



ГИДРОИСПЫТАНИЯ ТРУБНЫХ СЕКЦИЙ С КОРРОЗИОННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ В РЕЖИМЕ МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

П.С.ЮХИМЕЦ, А.А.РЫБАКОВ, В.А.НЕХОТЯЩИЙ, Т.Н. ФИЛИПЧУК

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

Рассмотрены особенности развития эксплуатационных коррозионных дефектов трубопроводов при малоцикловом режиме нагружения внутренним давлением. Гидравлические испытания поврежденных труб выполняли на стенде. Напряженно-деформированное состояние образцов при нагружении внутренним давлением исследовали на основании расчетов методом конечных элементов. Выявлено, что влияние размеров дефекта на статическую прочность и концентрацию напряжений (циклическую прочность) различно, поскольку степень снижения статической прочности определяется, в первую очередь, длиной и глубиной дефекта, а его влияние на коэффициент концентрации напряжений зависит, кроме того, и от ширины. Расчет долговечности основывался на результатах анализа напряжений и нормативных показателях механических свойств материала. Оценка выполнялась с использованием усталостной кривой с введенными коэффициентами запаса по условным напряжениям $n_\sigma - 2$, количеству циклов $n_N - 20$. Полученные результаты показали, что эксплуатация испытываемых труб при допустимом расчетном давлении небезопасна. Циклические испытания натуральных образцов подтвердили возможность малоциклового разрушения в зоне коррозионных дефектов в период эксплуатации трубопровода вследствие возникновения продольной усталостной трещины на поверхности повреждения. Установлено, что малоцикловая прочность трубопровода определяется уровнем местных циклических деформаций в дефекте, который зависит от его размеров и параметров эксплуатационной нагрузки. Библиогр. 8, табл. 6, рис. 6.

Ключевые слова: трубопроводы, коррозионные дефекты, гидравлические испытания, малоцикловая прочность

Коррозия, протекающая в условиях периодического изменения внутреннего давления от атмосферного до давления перекачивания продукта [1], является основной причиной отказов нефтепроводов [2]. В связи с этим проведено изучение особенностей развития эксплуатационных коррозионных повреждений при малоцикловом режиме нагружения.

Для проведения гидравлических испытаний эксплуатирующая организация предоставила отрезки труб с коррозионными повреждениями, вырезанные из нефтепроводов: бесшовной D273×9 длиной 1000 мм, а также прямошовной D530×8 длиной 5500 мм (табл. 1).

Взаиморасположение, внешний вид и размеры дефектов представлены на рис.1,2 и в табл.2.

Проведенные испытания стандартных образцов не выявили существенных изменений характеристик механических свойств основного металла и металла продольного шва исследованных труб под воздействием эксплуатационных нагрузок на протяжении всего срока эксплуатации. Уровень показателей прочности, пластичности и вязкости

основного металла труб, а также металла продольного сварного соединения является типичным для труб производства 1960-х годов и отвечает требованиям как нормативных документов, по которым они изготовлялись, так и современных действующих нормативных документов [3-5].

Металлографический анализ макро- и микрошлифов, вырезанных из различных участков основного металла и сварных соединений, также не зафиксировал существенных изменений структурных характеристик материала исследованных труб под воздействием эксплуатационных нагрузок на протяжении 43...50 лет. Металл трубы D273 имеет структурные характеристики, присущие стали такого класса: ферритно-перлитная структура с 7-8 номером ферритного зерна [6], значительная загрязненность неметаллическими включениями (рис.3,а). Структура основного металла и металла продольного сварного соединения образца D530 типична для труб, которые изготавливались на Харцызском трубном заводе в 1960-е годы с применением горячей обработки: нагрев до

Таблица 1. Характеристики испытуемых труб

Номинальное значение		Материал	Рабочее давление P_p , МПа	Расчетное давление разрушения P_r , МПа	Срок эксплуатации T_s , лет	Количество циклов в месяц N_m
Наружный диаметр D_n , мм	Толщина стенки h , мм					
273	9	Сталь 20	4,1	25,9	~50	3-4
530	8	МК (10Г2СД)	4,8	16,4	43	2

© П.С.Юхимец, А.А.Рыбаков, В.А.Нехотящий, Т.Н. Филипчук, 2013



Рис. 1. Труба D273 с указанными расстояниями между дефектами – центрами пересечения диагоналей, очерченных вокруг них прямоугольников

температуры 910 ± 20 °С и последующая горячая правка (рис.3, б).

