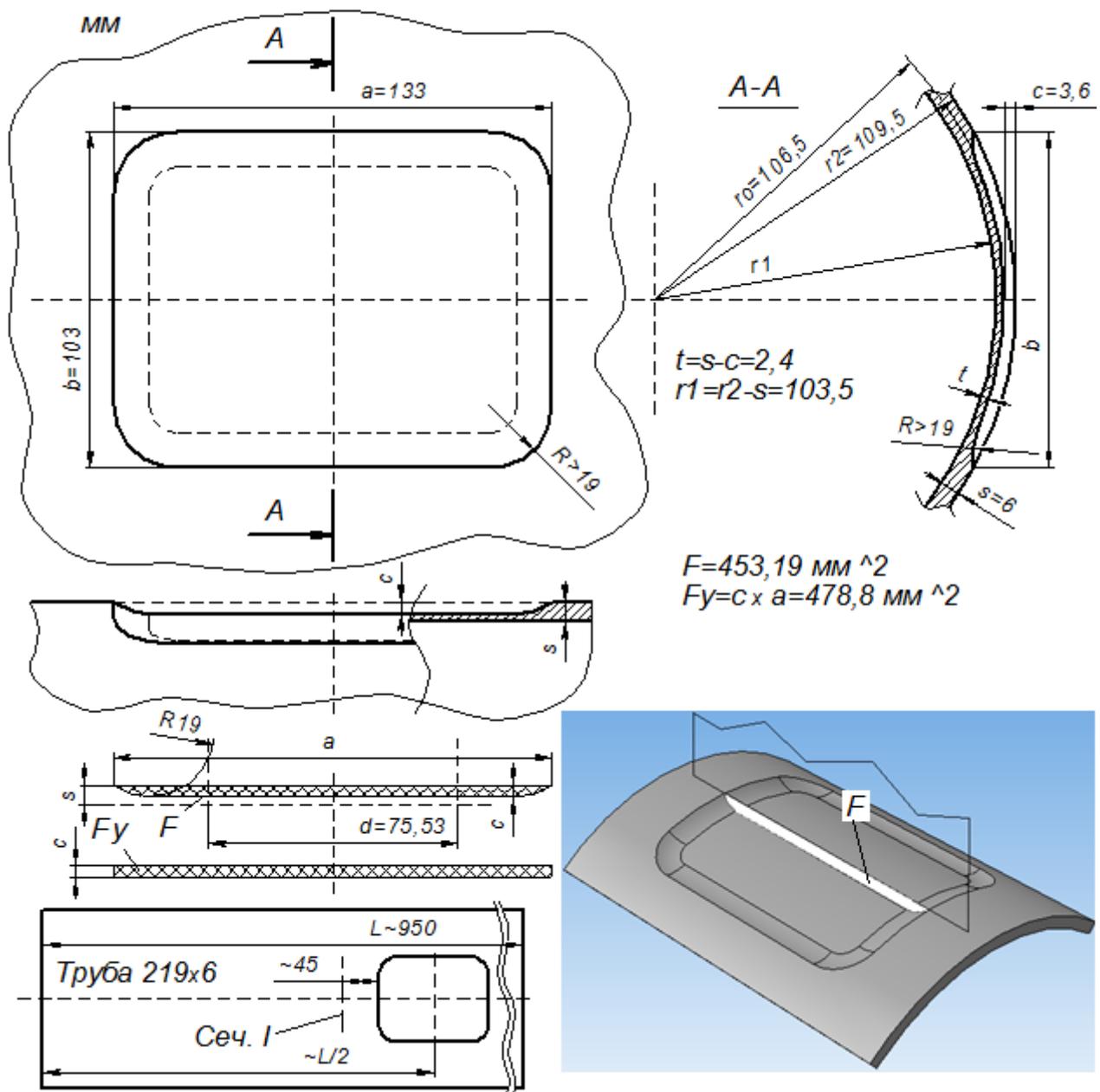


Рисунок 1 - Обозначения и номинальные размеры образца I2, и дефекта изготавливаемого на нем.

Безразмерные параметры дефекта согласно API 579 определяются по формулам: для глубины: $\lambda_c = \frac{c}{s}$, ($c=s-t$), для длины: $\lambda_a = 1,258 \frac{a}{\sqrt{2r_2s}}$, для ширины: $\lambda_b = 1,258 \frac{b}{\sqrt{2r_2s}}$. Для номинальных размеров дефекта на образце I2, эти параметры равны $\lambda_c=0,6$, $\lambda_a=4,71$, $\lambda_b=3,65$. Глубина дефекта соответствует 60 % коррозии. Учитывая рассчитанный эквивалентный наружный диаметр, средние толщины стенки в дефекте и вокруг дефекта, имеем фактические значения безразмерных параметров дефекта для образца I2: $\lambda_c=0,59$, $\lambda_a=4,49$, $\lambda_b=3,44$.

