



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЕТА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДОВ С КОРРОЗИОННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

П. С. ЮХИМЕЦ, канд. техн. наук, Э. Ф. ГАРФ, д-р техн. наук, В. А. НЕХОТЯЩИЙ, инж.
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Для проверки предложенной методики расчета остаточного ресурса трубопроводов с учетом поверхностных дефектов выполнены испытания двух натурных образцов с углублениями в виде полуэллипсоида и цилиндра. Последние имитировали поверхностные коррозионные повреждения при циклическом нагружении внутренним давлением. Полученные результаты подтвердили адекватность разработанного метода оценки остаточного ресурса трубопроводов, вызванного коррозионными повреждениями.

Ключевые слова: магистральные трубопроводы, старение, коррозионное повреждение, концентрация напряжений, метод расчета, остаточный ресурс

Старение трубопроводов, в первую очередь магистральных, влияет на надежность их эксплуатации и нередко сопровождается ростом аварийности [1].

При длительном сроке эксплуатации трубопроводов, а также под действием термических и механических нагрузок и влиянием окружающей среды могут происходить эрозивно-коррозионные процессы. Как отмечалось в работе [2], основной причиной отказов трубопроводов за 20 лет эксплуатации являются язвенная коррозия, составляющая 42,5 % общего числа всех зафиксированных случаев.

При существующих в настоящее время требованиях к запасу прочности в трубопроводах за пределами упругости работает только материал зон концентрации, основной же объем металла труб деформируется упруго.

При выполнении исследований использовали геометрическую модель рассматриваемого поверхностного дефекта в форме полуэллипсоида, осями симметрии θ и z которого являются наибольшие размеры дефекта в осевом, окружном и радиальном

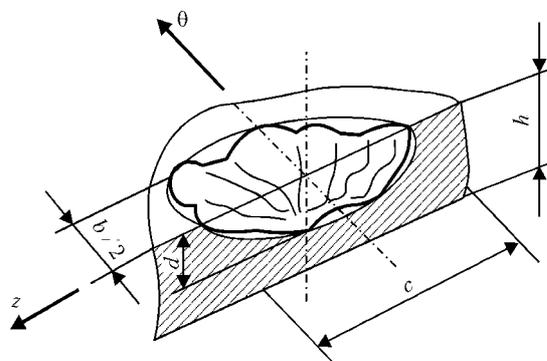


Рис. 1. Схема поверхностного дефекта в форме полуэллипсоида: c, b, d — соответственно длина, ширина, глубина дефекта; h — толщина стенки трубы

направлениях трубопровода (рис. 1). Расчет местных максимальных деформаций ведется в вершине эллипсоида (в точке максимума) на основании значений номинальных напряжений σ_n и их концентрации.

Результаты выполненных исследований [3] свидетельствуют о том, что концентрация напряжений в зоне коррозионных повреждений трубопроводов на их наружной и внутренней поверхностях может достигать существенных значений, что при условии обеспечения статической прочности создает угрозу циклического упругопластического разрушения (рис. 2–4).

Для возникновения разрушения в зоне дефекта пластичных трубных сталей требуется накопление соответствующего усталостного повреждения, т. е. наработка определенного количества циклов на-

