

ЧИСЕЛЬНА ОЦІНКА ГУСТИНИ КОРОЗІЙНОГО СТРУМУ НА ВНУТРІШНІЙ ПОВЕРХНІ ТРУБЧАСТИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛЕЙ 12Х1МФ–Х18Н10Т

О. Л. Білий, Р. Л. Лещак

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України;
79601, м. Львів, вул. Наукова, 5*

Локальні корозійно-механічні та корозійні пошкодження труб теплоенергетичного призначення досить суттєво впливають на їх термін експлуатації та залишковий ресурс роботи в експлуатаційних умовах. У зв'язку з цим важливого значення набуває можливість передбачення терміну руйнування таких об'єктів. Для можливості такого прогнозування необхідно оцінити корозійні пошкодження досліджуваних об'єктів, спричинені корозійними струмами на внутрішній поверхні трубчастих зварних з'єднань. Об'єктом досліджень є комбіноване зварне з'єднання труб зі сталей 12Х1МФ та Х18Н10Т з різним терміном експлуатації. Запропоновано чисельно-аналітичну модель, за допомогою якої можна спрогнозувати аномальну поведінку досліджуваного об'єкту за його тривалої експлуатації, чого важко досягти шляхом прямих експериментальних досліджень.

Ключові слова: *комбіновані зварні труби, мало легована сталь перлітного класу, неіржавіюча сталь аустенітного класу, зварне з'єднання, густина корозійного струму, механіко-хімічні та корозійні пошкодження, чисельно-аналітична модель.*

Вступ

Як відомо, локальні корозійно-механічні та корозійні пошкодження труб теплоенергетичного призначення досить суттєво впливають на їх термін експлуатації та залишковий ресурс роботи в експлуатаційних умовах. На даний момент до 70% поломок і, як наслідок, простоїв теплоенергетичного обладнання відбувається за рахунок зародження та розвитку до руйнування непередбачуваних локальних корозійно-механічних та корозійних дефектів. Особливо гостро стоїть проблема комбінованих кільцевих зварних з'єднань труб на виході із пароперегрівачів. У зв'язку з цим важливого значення набуває можливість передбачення терміну руйнування таких об'єктів. Для можливості такого прогнозування необхідно оцінити корозійні пошкодження досліджуваних об'єктів, спричинені корозійними струмами на внутрішній поверхні трубчастих зварних з'єднань.

Об'єкт та методика досліджень

Об'єктом досліджень є комбіноване зварне з'єднання труб зі сталей 12Х1МФ (малолегована сталь перлітного класу) та Х18Н10Т (неіржавіюча сталь аустенітного класу) (рис.1) з різним терміном експлуатації (табл.1). Зварювання здійснювалось подвійним кільцевим зварним

швом у відповідності з ТУ [1]. Як зварювальний матеріал використовувався перехідний електрод ЦТ-10. Хімічний склад базових та зварювального матеріалів подається в [1]. Експлуатаційним середовищем для даного типу об'єктів є пароводяна суміш високих параметрів.

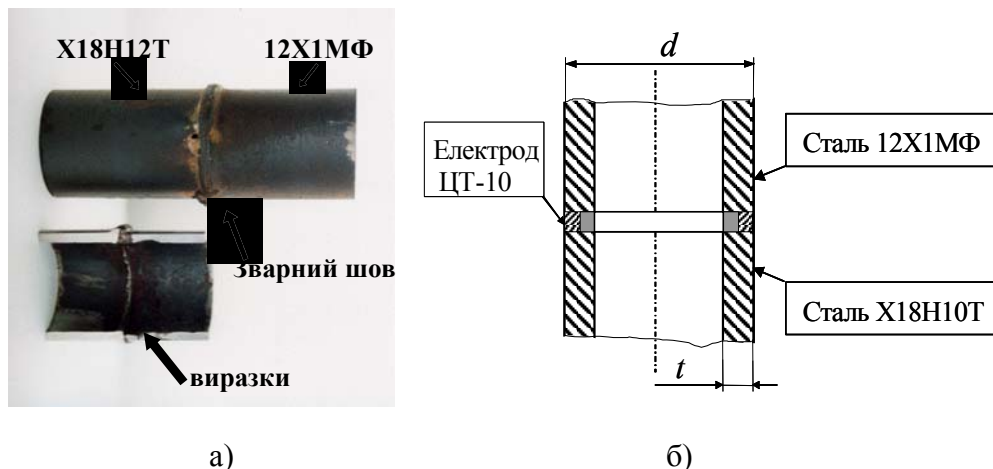


Рис.1. Об'єкт досліджень (а) та його схематичне подання (б)