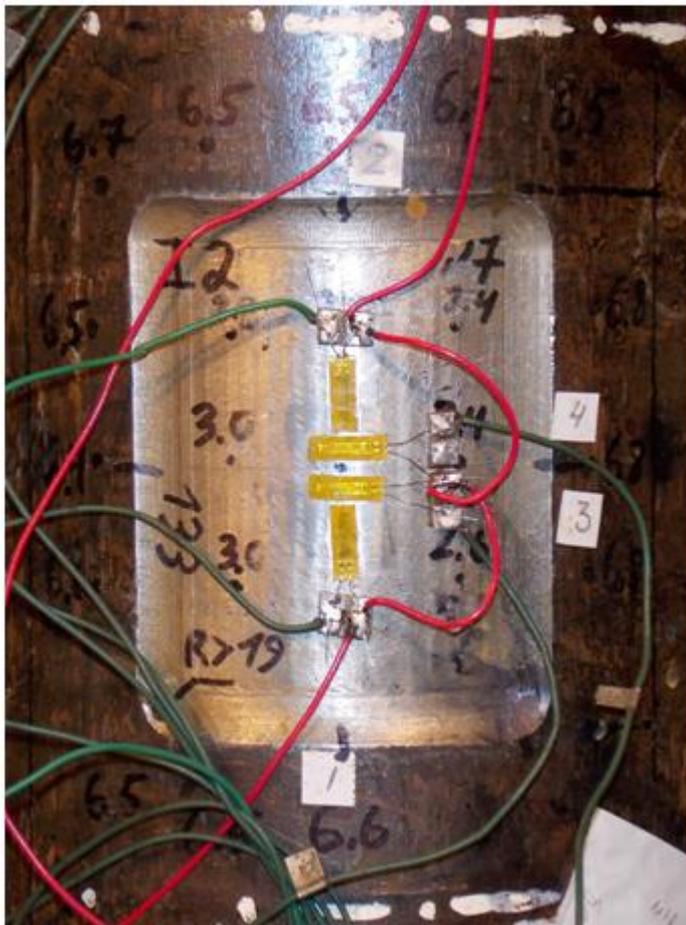


Рисунок 2 - Фото образца I2 с установленными на него тензорезисторами, (т/р).



Рисунок 3 - Фото дефекта образца I2 после нагружения давлением 11,78 МПа, (этап № 10).

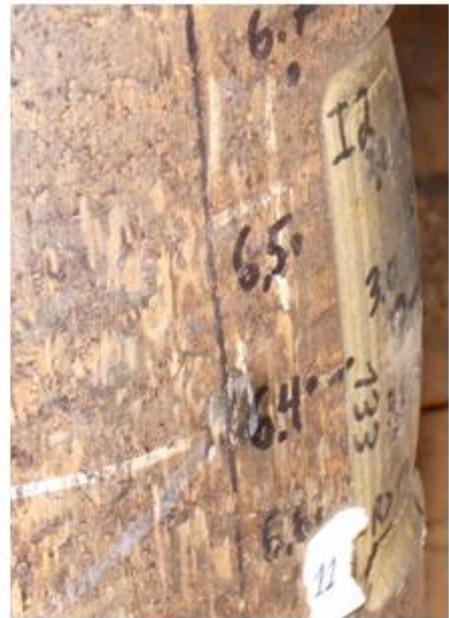


Рисунок 4 - Фото дефекта образца I2 после нагружения давлением 13,49 МПа, (этап № 11, предпоследний).



Рисунок 5 - Фото образца I2 после разрушения, (этап № 12), и сечение дефекта после вырезки.

На рисунке 6а приведены этапы нагружения внутренним давлением исследуемого образца с дефектом (I2). Диаграммы зависимости давления от времени построены исходящими из нуля. Начало каждого этапа - нагружение. Горизонтальные участки - процесс выдержки под давлением, обрезаны по уровню $t=1$ мин. Небольшой наклон линии нагружения каждого этапа перед максимальным давлением - инерция насоса после его выключения. На рисунке 6б приведена полная диаграмма нагружения такого же образца, но без дефекта (I1). Поскольку нагружение обоих образцов происходило через систему ресиверов - сосудов высокого давления устанавливаемых между насосом и объектами испытаний, для увеличения объема и, следовательно, для уменьшения скорости нагружения, то на рисунке отдельно показана диаграмма нагружения ресиверов без образцов. Из рисунка 6б видно, что образец с дефектом обладает большей объемной податливостью, чем образец без дефекта, хотя по внутреннему объему он немногим меньше, (внутренний объем образца без дефекта 32 л).