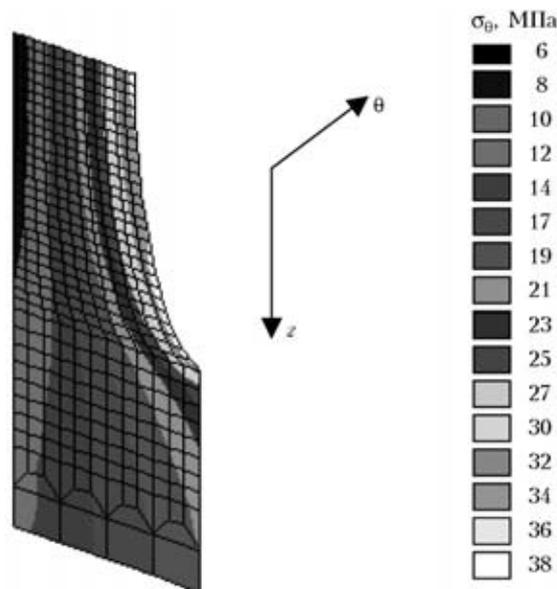


Рис. 2. Распределение кольцевых напряжений σ_θ по толщине стенки трубы размером 322×7 мм в зоне дефекта (половина продольного его сечения на внутренней ее поверхности; $c = 25$ мм; $b = 35$ мм; $d = 1,4$ мм) при воздействии внутреннего давления $P = 1$ МПа (здесь и на рис. 3 представлены результаты расчета методом конечных элементов, выполненного Институтом проблем прочности НАН Украины)

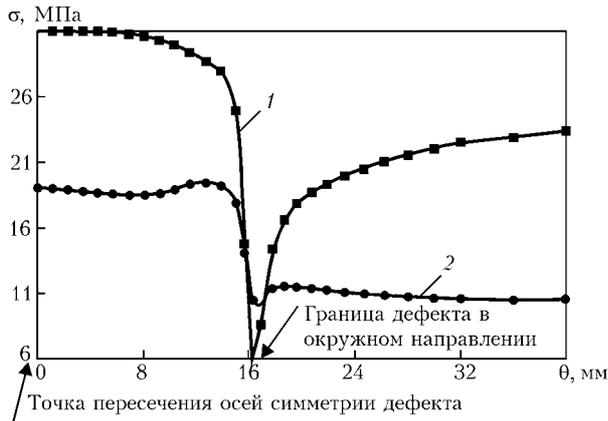


Рис. 3. Распределение кольцевых σ_θ (1) и осевых σ_z (2) напряжений на поверхности дефекта (см. объяснения рис. 2) вдоль оси симметрии θ под воздействием внутреннего давления 1 МПа в трубе размером 322×7 мм

ружения. Пренебрежение возможностью малоциклового разрушения сказывается не сразу и является одной из причин увеличения количества аварий, происходящих вследствие старения трубопроводов.

Требование максимальной надежности трубопроводов предполагает совершенствование методов их расчета на прочность. В связи с этим предложен метод расчета остаточного ресурса трубопровода с коррозионным повреждением по критерию образования малоциклового трещины при циклах нагружения до $1 \cdot 10^5$. Настоящая работа выполнена с целью экспериментальной проверки указанного метода.

В рамках используемой в расчете теории тонких оболочек напряженное состояние трубопроводов представляется как плосконапряженное — напряжения, действующие в направлении толщины стенки, принимаются равными нулю. При этом асимметрия цикла деформаций не учитывается, поскольку ее влияние на долговечность в условиях жесткого нагружения пластичных сталей при значениях асимметрии, характерных для условия изменения нагрузок, которые воздействуют на трубопроводы, незначительно. Используя интенсивность деформаций (напряжения) при расчете величин, инвариантных к типу напряженного состояния, предполагается, что диаграмма деформи-

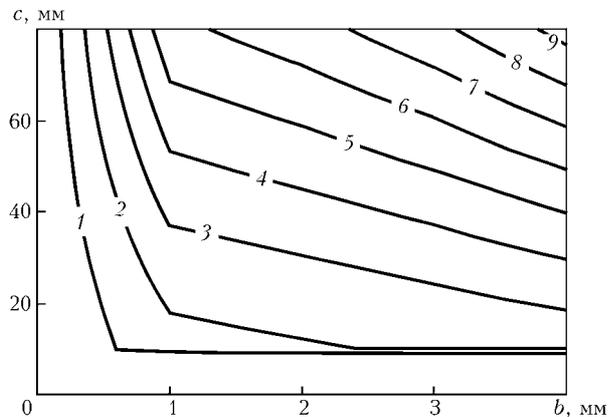


Рис. 4. Кривые изоконцентрации напряжений (значения концентрации α_σ напряжений обозначены цифрами на кривых) на поверхности дефекта шириной $b = 20 \text{ мм} = \text{const}$ трубы размером 219×8 мм, полученные при изменении его длины c и глубины d