Для проведения испытаний к испытательным образцам D273 и D530 должным образом были присоединены доньшки, патрубки подачи воды, контрольная и измерительная аппаратура. Гидравлическое испытание выполняли в специальном стенде с применением гидроагрегата ПТ-1-1-400 с производительностью 1000 л/ч. В качестве рабочей среды использовали воду с температурой не ниже +10 °С. Управление процессом гидроиспытания осуществлялось в автоматическом режиме. Период одного цикла нагружения образца D273 составлял 35...40 с, образца D530 – около 90 с. Схема нагружения образцов представлена в табл.3. На последнем этапе нагружения образца D273 после 2060 циклов при давлении 20 МПа произошло его разрушение в результате появления сквозной трещины усталости на

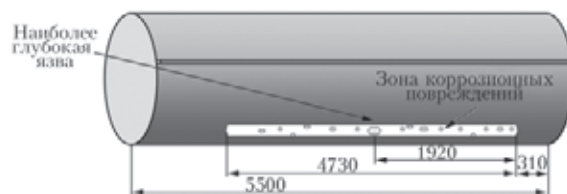


Рис. 2. Схема расположения зоны коррозионного повреждения трубы D530

дне язвы V. Испытания образца D530 было прекращено на 1100-м цикле из-за истечения воды сквозь трещину усталости длиной 25 мм, образовавшейся в зоне язвы глубиной 6 мм (рис.4).

Напряженно-деформированное состояние образцов при нагружении внутренним давлением исследовалось на основании расчетов МКЭ. Для проведения расчетов были построены соответствующие геометрические модели. Некоторые результаты расчета НДС образцов представлены на рис.5.

Оценка влияния рассматриваемых дефектов на величину разрушающего давления P_f при статическом нагружении была выполнена с использованием данных работы [7]. Результаты расчета разрушающего давления представлены в табл.2. Расчет прочности трубы D273 проводился для каждого из дефектов как для одиночного (без учета взаимовлияния). Здесь же приведены значения коэффициента концентрации напряжений (ККН) α_σ в дефектах, вычисленные на основании расчета упругих напряжений МКЭ.

Как следует из таблицы, каждый из пяти дефектов

Таблица 2. Параметры дефектов

Диаметр трубы, мм	Номер дефекта	Размеры дефекта: $2c \times 2d \times b$, мм*	Разрушающее давление $P_{др}$, МПа	Коэффициент снижения прочности φ^{**}	Коэффициент концентрации напряжений α_σ
273	I	74×63×5,2	21,6	0,80	3,86
	II	24×35×4,0	25,5	0,95	2,04
	III	19×20×4,0	26,0	0,97	2,24
	IV	17×20×5,0	25,9	0,96	2,37
	V	68×45×7,5	23,2	0,86	4,80
530	–	60×15×6,0	12,3	0,75	5,49

Примечания: * $2c$ – длина; $2d$ – ширина; b – глубина дефекта; ** $\varphi = P_{др}/P_p$, где $P_{др}$ – давление разрушения трубы с дефектом