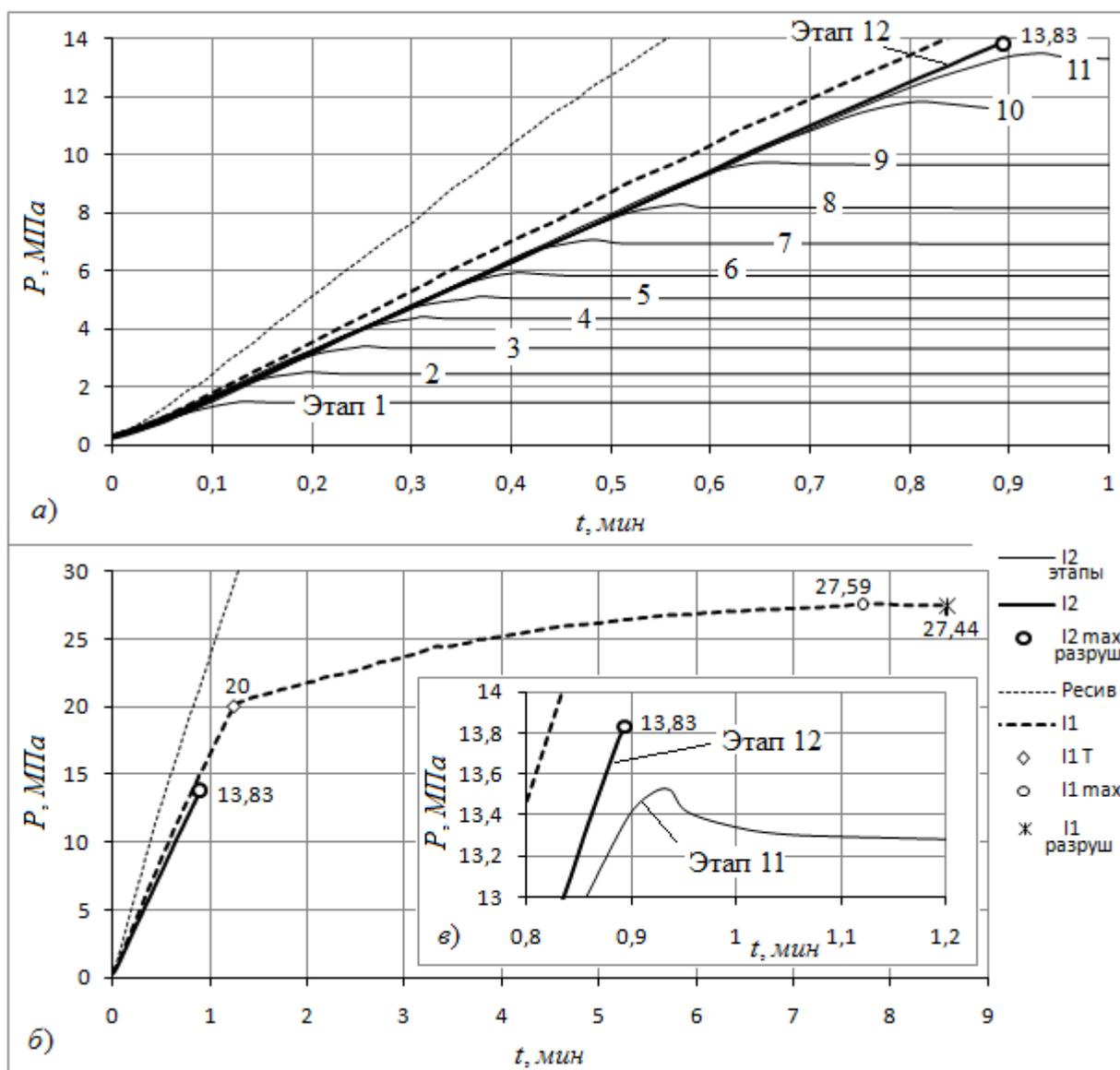


Рисунок 6 - а) Этапы нагружение внутренним давлением образца с дефектом. б) Сравнение с диаграммой нагружения образца без дефекта. в) Предпоследний и последний этапы, (увеличено).

Упругие деформации в дефекте и трубе, определенные посредством тензометрирования, приведены на рисунке 7.