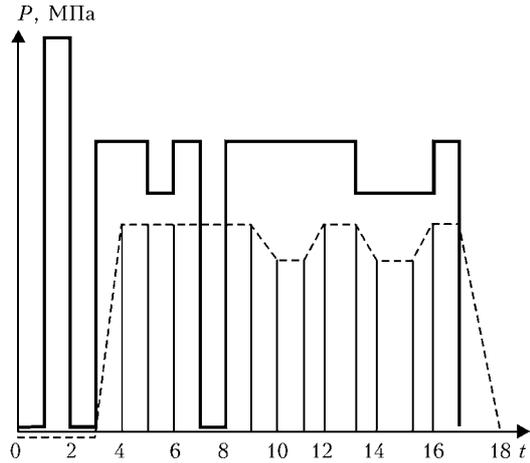


Рис. 5. Основные циклы нагружения трубопровода: сплошные кривые — давление в трубопроводе; штриховые — температура трубопровода; t_{1-2} — гидравлические испытания трубопровода; $t_{3-4}-t_{17-18}$ — типичный пуск-останов перекачки; t_{5-6} — снижение-подъем давления при перекачке; t_{7-8} — аварийный (кратковременный) ее пуск-останов перекачки; t_{9-12} — снижение-подъем температуры перекачки; t_{13-16} — снижение-подъем температуры и давления перекачки

рования в зоне дефектов соответствует диаграмме растяжения гладкого образца.

Определение составляющих различных категорий напряжений осуществляют с использованием прямоугольной системы координат $\theta-z$.

На основе анализа условий эксплуатации трубопровода установлены максимальные циклы нагружения (рис. 5).

Для каждого основного цикла нагружения j -го типа рассчитывают размахи составляющих номинальных нормальных $\Delta\sigma_{zj}$ и $\Delta\sigma_{\theta j}$ и касательных $\tau_{z\theta j}$ напряжений, которые используются для определения размахов (удвоенной амплитуды) интенсивности номинальных напряжений $\Delta\sigma_{ij}$ ($2\sigma_{aj}$) в цикле нагружения j -го типа:

$$\Delta\sigma_{ij} = 2\sigma_{aj} = \sqrt{\Delta\sigma_{zj}^2 + \Delta\sigma_{\theta j}^2 - \Delta\sigma_{zj}\Delta\sigma_{\theta j} + 3\tau_{z\theta j}^2}$$

Используя значение коэффициента концентрации напряжений в зоне дефекта в упругой об-



Рис. 6. Экспериментальные образцы размером 219×8 (а) и 168×7 (б) мм



ласти концентрации напряжений α_σ [3], вычисляется амплитуда максимальных напряжений σ_{aj}^k в зоне дефекта:

$$\sigma_{aj}^k = \sigma_{aj} \alpha_\sigma,$$

где k — номер цикла нагружения;

$$\alpha_\sigma = 1,4 \left[1 + \frac{2\frac{b}{d} \left(1,12 - 0,48\frac{b}{c} + 0,13\frac{b}{c} \left(3\frac{b}{c} - 2 - \frac{b}{h} \right) \right)}{1 - \frac{b}{h} (1 - 0,75\frac{b}{c})} \right] \sqrt{1 + \frac{5\pi\lambda^2}{32}}$$

λ — функция, учитывающая кривизну поверхности:

$$\lambda^2 = \frac{c^2}{Rh} [12(1 - \mu^2)]^{1/2}.$$

R — радиус трубы; μ — коэффициент Пуассона, $\mu = 0,3$.