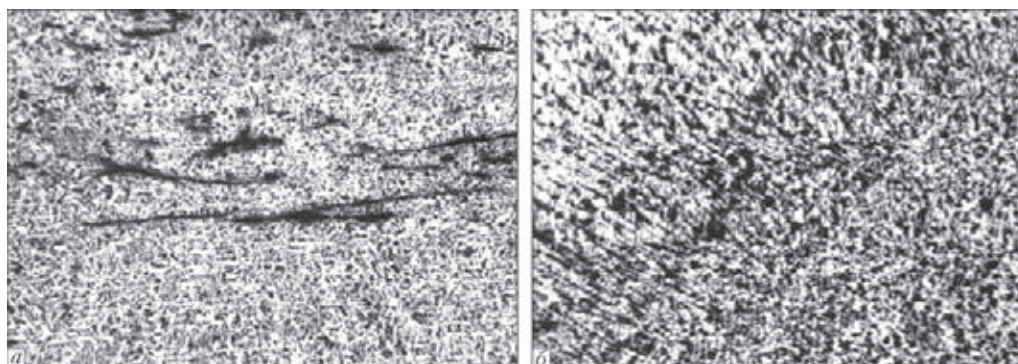


Рис. 3. Микроструктура металла D273 (а), $\times 50$ и металла ЗТВ трубы D530 (б), $\times 100$



трубы D273 способствовал снижению ее прочности, при этом наиболее существенное влияние обусловлено наличием дефекта I (коэффициент снижения прочности $\varphi = 0,80$). Отметим, что максимальная концентрация напряжений $\alpha_\sigma = 4,80$ наблюдалась в дефекте V. Таким образом влияние размеров дефекта на статическую прочность и концентрацию напряжений (циклическую прочность) различно, поскольку степень снижения статической прочности определяется длиной и глубиной дефекта, а его влияние на ККН зависит, кроме того, и от ширины. Данные эксперимента подтвердили, что из всех рассмотренных дефектов

наибольшую опасность при циклическом нагружении представлял дефект трубы D530 ($\varphi = 0,75, \alpha_\sigma = 5,49$).

Результаты расчета НДС образцов труб при воздействии эксплуатационного рабочего давления показали, что в дефектах трубы D273 при рабочем давлении ($P = 4,1$ МПа) пластические деформации отсутствовали, в то время как в дефекте трубы D530 при давлении $P = 4,8$ МПа они достигали 0,18 %. Для расчета деформаций в упруго-пластической области нагружения использовалась модель билинейного изотропного упрочнения и механические свойства материала, полученные

Таблица 3. Параметры нагружения

Образец	N_i , цикл	P_{max} , МПа	P_{min} , МПа	P_{max}/P_n	$\bar{\sigma}_n$	N_f	d
D273	11820	6,1	0,4	0,40	0,267	$>10^6$	0
	1102	10,3	0,5	0,68	0,451	25440	0,043
	1	16,8	0	1,11	0,720	858	0,001
	6110	18	0,5	1,19	0,789	610	0,100
	2060	20	0,5	1,32	0,876	357	5,7
D530	1100	6,2	0,2	0,78	0,449	546	2,01

Примечания: N_i – количество циклов нагрузки i -го уровня; N_f – количество циклов до разрушения согласно [8]; P_{max}, P_{min} – соответственно максимальное и минимальное давление в цикле нагружения; P_n – нормативное давление; $\bar{\sigma}_n$ – интенсивность номинального напряжения, отнесенная к интенсивности напряжения текучести материала σ_t

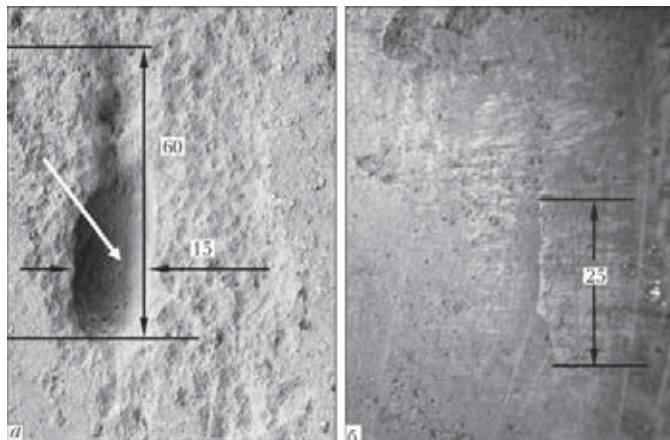


Рис. 4. Трещина усталости (отмечена стрелкой) на внутренней (а) и наружной (б) поверхности коррозионной язвы трубы D530

