

УДК 620.193.4

ЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 17Г1СУ

М. С. ХОМА, Г. М. СИСИН, О. І. РАДКЕВИЧ, М. Я. ГОЛОВЧУК

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Вивчено електрохімічні і мікроелектрохімічні характеристики та мікротвердість фрагмента труби зі сталі 17Г1СУ зі зварним швом, виконаним електродами FOX EV 50, Basic One та УОНИИ-13/55Р. Потенціали корозії різних шарів зварного шва та зони термічного впливу біля них збільшують електрохімічну гетерогенність до ~130 mV, порівняно з основним металом. Струми корозії основного металу відрізняються на ~15%, а різних шарів зварного шва – не більше ніж на 69%. Мікроелектрохімічна гетерогенність різних зон зварного з'єднання, визначена методом рухомої краплі, практично не відрізняється ($\Delta E = 20 \dots 80$ mV). Лише зварному шву, виконаному електродами FOX EV 50, властиве дещо вище її значення ($\Delta E = 25 \dots 95$ mV). Мікротвердість основного металу та зони термічного впливу до лінії сплавлення для всіх електродів становить ~1,6...2,25 GPa. Для шва, звареного електродами FOX EV 50, вона є нижча (1,2...1,4 GPa), ніж для виконаного електродами Basic One та УОНИИ-13/55Р (1,6...2,2 GPa).

Ключові слова: мікроелектрохімічна гетерогенність, поляризаційні криві, потенціал та струм корозії, мікротвердість.

Більшість металевих виробів містять зварні з'єднання (ЗЗ), які можуть впливати на надійність експлуатації всієї конструкції. Під час прокладання трубопроводів широко застосовують імпортні зварювальні матеріали, основними постачальниками яких є фірми Європи, Америки і Японії: ESAB, Sandvik (Швеція), Böhler (Австрія), UTP (Німеччина), Lincoln, Oerlikon (США), Kobe (Японія) та ін. [1, 2]. Тому мета дослідження – порівняти корозійно-електрохімічні характеристики ЗЗ сталі 17Г1СУ, виконаних електродами FOX EV 50 (Böhler), Basic One (Lincoln), УОНИИ-13/55Р (Росія) [3].

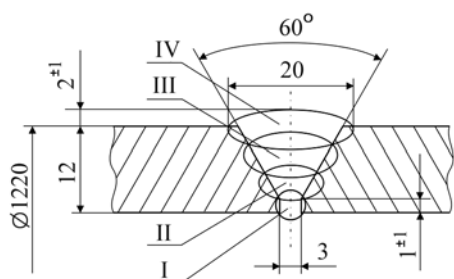


Рис. 1. Кореневий (I), заповнювальні (II, III) та облицювальний (IV) шари зварного шва.

Fig. 1. Weld types of 17Г1СУ steel: root (I), filling (II, III) and facing (IV) layers.

Матеріали та методика випробувань. Вивчали характер корозії, мікроелектрохімічну гетерогенність та мікротвердість фрагмента труби сталі 17Г1СУ зі зварним швом (рис. 1), зварюваним вручну електродуговим способом електродами FOX EV 50, Basic One та УОНИИ-13/55Р (табл. 1).

Електрохімічні дослідження виконували в 3%-му розчині NaCl, застосовуючи локальні комірки з робочою поверхнею $3,14 \text{ mm}^2$, за допомогою потенціостата ІРС-Pro. Локальні електродні потенціали різних зон ЗЗ вимірювали на установці для мікроелектрохімічних випробувань [4]. Мікроструктуру

ЗЗ оцінювали на електронному мікроскопі EVO 40XVP, мікротвердість – приладом ПМТ-3 за навантажень на індентор 100 g з витримкою 20 s.

Таблиця 1. Хімічний склад і механічні характеристики сталі та електродів

Матеріал	Вміст елементів, %								σ_T	σ_B
	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	інші		
Сталь 17Г1СУ	0,17	1,4	0,47	0,04	0,03	0,005	0,023	$\leq 0,3$ Cu; $\leq 0,034$ Al	440	600
УОНІИ-13/55Р Ø 3 mm	0,10	1,54	0,43	0,02	0,03	0,011	0,022	0,02 Cu	380	530
FOX EV 50 Ø 3,2 mm	0,076	0,72	0,64	–	0,21	0,005	0,010	–	420	500... 640
JET-LH 70 Ø 3,2 mm	0,05	1,34	0,44	0,07	0,04	0,008	0,017	0,01 Mo; 0,01 V; 0,05 Cu	518	579