Если значения расчетных упругих напряжений $\Delta\sigma_{ij}^k$ превышают предел текучести σ_T , то для дальнейшего расчета используют значение амплитуды условного упругого напряжения σ_{aj}^{k*} или амплитуды относительной деформации e_{aj}^k в зоне дефекта:

$$\sigma_{aj}^{k*} = \sigma_{aj} K_{ej}; \quad e_{aj}^k = K_{ej} \frac{e_{aj}}{e_T},$$

где e_{aj} — амплитуда номинальных деформаций в j -м цикле нагружения; e_T — интенсивность деформации, соответствующая пределу текучести; K_{ej} — коэффициент концентрации деформаций в упругопластической области деформирования материала в зоне дефекта в j -м цикле нагружения:

$$K_{ej} = \frac{\alpha_\sigma^{2/1+m} (\bar{\sigma}_j)^{(1-m)/(1+m)}}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_j)^{n(1-m)/(1+m)} [1 - (\bar{\sigma}_j - \frac{1}{\alpha_\sigma})]}$$

где $\bar{\sigma}_j$ — относительные номинальные напряжения в j -м цикле нагружения:

$$\bar{\sigma}_j = \frac{\Delta\sigma_{ij}}{\sigma_T};$$

$n = 0,5 = \text{const}$; m — характеристика упрочнения материала в упругопластической области.

Остаточный ресурс трубопровода составляет

$$T_{\text{ост}} = \frac{1 - a}{a_{\text{год}}},$$

где $a_{\text{год}}$ — повреждаемость трубопровода за год эксплуатации:

$$a_{\text{год}} = \sum \frac{f_j}{[N_j]};$$

где f_j — средняя частота повторяемости циклов нагружения j -го типа в год; $[N_j]$ — допускаемое количество основных циклов нагружения j -го типа, определяемое на основании найденных значений амплитуды напряжений σ_{aj}^k или σ_{aj}^{k*} или дефор-

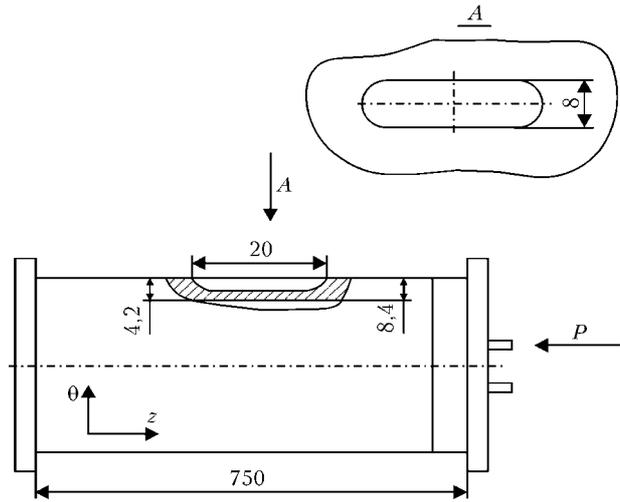


Рис. 7. Схема образца размером 219×8 мм с нанесенным на его наружную поверхность дефектом в форме полуэллипсоида

маций e_{aj}^k в зоне дефекта по расчетным усталостным кривым либо по приведенной ниже зависимости с введенными коэффициентами запаса по деформациям (напряжениям) $\{n_e, (n_\sigma)\}$ и долговечности n_N

$$[N_j] = \left[\ln \frac{1}{1 - \Psi} \right]^{1/n}; \quad (1)$$

$$4e_T \left(e_{aj}^k - \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_T} \right)$$

a — суммарное накопление повреждения:

$$a = \sum \frac{N_j}{[N_j]};$$

N_j — фактическое количество основных циклов нагружения j -го типа трубопровода при наличии поверхностного дефекта.

С целью проверки предложенной методики выполнены испытания двух образцов (рис. 6) из труб разного размера с нанесенными механическим путем углублениями в виде полуэллипсоида и цилиндра, имитирующими поверхностные повреждения (рис. 7 и 8).

В расчет малоциклового прочностного ресурса образцов вводили характеристики механических свойств, установленные при стандартных испытаниях на растяжение и определяющие минимальное сопротивление разрушению (табл. 1).