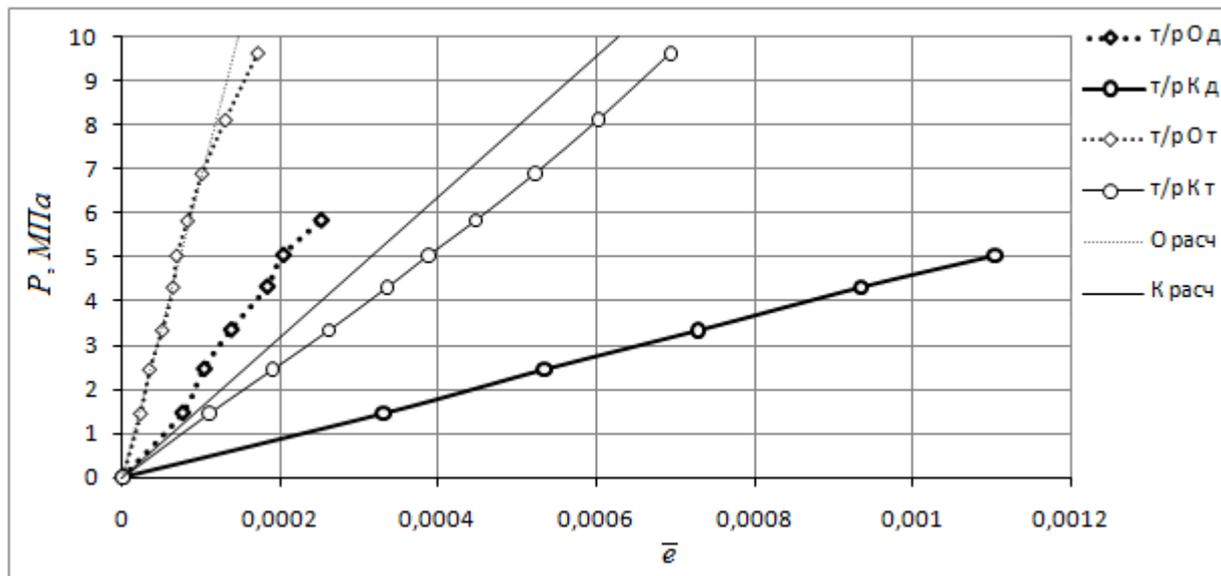


Рисунок 7 - Упругие деформации в дефекте и трубе.

Отношение кольцевых к осевым деформациям в дефекте и в бездефектной части трубы близки между собой и составляют в среднем 5,1. Отношение кольцевых деформаций в дефекте к кольцевым деформациям в бездефектной части трубы, близко к такому же отношению в осевом направлении, колеблется в интервале 2,7...3,1, и в среднем составляет 2,9, (см. рисунок 8, линия Исп.). Следует заметить, что отношение средней толщины стенки трубы к средней толщине стенки в дефекте составляет 2,5, а к минимальной 2,82.

Упругие деформации в осевом направлении для бездефектной части трубы, совпадают с расчетными, для наружной поверхности толстостенных цилиндрических оболочек имеющих днища, с использованием зависимостей Ляме [2]. Бралась эквивалентный наружный диаметр, средняя толщина стенки по сечениям и модуль упругости равный 2×10^5 МПа. С использованием зависимостей Ляме [2], можно показать, что независимо от параметров трубы с днищами, отношение кольцевых к осевым деформациям, на наружной поверхности,

равно: $\frac{\bar{\epsilon}_t}{\bar{\epsilon}_z} = \frac{2-\mu}{1-2\mu}$, а при $\mu=0,3$, равно 4,25. Расчетные кольцевые деформации для

внутренней поверхности, больше чем для наружной, осевые одинаковы. Фактические деформации в кольцевом направлении бездефектной части трубы немногим больше расчетных, в среднем на 21 %, по всей вероятности это связано с несовершенством формы трубы. Несовершенство формы неким образом перешло и на поверхность дефекта. Интересно отметить, что если в расчете с использованием зависимостей Ляме, вместо средней толщины трубы, брать среднюю толщину стенки в дефекте, при сохранении того же наружного диаметра, то расчетные осевые деформации близки к фактически измеренным в дефекте, (см. рисунок 8). На рисунке 8 приведена расчетная кривая отношения одноименных деформаций наружной поверхности, для случая уменьшения толщины стенки при постоянном наружном радиусе. Кривая отношения, для кольцевых и для осевых деформаций одна и та же. Уменьшение толщины стенки характеризуется коэффициентом k , т.е. текущая толщина стенки равна: $s_t = ks$.