Таблиця 1. Характеристики об'єкта досліджень

ТЕС	Сталь	Типорозмір, мм.	Термін експлуатації, тис. год.	Температура експлуатаційного середовища, °С	Тиск в трубі, атм.
Бурштинська	12X1MФ	38×4	Поставка	540	140
Бурштинська	X18H10T	38×4	Поставка	540	140
Вуглегірська	12X1MФ	42×4	185	540	38
Вуглегірська	X18H10T	42×4	185	540	38

Розглядуваний об'єкт, з точки зору електрохімічної корозії, є триелектродною системою, яка разом із системою безрозмірних циліндричних координат r, Z , віднесених до r_0 (внутрішнього радіуса труби $r_0 = d/2 - t$), представлена на рис.2. Ця система характеризується потенціалами корозії φ_n , питомими поляризаційними опорами b_n , питомою електропровідністю середовища σ , безрозмірною (віднесеною до r_0) півшириною зварної зони l і радіусом r_0 . Тут і надалі індекси $n = 1, 2, 3$ відносяться до величин в областях: $-\infty < Z < -l$, $-l < Z < l$, $l < Z < \infty$.

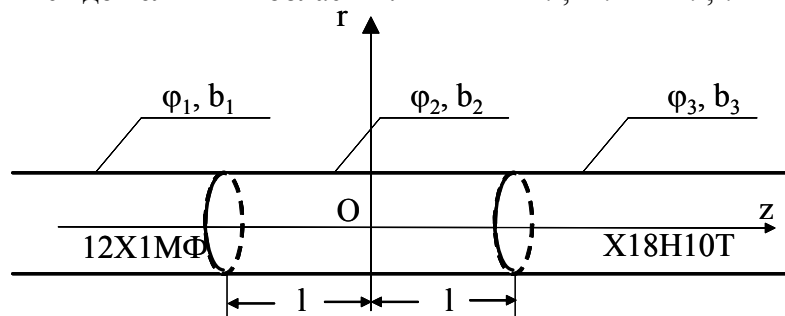


Рис.2. Схема досліджуваного об'єкта та система циліндричних координат

Метою дослідження є аналітичне і кількісне визначення густини струмів електрохімічної корозії. Це виражається через електричні потенціали середовища $\psi_n(r, Z)$. Вони задовольняють рівнянню Лапласа [2]:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2} \right) \psi_n(r, Z) = 0, \quad n = 1, 2, 3. \quad (1)$$

При визначенні густини струму $j_n(1, Z)$ із поверхні $r=1$, $-\infty < Z < \infty$ додатнім вважається струм із металу в середовище. Густину цього струму можна визначити із потенціалу $\psi_n(r, Z)$ двома способами.

1. Якщо враховувати, що електропровідність металів в 10^6 - 10^7 раз більша за електропровідність середовища, то можна прийняти електричний потенціал поверхні металу

$$\psi_m \approx \text{const} = 0. \quad (2)$$

$$\text{Тоді [3]} \quad j_n(1, Z) = \frac{-[\psi_n(1, Z) + \varphi_n]}{b_n}, \quad n = 1, 2, 3. \quad (3)$$

Далі буде показано, що $j_1(1, Z)$ і $j_3(1, Z)$ згасають вздовж Z по приблизно експоненціальному закону. Тому область ефективної дії корозійних струмів обмежена і можна вважати в цій області умову (2) і співвідношення (3) прийнятними.