Эксперименты проводили в лаборатории испытаний давлением сварных соединений ИЭС им. Е. О. Патона. В процессе испытаний образцы нагружали в автоматическом режиме пульсирующим внутренним давлением: от P_{min} до P_{max} с последующим сбросом до P_{min} . Скорость нагружения составляла приблизительно 1 цикл/мин.

Таблица 1. Механические свойства труб

Размер трубы, мм	σ_B , МПа	σ_T , МПа	ψ , %
219×8	541,3	365,5	55,0
168×7	530,6	300,2	55,3

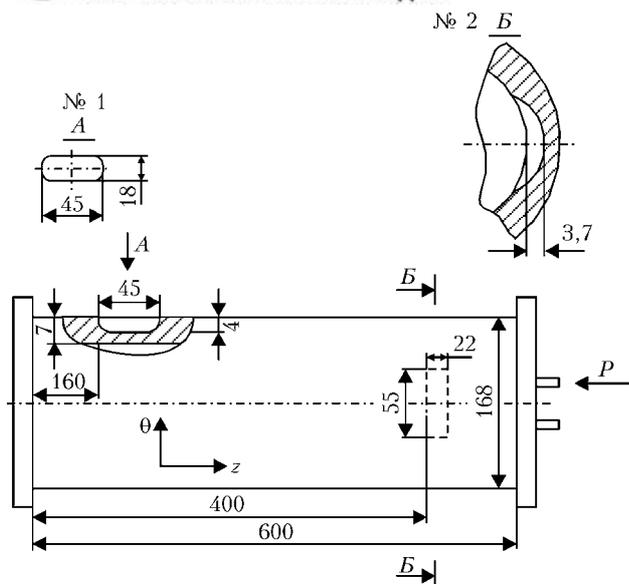


Рис. 8. Схема образца размером 168×7 мм с дефектами, нанесенными на его наружную поверхность в форме полуэллипсоида (№ 1) и на внутреннюю в форме цилиндра (№ 2)

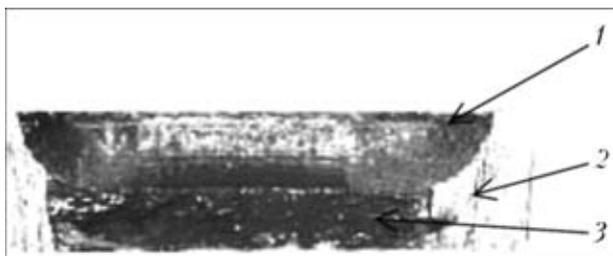


Рис. 9. Разрушение образца размером 219×8 мм в зоне дефекта: 1 — дефект в виде полуэллипсоида; 2 — основной металл; 3 — зона распространения трещины

Данные о нагружении образцов представлены в табл. 2 и 3. Приведенное в таблицах допустимое до разрушения количество циклов $[N_j]$ определяли с использованием зависимости (1) без введения коэффициентов запаса. Испытания продолжали до момента разгерметизации образца, определяемого визуально (рис. 9). Как видно из рисунка, фактическое разрушение образца произошло после нагрузки большего, чем прогнозировали, количества циклов. Суммарное накопление дефектов в обоих случаях превысило 1, что характеризует выполненную оценку как несколько консервативный. Следует, однако, учитывать, что при проведении эксперимента практически исключалось воздей-

Таблица 2. Характеристики нагружения образца размером 219×8 мм

N_j , цикл	P_{max} , МПа	P_{min} , МПа	K_e при P_{max}	$\bar{\sigma}_j$	$e_a \cdot 10^{-3}$	$[N_j]$, цикл	a	
1000	20,0	1	7,78	0,593	3,550	5840	0,171	
100	20,5	4	7,92	0,608	3,386	6648	0,015	
26	19,0	1	7,49	0,564	3,240	7518	0,003	
100	20,0	1	7,78	0,593	3,550	5840	0,017	
1114	23,0	1	8,67	0,682	4,593	2983	0,373	
30	20,0	1	7,78	0,593	3,550	5840	0,005	
70	21,0	1	8,07	0,623	3,878	4610	0,015	
1590	24,0	1	9,01	0,712	4,981	2438	0,652	
$\Sigma = 1,251$								
Примечание. $\alpha_\sigma = 4,61$.								