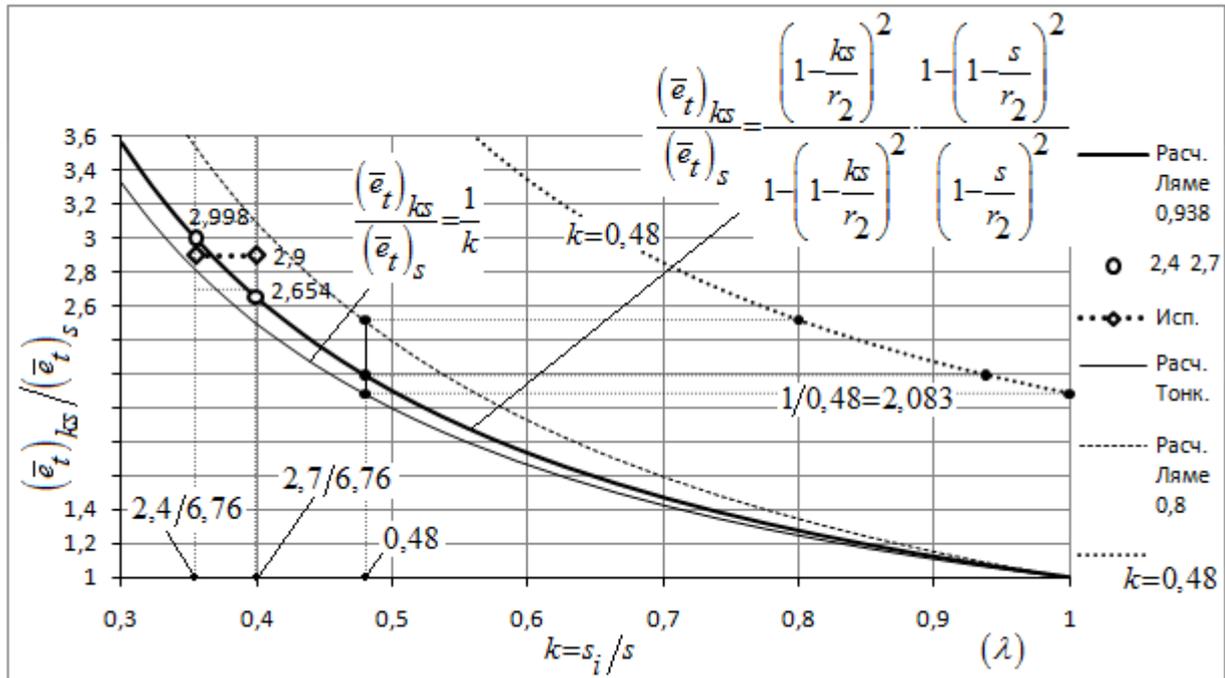


Рисунок 8 - Зависимость увеличения деформаций от уменьшения толщины стенки.

В случае представления трубы с днищами как тонкостенной оболочки, кольцевые и осевые деформации можно выразить следующим образом:

$$\bar{e}_t = \frac{1}{E}(\sigma_t - \mu\sigma_z) = \frac{\sigma_t}{E} \left(1 - \frac{\mu}{2}\right) = \frac{Pr_2}{sE} \left(1 - \frac{\mu}{2}\right),$$

$$\bar{e}_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \mu\sigma_t) = \frac{\sigma_t}{E} \left(\frac{1}{2} - \mu\right) = \frac{Pr_2}{sE} \left(\frac{1}{2} - \mu\right)$$

где осевые напряжения равны половине от кольцевых: $\sigma_z = 0,5 \cdot \sigma_t$, а кольцевые напряжения взяты с «запасом» $\sigma_t = Pr_2/s$. Отсюда видно, что отношение одноименных деформаций, что в кольцевом, что в осевом направлениях, при уменьшении толщины стенки ($s_i = ks$), равно $1/k$, (см. рисунок 8, линия Расч. Тонк.).

Вводя параметр толстостенности $\lambda = r_1/r_2$, (откуда $s/r_2 = 1 - \lambda$), можно показать, что отношение одноименных деформаций наружной поверхности, для случая уменьшения

толщины стенки при постоянном наружном радиусе, равно:
$$\frac{(\bar{e}_t)_{ks}}{(\bar{e}_t)_s} = \frac{(1 - k(1 - \lambda))^2}{1 - (1 - k(1 - \lambda))^2} \cdot \frac{1 - \lambda^2}{\lambda^2}$$

при $\lambda \Rightarrow 1$, это выражение стремится к $1/k$, причем при λ близких к единице, почти линейно, (см. рисунок 8), для примера приведены результаты при $k=0,48$, где λ по оси абсцисс с той же шкалой, как и для k .

Для нашего образца с дефектом (I2): $\lambda = \frac{r_1}{r_2} = \frac{r_2 - s}{r_2} = 1 - \frac{s}{r_2} = 0,938$. На

рисунке 8 также показан расчет для некой трубы с днищами при $\lambda=0,8$.

Упругие и пластические деформации дефекта приведены на рисунке 9. Также на нем приведены диаграммы растяжения (К, О), и действительные диаграммы деформирования (K_i , O_i), образцов вырезанных в кольцевом и осевом направлениях из той же трубы, из которой вырезалась и гильза для образца I2.

Начало пластических деформаций в дефекте в кольцевом направлении соответствует уровню начала пластических деформаций образца растяжения. Резкое изменение угла наклона зависимости деформации - давление в осевом направлении, (см. рисунок 9), произошло при начале пластических деформаций в кольцевом направлении, и связано это, по всей вероятности, с изгибом при образовании выпучивания.