2. Із закону Ома в диференціальній формі при використанні безрозмірного r буде

$$j_n(1, Z) = \frac{\sigma}{r_0} \left. \frac{\partial \psi_n(r, Z)}{\partial r} \right|_{r=1}. \quad (4)$$

Із прирівнювання правих сторін рівностей (3) і (4) впливає умова на поверхні $r=l$:

$$\left[\psi_n(r, Z) + K_n \frac{\partial \psi_n(r, Z)}{\partial r} \right]_{r=1} = -\varphi_n, \quad n = 1, 2, 3, \quad \text{де } K_n = \frac{\sigma b_n}{r_0}. \quad (5)$$

Потенціали $\psi_n(r, Z)$ задовольняють умовам (5), неперервності $\psi_n(r, Z)$ і $\frac{\partial \psi_n(r, Z)}{\partial Z}$ на перерізах $0 \leq r < 1, z = \pm l$ та умовам на нескінченності

$$\psi_1(r, Z = -\infty) = -\varphi_1, \quad \psi_3(r, Z = \infty) = -\varphi_3. \quad (6)$$

При визначенні $\psi_n(r, Z)$ використаємо метод вирівнювання поляризації [2], в якому за умови (5) для різних K_n замінюються єдиною умовою при сталому K . В ролі таких K вибрано K_2 . Тоді умова (5) стане:

$$\left[\psi(r, z) + K_2 \frac{\partial \psi(r, z)}{\partial r} \right]_{r=1} = \begin{cases} -(\varphi_1 + \tilde{\varphi}_1), & -\infty < z < -l, \\ -\varphi_2, & -l < z < l, \\ -(\varphi_3 + \tilde{\varphi}_3), & l < z < +\infty. \end{cases} \quad (7)$$

Тут $\tilde{\varphi}_1$ і $\tilde{\varphi}_3$ - поправки до потенціалів корозії φ_1 і φ_3 :

$$\tilde{\varphi}_1 = \frac{K_1 - K_2}{l_1} \int_{-\infty}^{-l} \left. \frac{\partial \psi_1(r, Z)}{\partial r} \right|_{r=1} dZ, \quad \tilde{\varphi}_3 = \frac{K_3 - K_2}{l_3} \int_l^{\infty} \left. \frac{\partial \psi_3(r, Z)}{\partial r} \right|_{r=1} dZ. \quad (8)$$

$\left. \frac{\partial \psi_n(r, Z)}{\partial r} \right|_{r=1}$ - усереднена величина на поверхнях ефективної корозії,

$n = 1, 3$. В ролі таких прийняті прилеглі до шва частини поверхні труб, на яких зосереджено не менше 90 % корозійного струму з кожної із напівбезмежних труб.

Розв'язок рівняння Лапласа для $\psi(r, Z)$ при умовах (6), (7) та неперервність $\psi(r, Z)$ і $\frac{\partial \psi(r, Z)}{\partial Z}$ при $z = \pm l$ дано методом розподілу змінних. Підставивши $\psi(r, Z)$ в співвідношення (3) або (4), одержимо вирази густин струмів:

$$j_1(l, Z) = \frac{\sigma}{r_0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{[(\varphi_2 - \varphi_1 - \tilde{\varphi}_1) \exp(\lambda_m l) + (\varphi_3 + \tilde{\varphi}_3 - \varphi_2) \exp(-\lambda_m l)] \exp(\lambda_m Z)}{K_2^2 \lambda_m^2 + 1}; \quad (9)$$

$$j_2(l, Z) = \frac{\sigma}{r_0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{[(\varphi_3 - \tilde{\varphi}_3 - \varphi_2) \exp(\lambda_m Z) + (\varphi_1 + \tilde{\varphi}_1 - \varphi_2) \exp(-\lambda_m Z)] \exp(-\lambda_m l)}{K_2^2 \lambda_m^2 + 1}; \quad (10)$$

$$j_3(l, Z) = \frac{\sigma}{r_0} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{[(\varphi_2 - \varphi_1 - \tilde{\varphi}_3) \exp(\lambda_m l) + (\varphi_1 + \tilde{\varphi}_1 - \varphi_2) \exp(-\lambda_m l)] \exp(-\lambda_m Z)}{K_2^2 \lambda_m^2 + 1}. \quad (11)$$

Тут λ_m - корені рівняння $J_0(\lambda) - K_2 \lambda J_1(\lambda) = 0$, де $J_p(\lambda)$ - функції Бесселя p -ого порядку.