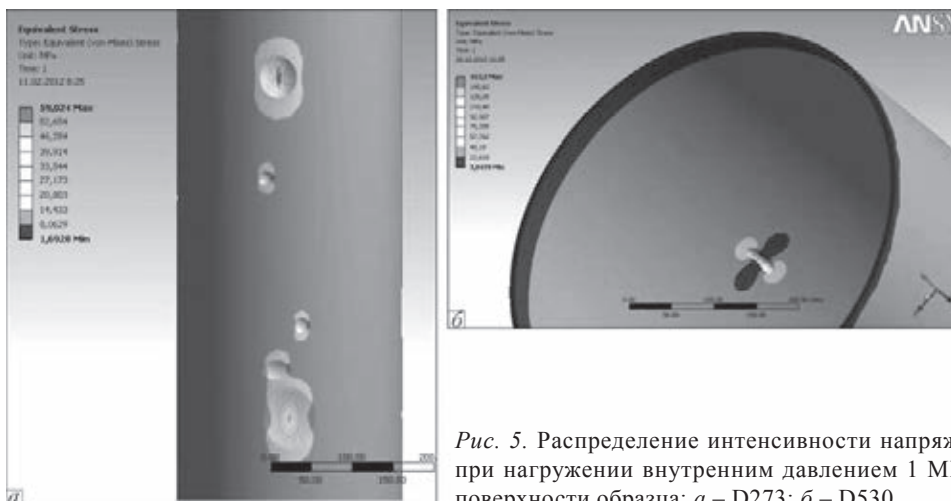


Рис. 5. Распределение интенсивности напряжений при нагружении внутренним давлением 1 МПа на поверхности образца: а – D273; б – D530

при испытании стандартных образцов.

Следует отметить, что трубопроводы D273 и D530, из которых были отобраны экспериментальные образцы, использовали недостаточно эффективно – давление перекачивания продукта, при котором они эксплуатировались, было существенно ниже расчетного допустимого давления P_n [4] для труб соответствующего типоразмера согласно табл.4:

$P_n = 2hR_1 / n(D_n - 2h)$, n – коэффициент надежности по нагрузке трубопровода; R_1 – расчетное сопротивление материала трубы: $R_1 = R_1^n m / k_1 k_n$ (R_1^n – минимальное значение временного сопротивления материала трубы; m – коэффициент условий работы трубопровода; k_1 – коэффициент надежности по материалу; k_n – коэффициент надежности по назначению трубопровода).

Как следует из табл.4, давление перекачивания продукта в нефтепроводе D273 составляло 0,27...0,33, а в нефтепроводе D530 – 0,61...0,73 (в зависимости от категории участка) от расчетного допустимого давления.

Испытание образца D273 (табл.3) выполнялось в достаточно широком диапазоне изменения давления: минимальный уровень составлял 0,4, а максимальный – 1,32 нормативного давления. Пульсация давления в образце D530 фактически соответствовала условиям эксплуатации нефтепро-

Таблица 4. Нормативное давление в нефтепроводе в зависимости от категории участка трубопровода ($K_1 = 1,55$; $P_n = 1$)

Типоразмер	Категория участка нефтепровода	R_1^n	m	P_n , МПа	P_p/P_n
273×9	I	420	0,75	12,6	0,33
	II		0,75		
	III		0,9	15,1	
	IV		0,9		
530×8	I	490	0,75	6,6	0,73
	II		0,75		
	III		0,9	7,9	
	IV		0,9		