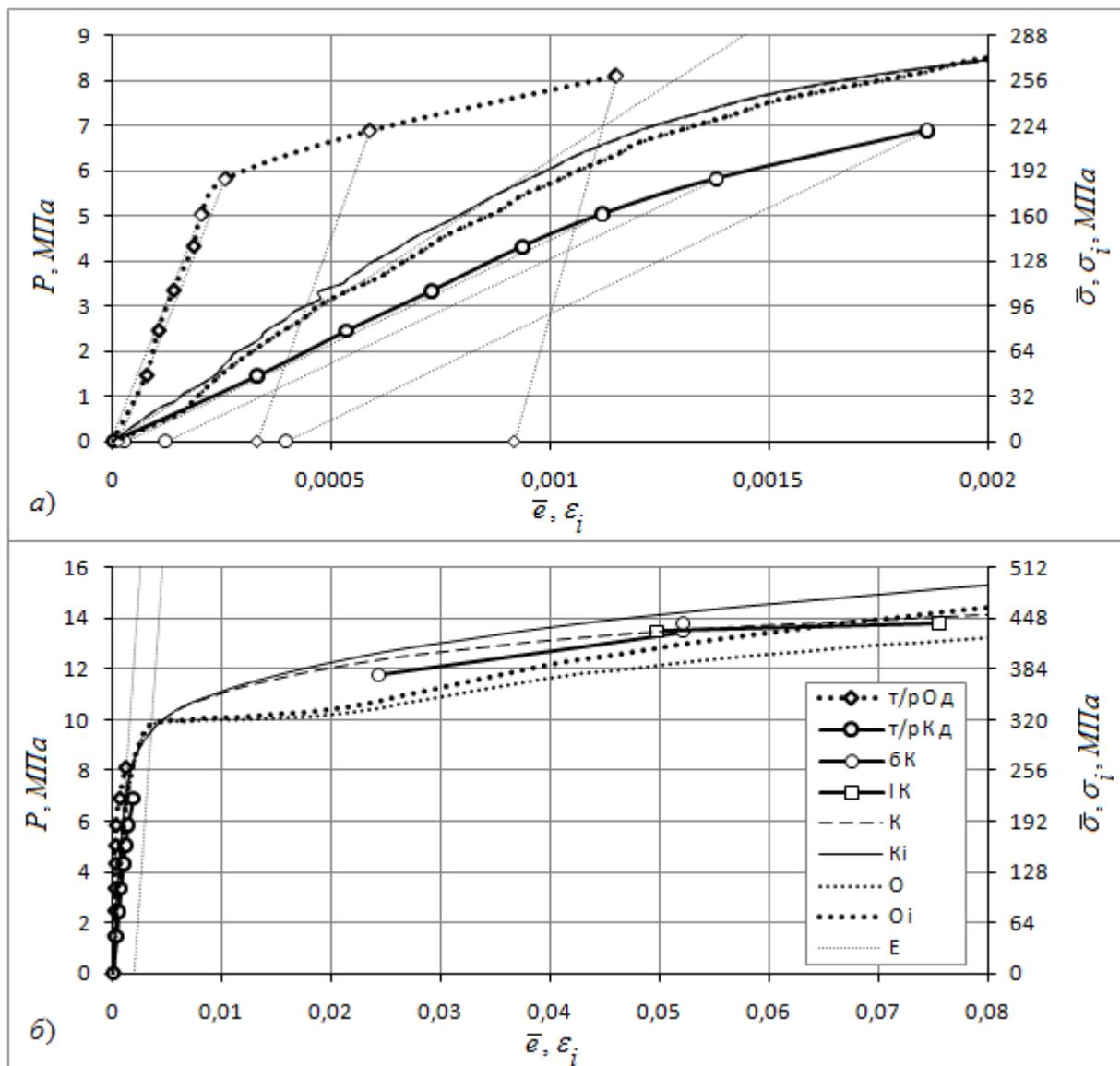


Рисунок 9 - Упругие и пластические деформации дефекта.

Логарифмическая деформация средних толщин стенки в дефекте, после разрушения образца составила $\epsilon_s = -0,099$. Максимальная по модулю - ближе к линии разрыва $\epsilon_s = -0,134$.

2. Снижение несущей способности дефекта.

Естественно, что наличие дефекта неким образом будет снижать статическую прочность трубы с днищами. Предельное, (разрушающее) давление для трубы с дефектом, можно

выразить следующим образом: $P_B^* = P_B \varphi$, где: $P_B = \frac{\bar{\sigma}_B s}{r_o}$ - разрушающее давление для бездефектной трубы с днищами; φ - коэффициент снижения несущей способности при статическом нагружении до разрушения; $\bar{\sigma}_B$ - временное сопротивление; r_o, s - первоначальные значения срединного радиуса и толщины стенки трубы.