Для реалізації цієї чисельно-аналітичної моделі було проведено ряд експериментів. Досліджуваною поверхнею була внутрішня поверхня труби, що контактує з експлуатаційним середовищем. Інші поверхні закривалися ізолюючим матеріалом для забезпечення чистоти експерименту. Робочі середовища, що використовувались для випробувань, та їх параметри представлені у табл.2. З одержаних поляризаційних кривих [1] було визначено базові електрохімічні показники, з яких для розрахунку були використані (табл.3) потенціали корозії, з перетину Тафельських прямих, питомі катодні та анодні поляризаційні опори.

Таблиця 2. Параметри робочого середовища

Концентрація C_{NaCl} , % мас	Провідність κ , Sm/m	pH	Температура, °C
0 (дистильована вода)	$0,93 \times 10^{-3}$	5,9	15
0,03	$59,2 \times 10^{-3}$	6,5	15
0,3	0,557	6,8	15

На основі експериментальних досліджень були встановлені такі закономірності:

- із збільшенням концентрації агресивних домішок в середовищі, підвищуються корозійні струми і зменшуються пасивні ділянки як для матеріалу в стані поставки, так і для експлуатованого матеріалу;
- для експлуатованого матеріалу концентрація агресивних домішок в середовищі неоднозначно впливає на вище вказані матеріали;
- термін експлуатації залежно від вмісту агресивних домішок в середовищі також неоднозначно впливає на корозійну поведінку компонентів даного зварного з'єднання, що засвідчують результати.

Таблиця 3. Основні електрохімічні показники матеріалів зварного з'єднання [1]

Початковий вміст іонів	Потенціали корозії	Питомі поляризаційні опори		Початковий вміст іонів	Потенціали корозії	Питомі поляризаційні опори	
		b_k , Ом·м ²	b_a , Ом·м ²			b_k , Ом·м ²	b_a , Ом·м ²
C_{NaCl} , %	φ_k , V	b_k , Ом·м ²	b_a , Ом·м ²	C_{NaCl} , %	φ_k , V	b_k , Ом·м ²	b_a , Ом·м ²
Сталь 12Х1МФ (поставка)				Сталь 12Х1МФ (відпрацьований матеріал)			
0	-0,375	3,937	4,132	0	-0,193	3,205	4,878
0,03	-0,427	0,460	0,340	0,03	-0,390	0,716	0,921
0,3	-0,433	0,339	0,297	0,3	-0,402	1,340	0,695
Зварна зона (поставка)				Зварна зона (відпрацьований матеріал)			
0	-0,169	4,717	4,831	0	-0,217	3,571	4,975
0,03	-0,235	0,800	0,563	0,03	-0,255	0,821	0,526
0,3	-0,360	0,484	0,133	0,3	-0,314	0,181	0,160
Сталь Х18Н10Т (поставка)				Сталь Х18Н10Т (відпрацьований матеріал)			
0	-0,021	8,772	11,278	0	-0,333	4,292	5,714
0,03	-0,312	3,279	4,566	0,03	-0,376	2,110	1,763
0,3	-0,369	1,976	2,232	0,3	-0,423	1,125	0,856

Результати та їх обговорення

На основі експериментальних даних, описаних у [1], та математичних розрахунків за формулами (6)–(8) була одержана база даних густини струмів з поверхні досліджуваних матеріалів за різних довжин зварної зони, вмісту $NaCl$ та у випадку поставки та відпрацьованого матеріалу.

Визначалася залежність густини струмів від осьової координати для нових і відпрацьованих матеріалів при товщині зварної зони 2 мм, 5 мм і 10 мм в дистильованій воді та розчинах $NaCl$ з концентраціями 0,03 та 0,3% по масі.