Таблица 5. Допустимое число полных циклов изменения рабочего давления

Диаметр трубы, мм	Номер дефекта	P_p , МПа	$\Delta\sigma_y$, МПа	K_e	σ_a , МПа	[N], цикл
273	I	4,1	192,98	1,0	96,5	$3,62 \cdot 10^5$
	II		102,83		51,4	$>10^6$
	III		106,07		53,0	$>10^6$
	IV		120,95		60,5	$>10^6$
	V		241,98		121,0	$1,60 \cdot 10^5$
530	–	4,8	783,36	1,27	498,0	1449

Примечания: $\Delta\sigma_y$ – размах интенсивности напряжений при условии упругого деформирования; K_e – коэффициент повышения деформаций в упругопластической области; σ_a – амплитуда интенсивности условно-упругих напряжений

вода ($P_{max}/P_n = 0,78$). На всех уровнях нагружения образцов в эксперименте изменение напряжений в основном металле происходило в упругой области ($\sigma_n < 1$).

Результаты оценки допустимого числа полных циклов [N] изменения рабочего давления P_p , с учетом наличия каждого из описанных выше дефектов, выполненной согласно рекомендациям стандарта [8], представлены в табл.5.

В качестве критерия разрушения использовано число циклов до зарождения усталостной трещины. Расчет основывается на результатах упругого анализа напряжений и нормативных показателях механических свойств материала. Оценку выполняли с использованием усталостной кривой 1 (рис.6) с введенными коэффициентами запаса по условным напряжениям $n_\sigma = 2$, количеству циклов $n_N = 20$.

Полученные результаты показывают, что эксплуатация нефтепроводов D273 и D530 с учетом наличия рассматриваемых дефектов в фактическом режиме (табл.1) не представляет опасности по критериям циклической (табл.5) и статической прочности (табл.2). Минимальное допустимое число полных циклов, обусловленное дефектом в трубе D530 [N] = 1449 при эксплуатационной нагруженности 50 циклов в год обеспечивает остаточный ресурс трубопровода примерно 30 лет.

По аналогии был проведен расчет допустимого числа полных циклов при рабочем давлении $P_p = P_n$ (табл.6). Полученные результаты показывают, что дальнейшая эксплуатация нефтепроводов в режиме максимально возможного рабочего (нормативного) давления является практически небезопасной, так как число допустимых циклов [N] в этом случае составляет: для трубопровода D273 – 169, трубопровода D530 – 19 циклов. Число циклов до разрушения N_f (рис.6, кривые 4,5), установленные с использованием усталостных кривых (кривые 2,3), основанных на действительных механических свойствах материала образцов, являются также весьма ограниченными. Отметим, что



Таблица 6. Оценка допустимого числа циклов при нормативном давлении

Диаметр трубы, мм	Номер дефекта	Размеры дефекта: $c \times d \times b^*$	P_n	P_p МПа	K_e	S_{alt}^k	$[N]^*$	N_f^{**}
273	V	68×45×7,5	15,1	23,2	2,566	1143,4	169	1546
530	–	60×15×6	7,9	12,3	4,474	2883,9	19	112

Примечания: * – согласно кривой 1 (рис.6); ** – согласно кривым 2, 3 (рис.6) соответственно; S_{alt}^k – эффективная амплитуда напряжений [8]

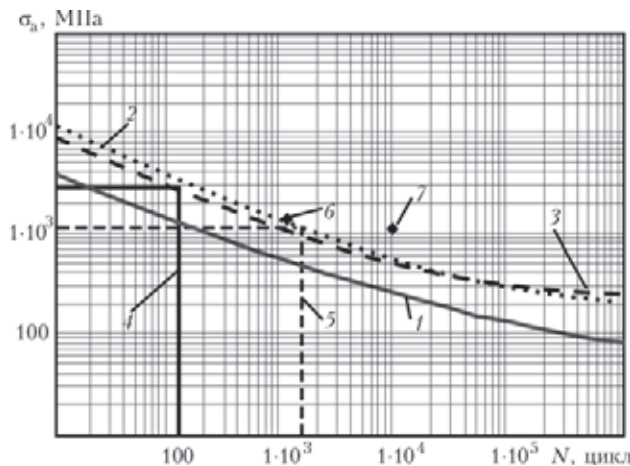


Рис. 6. Усталостные кривые: 1 – расчетная для низкоуглеродистых сталей $[API]n_\sigma = 2$; $n_N = 20$; 2 – материала образца D273; 3 – D530; 4, 5 – долговечность при нормативном давлении в трубе D530 и D273 соответственно; 6 – разрушение образца D530; 7 – D273