Коэффициент φ , для случая неукрепленного отверстия диаметром d , можно определить по методикам атомных норм [3], которые распространяются на трубные стали, обладающие достаточной пластичностью: $\varphi = \frac{2}{\frac{d}{\sqrt{2r_o s}} + 1,75}$. Согласно приведенным там

положениям, вводится понятие предельного значения диаметра d_o неукрепленного отверстия в цилиндрической стенке трубы, при котором, (и меньше которого) не происходит снижения статической прочности, при нагружении внутренним давлением. Если $\varphi=1$, следовательно, $d_o = 0,25\sqrt{2r_o s}$.

Согласно [4] для несквозных и не трещиноподобных дефектов, в качестве d берется диаметр условного отверстия d_y , рассчитываемый из равенства площадей сечения условного отверстия по его оси и максимальной площади дефекта в осевом сечении трубы F . В целях упрощения, и, отдавая предпочтение заведомо консервативным результатам, рекомендуют площадь брать как условную площадь: F_y - площадь прямоугольника - общая длина дефекта на максимальную глубину дефекта. Данная методика имела экспериментальную проверку при φ близких к единице. Согласно методике, ширина дефекта не влияет на φ , а длина дефекта в осевом направлении должна быть менее $8\sqrt{r_o s}$.

Из вышеизложенного: $\varphi = \frac{2}{\frac{d_y}{\sqrt{2r_o s}} + 1,75} = \frac{2}{\frac{F}{s\sqrt{2r_o s}} + 1,75}$, где $d_y = F/s$. Длина нашего дефекта

удовлетворяет требованиям.

Согласно материалам, изложенным в статье И. В. Орыняка [5], если ширина дефекта, (размер в направлении перпендикулярном оси) меньше чем $2\sqrt{r_1 s}$, то она слабо влияет на предельное состояние, и коэффициент снижения несущей способности равен:

$\bar{\varphi} = \left(1 + \frac{a^2 c (s-c)}{2r_1 s^3}\right) / \left(1 + \frac{a^2 c}{2r_1 s^2}\right)$. Здесь не рассматривается понятие диаметра неукрепленного

отверстия, и при любом малом дефекте, коэффициент снижения статической прочности уже начинает уменьшаться, поэтому коэффициент $\bar{\varphi}$ по этой зависимости можно считать справочным, тем более что ширина нашего дефекта значительно превышает допустимую.

Для условно больших дефектов, имеющих значительную длину и ширину, коэффициент снижения несущей способности берется как относительная толщина нетто-сечения в дефекте: $\varphi^* = t/s$.

Результаты расчетов коэффициента снижения несущей способности при статическом нагружении до разрушения по вышеуказанным методикам приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Результаты расчетов коэффициента снижения несущей способности при статическом нагружении до разрушения.

Параметр.	Номинал.	Факт I2	(Факт I3)*
Наружный диаметр D_H , мм	219	219,77	220,15
Средняя толщина стенки трубы s , мм	6	6,76	6,76
d_o , мм	8,94	9,49	9,5
$8 \cdot \sqrt{r_o \cdot s}$, мм	202,23	214,66	214,85
$2 \cdot \sqrt{r_1 s}$, мм	49,84	52,81	52,85
Расчет по средней толщине стенки в дефекте			
Толщина стенки в дефекте, средняя, t , мм	2,4	2,7	2,82
F , мм ²	453,19	-	-
d_y по F , мм	75,53	-	-
φ по F	0,518	-	-
F_y , мм ²	478,8	539,98	524,02
d_y по F_y , мм	79,8	79,88	77,52
φ по F_y	0,502	0,519	0,528
$\bar{\varphi}$	0,463	0,469	0,487
φ^*	0,400	0,399	0,417
Расчет по минимальной толщине стенки в дефекте			
Минимальная толщина стенки в дефекте, t , мм	-	2,4	2,3
F_y , мм ²	-	579,88	593,18
d_y по F_y , мм	-	85,78	87,75
φ по F_y	-	0,499	0,493
$\bar{\varphi}$	-	0,453	0,459
φ^*	-	0,355	0,340

* - результаты для образца I3, на котором планируется установка композиционного бандажа.

Экспериментально определенный коэффициент снижения несущей способности, как давление разрушения образца с дефектом, отнесенное к максимально реализовавшемуся давлению образца без дефекта, составил: $\varphi = \frac{13,83}{27,59} = 0,501$, (см. рисунок 6). При более низкой скорости нагружения образца с дефектом, его давление разрушения могло бы оказаться несколько меньше, для оценки возьмем максимальное давление предпоследнего этапа, отсюда $\varphi = 0,490$. В итоге, принимаем фактический коэффициент снижения несущей

способности: $\varphi=0,50_{-0,01}$. Образец с дефектом (I2) отличается от образца без дефекта (II) по наружному диаметру на минус 0,17 %, а по средней толщине стенки на плюс 0,45 %.

Как видно из таблицы 2, расчет коэффициента снижения несущей способности по условной площади при минимальной толщине стенки в дефекте, как и рекомендуется в [4], почти совпадает с результатами эксперимента, хотя он и значительно меньше единицы.