Результати обчислень для нових матеріалів у дистильованій воді та розчинах з різною концентрацією $NaCl$ при трьох ширинах зварної зони представлені на рис.3,а, с, е. Встановлено, що для майже всіх роз-

глянутих варіантів труба зі сталі 12Х1МФ є анодом, а труба зі сталі Х18Н10Т та зварна зона - катодами. Винятком є зварна зона товщиною 5 мм і 10 мм в дистильованій воді. У цих двох випадках зварна зона є частково катодом і меншою мірою, анодом. Тут утворюються пари катод-анод між кожним їх базових матеріалів та матеріалом зварної зони. Двополярність зварної зони пояснюється низькою електропровідністю середовища і, як наслідок, обмеженістю впливу базових матеріалів на матеріал зварної зони. Залежність густини струму для труб із обох сталей є приблизно експоненціальноспадною. Максимальне значення цієї густини є на стиках зі зварною зоною. Для віддалей від зварної зони, більших певної величини, густина струму зростає з ростом концентрації $NaCl$. Біля зварної зони густина струму зростає з ростом електрорушійної сили пари труба – зварна зона. Для розглянутого діапазону ширин зварної зони кількісна залежність густини струму від ширини цієї зони незначна.

У випадку відпрацьованих матеріалів (рис.3,b, d, f) зварна зона є катодом при всіх її ширинах. Встановлено, що труби з обох сталей при розглянутих ширинах зварної зони в дистильованій воді та розчинах $NaCl$ з $C=0,03\%$ і $C=0,3\%$ є анодами. Для всіх розглянутих ширин зварної зони та середовищах ця зона є катодом. Густина струму на ній значно більша, ніж для нових матеріалів. Залежність $j(l, z)$ для обох труб є, як і для нових матеріалів, експоненціальноспадною. Густина струму з ростом концентрації $NaCl$ по всій довжині труб, а не починаючи з певної віддалі від зварної зони, як це є для труб із нових матеріалів.

Висновки

На основі запропонованої чисельно-аналітичної моделі встановлено:

- із збільшенням концентрації агресивних домішок в середовищі зростають струми корозії;
- спостерігається спад корозійних струмів від зони зварного шва в глибину базових матеріалів за експоненціальним законом;
- із збільшенням ширини шва спостерігається збільшення його впливу на прилеглі ділянки зварюваних матеріалів, також, із збільшенням ширини зварної зони, більш яскраво проявляється нелінійна залежність розподілу в ній корозійних струмів;
- якщо порівнювати матеріали в стані поставки, та ті, що відпрацювали певний термін, то спостерігається яскраве вираження зони зварного шва в ролі катода, а сталь Х18Н10Т стає анодом.

За допомогою запропонованої чисельно-аналітичної моделі можна спрогнозувати можливу аномальну поведінку досліджуваних об'єктів при їх тривалому терміні експлуатації, що досить важко досягти шляхом прямих експериментальних досліджень.