при рабочем давлении, не превышающем нормативное и фиксированных размерах рассматриваемых дефектов, опасность представляет именно циклическое нагружение вследствие накопления усталостного повреждения, в то время как запас статической прочности остается на одном уровне.

Оценку повреждаемости, накопленной в процессе испытаний, выполняли с использованием усталостных кривых 2, 3 (рис.6). В табл. 3 приведены результаты расчета повреждаемости в дефекте образца D530 и дефекте V образца D273. Как видим, действительная повреждаемость при испытаниях превысила расчетную: в случае образца D273 – более чем в 5 раз, D530 – в 2 раза. Это указывает на достаточно высокую консервативность применяющейся

методики [8]. Результаты определения экспериментальной долговечности образца D530 и D273 даны на рис.6 (6 и 7, соответственно). Долговечность образца D273 приведена к уровню нормативного давления $P_n = 15,1$ МПа.

Выводы

Проведенные циклические испытания натуральных образцов подтвердили возможность малоциклового разрушения в период эксплуатации трубопровода вследствие возникновения продольной усталостной трещины в зоне коррозионного повреждения.

Малоцикловая прочность определяется уровнем местных циклических деформаций в дефекте, который зависит от его размеров и параметров эксплуатационной нагрузки.

1. Прочность труб магистральных нефте- и продуктопроводов при статическом и малоцикловом нагружении. Обзорная информ. / М.И. Волский, А.С. Аистов, А.П. Гусенков, Л.К. Гуменный // Сер. Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – М.: ВНИИОЭНГ, 1979. – 56 с.
2. Иванцов О. М. Надежность и экологическая безопасность магистральных трубопроводов – в XXI век». – Киев: ИЭС им. Е.О.Патона, 1998. – С.99–109.
3. ЧМТУ/УкрНИТИ 182-60. Трубы сварные прямошовные. Технические условия.
4. СНиП 2.05.06–85. Магистральные трубопроводы. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 59 с.
5. ГОСТ 8731–74. Трубы стальные бесшовные горячедеформированные.
6. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
7. Assessment of the strength and residual life of pipelines with erosion-corrosion damage. E.F.Garf, M.A.Netrebsky // The Paton Welding J. – 2000. – № 9,10. – P.13–18.
8. Fitness-for-service. API Recommended practice 579. First ed., January 2000.

Features of development of in-service corrosion defects in pipelines at low-cycle mode of loading by inner pressure were studied. Hydraulic testing of damaged pipes was performed in the testing facility. Stress-strain state of the samples at loading by inner pressure was studied on the basis of calculation by finite element method. It is revealed that the influence of defect size on static strength and stress concentration (cyclic strength) is different, as the degree of static strength lowering is determined, primarily, by the length and depth of the defect, and its influence on stress concentration factor also depends on width. Calculation of fatigue life was based on the results of analysis of stresses and normative values of material mechanical properties. Evaluation was performed using S-N curve with introduced margins on engineering stress, $n_\sigma = 2$, and cycle number $n_N = 20$. Derived results showed that operation of tested pipes at admissible design pressure is unsafe. Cyclic testing of full-scale samples confirmed the possibility of low-cycle fracture in the corrosion defect zone during pipeline service, as a result of initiation of a longitudinal fatigue crack on the damaged surface. It is established that pipeline low-cycle strength is determined by the level of local cyclic deformations in the defect that depends on its dimensions and parameters of service load.

Keywords: pipelines, corrosion defects, hydraulic testing, low-cycle strength

Поступила в редакцию
11.01.2013