В НД для СНГ [6, 7], в качестве единственного критерия допустимости дальнейшей эксплуатации, рассматривают толщину стенки трубопровода в зоне эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) равную 0,85 от расчетной толщины стенки, что является по всей вероятности, не совсем объективным. Независимо от коэффициента снижения несущей способности, исключить возможность появления сквозного дефекта, вызванного ЭКИ, целесообразно ограничивать минимально допустимую толщину стенки трубы в зоне ЭКИ значением 0,3 от расчетной толщины стенки, [4].

Для дефектов также определяют коэффициент концентрации напряжений при упругой работе, влияющий на циклическую прочность.

3. Связь с безразмерными параметрами дефекта.

Безразмерные параметры дефектов $\lambda_c, \lambda_a, \lambda_b$, см. выше, определяются по API 579.

Продолжая характеризовать уменьшение толщины стенки в дефекте коэффициентом k , имеем: $k = \frac{t}{s} = \varphi^* = 1 - \lambda_c$, а коэффициент снижения несущей способности можно выразить следующим образом:

$$\varphi = \frac{2}{\frac{\lambda_a \lambda_c \sqrt{2r_2 s}}{1,258 \sqrt{2r_o s}} + 1,75} = \frac{2}{\frac{\lambda_a \lambda_c \sqrt{r_2}}{1,258 \sqrt{r_o}} + 1,75} = \frac{2}{\frac{\lambda_a \lambda_c}{1,258 \sqrt{1-0,5(1-\lambda)}} + 1,75}.$$

Выводы.

- Упругие деформации в дефекте близки к расчетным, если за толщину стенки трубы брать толщину стенки в дефекте и наружный диаметр трубы.

- Пластических деформаций дефекта в осевом направлении не происходит.

- Экспериментально определенный коэффициент снижения несущей способности совпадает с расчетным.

Использованные источники:

- ГОСТ 10706-76 - Трубы стальные электросварные прямошовные. Технические требования.
- Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.; Отв. ред. Писаренко Г. С. - 2-е изд., перераб. и доп. - Киев: Наук. думка, 1988. - 736 с. - ISBN 5-12-000299-4.

3. ПНАЭ Г-7-002-86. Правила и нормы в атомной энергетике. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных и энергетических установок. - Введ. 01.07.87 с измен. - М.: Энергоиздат, 1989. - 524 с.
4. Оценка прочности и ресурса трубопроводов с эрозионно-коррозионными повреждениями / Э. Ф. Гарф, М. А. Нетребский // Автомат. сварка. - 2000. - № 9/10. - С. 15-20. - Библиогр.: 9 назв. - рус. УДК 621.125.16.
5. Расчет на прочность разъемной муфты на трубе с дефектом / И. В. Орыняк, С. А. Охримчук, Л. И. Венгловский, В. А. Стрижало, С. М. Агеев, С. П. Чуйков, Э. В. Чечин, А. В. Богдан // Проблемы прочности: Междунар. научно-техн. журнал. - 2009. - № 2. - С. 102-111, ISSN 0556-171X. УДК 539.4.
6. Противоаварийный циркуляр № Ц-02-89. - Введ. 01.01.89.
7. Эксплуатационный циркуляр № Ц-01-86. - Введ. 17.02.86.

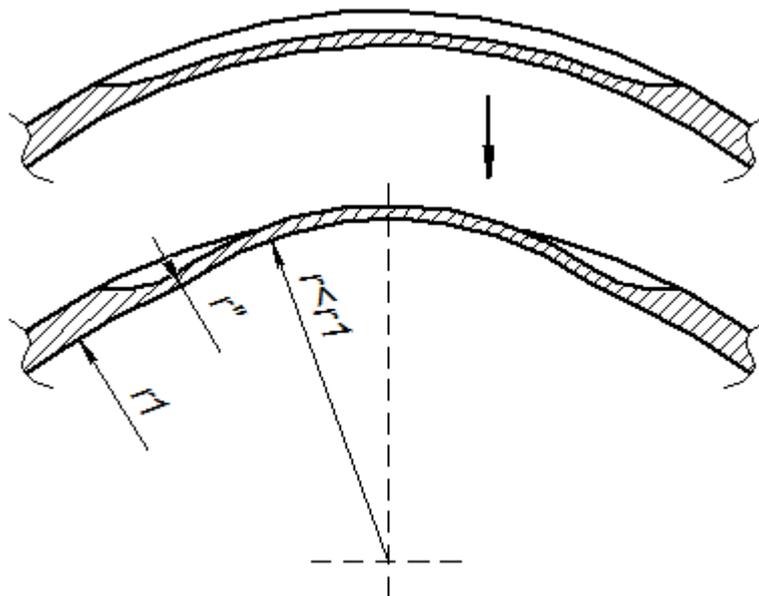


Рисунок - Пластическая деформация дефекта.