ствие окружающей среды, которое в реальных условиях эксплуатации трубопровода снижает его долговечность. Поэтому занижение оценки ресурса в эксперименте играет в данном случае положительную роль, поскольку направлено на компенсацию неучтенного влияния коррозионной среды при эксплуатации.

Отметим, что предложенный метод расчета в его настоящей интерпретации применим именно для условий, воспроизводившихся в описанном эксперименте — накопление повреждаемости происходило только после нанесения дефекта, в процессе испытаний размеры дефекта оставались неизменными. В действительности же от момента зарождения дефекта до момента его обнаружения проходит некоторый промежуток времени, в течение которого может быть накоплена существенная усталостная повреждаемость металла в зоне концентрации напряжений. Доля повреждаемости, накапливаемая в цикле нагружения, меняется в зависимости от размеров дефекта. Если не учитывать повреждаемость, накопленную до момента обнаружения дефекта, то это может привести к завышению остаточного ресурса трубопровода.

После экспериментального подтверждения пригодности метода расчета для практического применения он должен быть доработан таким образом, чтобы оценку остаточного ресурса трубопровода выполняли с учетом изменения геометрических параметров дефекта, которые происходили до его обнаружения и будут происходить исходя из установленной расчетной скорости коррозионного процесса в прогнозируемый период времени.

Таблица 3. Характеристики нагружения образца размером 168×7 мм

N_j , цикл	P_{max} , МПа	P_{min} , МПа	$\bar{\sigma}_j$	K_e при P_{max}		$e_a \cdot 10^{-3}$		$[N_j]$, цикл		a	
				№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2	№ 1	№ 2
2400	13	1,0	0,39	5,74	1,88	1,369	0,441	$\sim 2 \cdot 10^5$	$> 1 \cdot 10^6$	0,012	—
6270	17	1,0	0,51	6,65	1,88	2,120	0,588	28130	$> 1 \cdot 10^6$	0,223	—
$1 \cdot 10^4$	15	1,0	0,45	6,18	1,88	1,724	0,514	62640	$> 1 \cdot 10^6$	0,160	—
$1 \cdot 10^4$	17	0,5	0,51	6,65	1,88	2,164	0,607	26170	$> 1 \cdot 10^6$	0,382	—
$7 \cdot 10^3$	21	1,0	0,63	7,66	2,01	3,052	0,788	8912	$> 1 \cdot 10^6$	0,785	—
230	30	1,0	0,90	—	2,43	—	1,387	—	$> 1 \cdot 10^6$	—	0,001
$\Sigma = 1,562$										$\Sigma \approx 0,001$	
Примечание. Для дефекта (см. рис. 8. 2) № 1 — $\alpha_\sigma = 4,53$; для № 2 — $\alpha_\sigma = 1,88$.											



Таблица № 4. Влияние дефектов на статическую прочность образцов

Размер образца с дефектом, мм	Поверхность трубы	F , мм ²	F_d , мм ²	M	α_σ	Разрушение в эксперименте
219×8	Наружная	88,3	76,4	1,00	4,61	Усталостное
168×7, № 1 № 2	То же	67,6	120,0	0,83	4,53	То же
	Внутренняя	67,6	81,4	0,89	1,88	Не произошло

Примечание. F — максимальная площадь отверстия, не ослабляющего прочности трубы при воздействии статического внутреннего давления; F_d — площадь дефекта в продольном сечении с наибольшей глубиной; M — коэффициент ослабления статической прочности [5] P'/P , где P' — допускаемое внутреннее давление в трубопроводе с учетом наличия дефектов; P — расчетное давление в трубопроводе.