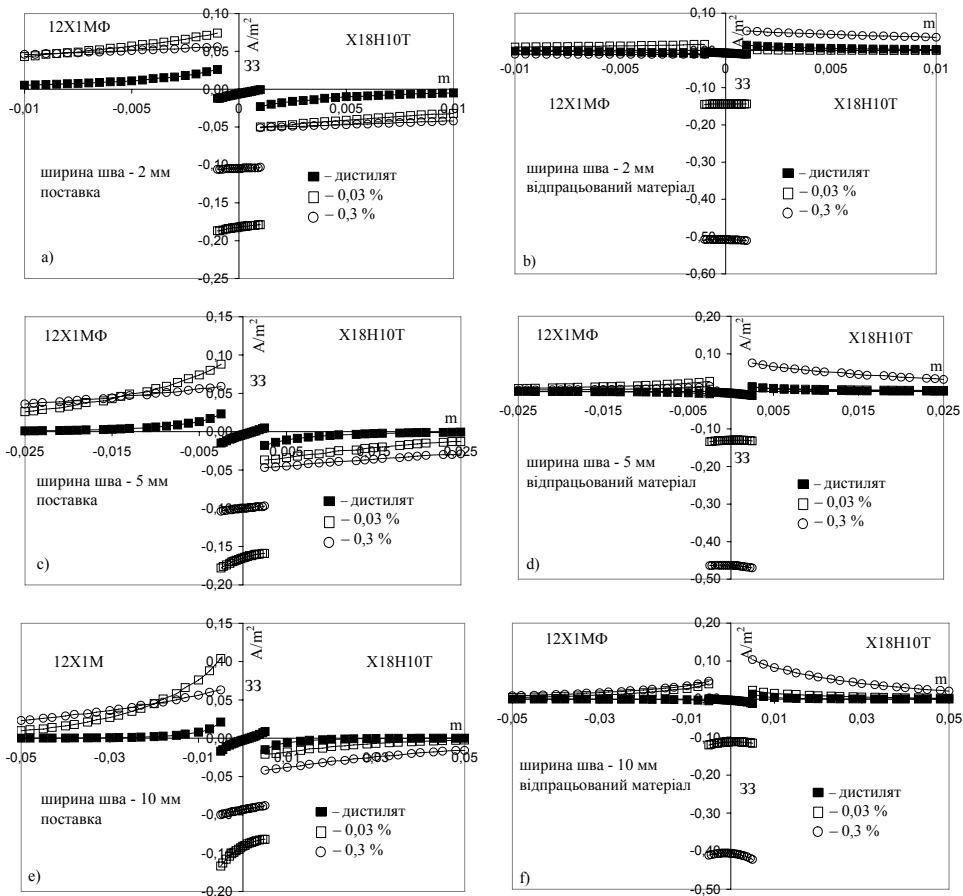


Рис.3. Залежності густини струмів $j(1, Z)$ для нових (a, c, e) та відпрацьованих матеріалів (b, d, f) в розчинах NaCl та дистильованій воді при ширинах зварної зони: a, b – 2 mm; c, d – 5 mm; e, f – 10 mm

Література

1. Лещак Р.Л. Вплив терміну експлуатації на корозійні властивості комбінованих зварних з'єднань труб теплоенергетичного призначення / Р.Л.Лещак, О.Л.Білий // Матеріали ХІХ відкритої науково-технічної конференції молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України (КМН-2005). – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка Національної академії наук України. – 2005. – С. 35-40.
2. Иоссель Ю.Я. Математические методы расчета электрохимической коррозии и защиты металлов. Справ / Ю.Я.Иоссель, Г.Э.Кленов. – М.: Металлургия, 1984. – 272 с.
3. Колодій Б.І. Метод еквівалентного електрода для визначення електрохімічних струмів у корозійній виразці / Б.І.Колодій, І.М.Дмитрах, О.Л.Білий // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – № 5. – С. 27-31.

Стаття надійшла до редакційної колегії 10.11.2011 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором **Петриною Ю.Д.**

NUMERICAL EVALUATION OF CORROSION CURRENT DENSITY ON INTERNAL SURFACE OF PIPE WELDS OF 12X1MΦ AND X18H10T STEELS**O. L. Bilyy, R. L. Leshchak***Karpenko Physico-Mechanical Institute, National Academy of Sciences of Ukraine; 79601, Lviv, Naukova st., 5*

Local mechanochemical and corrosive damages of heat-and-power engineering pipes essentially influence on its exploitation time and remaining life in exploitation conditions. The most important is to have possibility to predict the time of destruction of such objects. To realise that possibility it is necessary to estimate analytically the parameters change of investigated materials. In this work it is proposed the analytical correlations to determine corrosion current density from inside surface of welded dissimilar pipes. They were obtained with help of polarities equilibrium method. These correlations were used for construction of relations of basis parameter: corrosion current density on internal surface of pipe welded joints of 12X1MΦ–X18H10T steels. This model were realized on the base of experimental research which were conducted on the specimens made of real objects. It is necessary to note that for the investigation it was taken objects with different time of exploitation: material in delivery conditions and with exploitation time about 200000 hovers. In this work the distribution of corrosion current density in each of components of pipe welded joint 12X1MΦ–X18H10T was analysed, namely, pipe made of 12X1MΦ (low-alloyed pearlitic steel) steel, welded zone between the pipes (it was taken different widths of welded zone within mathematical research), pipe made of X18H10T steel (stainless austenitic steel). It was made the comparative analysis of characteristics of material as in delivery conditions so as exploited. It was formed the conclusions based on experimental research and also numeric-analytical model. With help of proposed numeric-analytical model we can have unobvious dependences of investigation objects behaviour on composition of environment, investigated materials in the system, and exploitation time of the object, as it is hard to get within straight analysis of experimental data. Obtained results can be used in future to investigate the kinetics of local corrosive damages growth in such objects.

Key words: *welded dissimilar pipes, low-alloyed pearlitic steel, stainless austenitic steel, welded joints, corrosion current density, mechanochemical and corrosive damages, numeric-analytical model.*