Данные, полученные в ходе экспериментов, показали, что в отличие от статического нагружения, когда первоочередным является соотношение площади дефекта и неукрепленного отверстия [4], при циклическом нагружении определяющую роль играет концентрация напряжений в зоне дефекта. В этом смысле показательными являются дефект в образце размером 219×8 мм и дефект № 2 в образце размером 168×7 мм. В первом случае малоцикловое разрушение имело место при отсутствии ослабления в зоне дефекта, во втором — усталостное разрушение не произошло несмотря на то, что зона дефекта была ослаблена (табл. 4).

Таким образом, на основании экспериментальных данных о долговечности натуральных образцов труб с поверхностными углублениями, имитирующими коррозионные повреждения, выполнена проверка и подтверждена адекватность разработанного ме-

тода оценки остаточного ресурса трубопроводов с коррозионными повреждениями.

1. *Надежность* существующих систем трубопроводного транспорта и пути ее повышения / В. А. Воробьев, А. Г. Гумеров, М. Х. Султанов, В. А. Гараева // Программа работы 3-го Конгресса нефтегазопромышленников России, г. Уфа, 22–25 мая 2001 г. — Уфа: Изд-во ТППРБ, 2001. — С. 33–39
2. *Анализ отказов и оценка остаточного ресурса трубопроводов и оборудования ОНГКМ* / Н. Н. Гафаров, А. Д. Гончаров, В. М. Кушнарченко, Ю.А. Чирков // Тез. докл. 3-й Международ. конф. «Диагностика трубопроводов», г. Москва, 21–26 мая 2001 г. — М., 2001. — С. 12.
3. *Концентрация напряжений на участках коррозионных поврежденных трубопроводов* / Э. Ф. Гарф, М. А. Нетребский, С. В. Кобельский, П. С. Юхимец // Автомат. сварка. — 2000. — № 6. — С. 3–6.
4. *Гарф Э. Д., Нетребский М. А.* Оценка прочности и ресурса трубопроводов с эрозивно-коррозионным повреждением // Там же. — 2000. — № 9/10. — С. 15–20.
5. *ASME B31.8*. Appendix L. Determination of remaining strength of corroded pipe, 1995.

Two full-scale specimens with recesses in the form of a semi-ellipsoid and cylinder, were tested to check the offered method for estimation of residual life of pipelines allowing for the surface defects. The above recesses simulated surface corrosion damages under cyclic loading by internal pressure. The results obtained proved adequacy of the developed method for estimation of residual life of pipelines comprising corrosion damages.

Поступила в редакцию 19.11.2004

ПРЕССОВАЯ СВАРКА В ВАКУУМЕ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Сварка осуществляется в вакуумной камере при температуре, близкой к 0,5 температуры плавления более легкоплавкого из свариваемых металлов, и давлении, превышающем его предел текучести в условиях сварки. Сварка выполняется в специальном приспособлении—инструменте, обеспечивающем необходимую степень деформации в приконтактной зоне, а также сохранение заданной формы и размеров свариваемой детали.

Получение качественных соединений разнородных металлов обеспечивается за счет приложения давления, достаточного для образования физического контакта по всей площади соединяемых поверхностей в начальный период сварки и достижения заданной степени пластической деформации, и ограничения температуры сварки. Время сварки выбирается из условия протекания рекристаллизационных процессов в металле приконтактных зон.

Назначение. Для соединения металлов с ограниченной взаимной растворимостью без применения промежуточных прослоек и образования хрупких интерметаллических фаз в зоне контакта. Сварка в указанных условиях гарантирует получение соединений с пределом прочности на уровне значений менее прочного из соединяемых металлов. Разработаны технологические процессы прессовой сварки в вакууме следующих пар металлов: титан с алюминием, титан с медью, титан с аустенитной, ферритной и низкоуглеродистой сталями, титан с вольфрамом, титан с молибденом.

Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
Тел./факс: (38044) 287 13 66
E-mail: zamkov@paton.kiev.ua; ret99@ret99.kiev.ua