Результати випробувань та їх обговорення. Електрохімічна неоднорідність ЗЗ суттєво залежить від матеріалу електрода та режимів зварювання. Її може спричинити не лише зміна хімічного складу, але й структури та фізико-механічного стану металу. Для визначення впливу марки електродів на розвиток корозії у ЗЗ досліджували електрохімічну гетерогенність сталі 17Г1СУ. Методом локальних комірок виявили, що у 3%-му розчині NaCl потенціали корозії основного металу (ОМ) та зони термічного впливу (ЗТВ) ЗЗ, виконаного електродом FOX EV 50, на $\sim 70 \dots 110$ mV від'ємніші, ніж зварного шва (ЗШ). При цьому струми корозії цих ділянок відрізняються несуттєво: $0,016 \dots 0,022$ mA/cm². За використання електрода Basic One від'ємніший потенціал корозії властивий ЗТВ (-640 mV проти $-550 \dots -590$ для ЗШ та ОМ), а струми корозії різних зон ЗЗ різняться більше: $0,009 \dots 0,023$ mA/cm² (максимальне значення характерне для ЗТВ). Коли зварювали електродом УОНІИ-13/55Р, потенціали корозії ЗТВ та ЗШ були на $\sim 60 \dots 80$ mV додатнішими, ніж ОМ. При цьому струми корозії всіх ділянок ЗЗ відрізняються незначно: $0,023 \dots 0,026$ mA/cm² (табл. 1). Вищі струми корозії ЗТВ труби, звареної усіма електродами, зумовлені, в основному, більшою швидкістю анодних процесів. Це пов'язано із відмінностями структури різних зон ЗЗ та залишковими внутрішніми напруженнями. Виявлено, що потенціали корозії різних ділянок ОМ різняться на ~ 30 mV, а струми корозії – на $\sim 15\%$. Отже, під час використання електрода УОНІИ-13/55Р електрохімічна гетерогенність поверхні зростає до 80 mV, а коли зварювати електродами Basic One та FOX EV 50 – до ~ 90 та 110 mV, відповідно. Оскільки найвід'ємніший потенціал корозії (табл. 2) притаманний ЗТВ, то вона буде потенційним анодом.

Таблиця 2. Результати електрохімічних досліджень різних зон зварного з'єднання сталі 17Г1СУ у 3%-му NaCl

Електрохімічні характеристики	FOX EV 50			Basic One			УОНІИ-13/55Р		
	ОМ	ЗТВ	ЗШ	ОМ	ЗТВ	ЗШ	ОМ	ЗТВ	ЗШ
E_k , mV	-580	-620	-510	-590	-640	-550	-610	-530	-550
i_k , mA/cm ²	0,021	0,022	0,016	0,016	0,023	0,009	0,023	0,026	0,022

Дослідження різних шарів ЗШ, виконаного електродом УОНІИ-13/55Р, виявило, що у 3%-му розчині NaCl значення потенціалів корозії ЗТВ найвід'ємніше поблизу кореневого шару, а для ЗШ – властиве облицювальному шару (табл. 3). Потенціали ЗТВ поблизу різних шарів ЗШ знаходяться в інтервалі $-530 \dots -640$ mV,

а ЗШ – в діапазоні $-510...-580$ mV. Потенціали корозії для ЗШ зміщуються у від’ємніший бік, а для ЗТВ у додатніший з переходом від кореневого до облицювального шару, що може пришвидшити розчинення металу, так як саме в межах цих ділянок зафіксована максимальна різниця потенціалу. Дещо вище значення струму корозії ЗТВ поблизу облицювального шару. Струми корозії різних шарів ЗШ відрізняються на 69% (рис. 2; табл. 3).

Таблиця 3. Результати електрохімічних та мікроелектрохімічних (ΔE) досліджень у 3%-му NaCl різних шарів зварного шва сталі 17Г1СУ, виконаного електродом УОНІІ-13/55Р

Електрохімічні характеристики ЗЗ		Кореневий	Заповнювальний	Облицювальний
ЗТВ поблизу шару	$i_k, \text{mA/cm}^2$	0,021	0,019	0,026
	E_k, mV	-640	-595	-530
	$\Delta E, \text{mV}$	10...55	20...60	20...75
ЗШ	$i_k, \text{mA/cm}^2$	0,013	0,022	0,019
	E_k, mV	-510	-530	-580
	$\Delta E, \text{mV}$	20...60	20...75	20...65

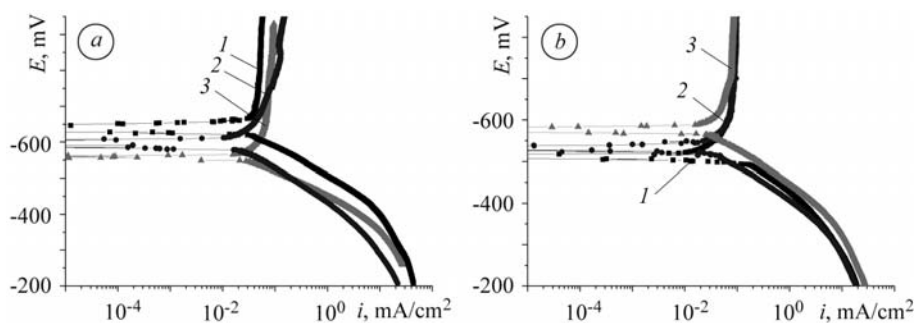


Рис. 2. Поляризаційні криві зварного з’єднання сталі 17Г1СУ, виконаного електродом УОНІІ-13/55Р, в 3%-му NaCl: *a* – зона термічного впливу; *b* – зварний шов. 1–3 – кореневий, заповнювальний та облицювальний шари.

Fig. 2. Polarization curves of 17G1SU steel weld done by electrodes УОНІІ-13/55Р in 3% NaCl: *a* – thermal affected zone; *b* – joint weld. 1–3 – root, filling and facing layers.

Металографічний аналіз показав (рис. 3), що дослідженим ЗЗ властива феритно-перлітна структура. Розмір ЗТВ $\sim 1,5...3$ mm, зерна ОМ $\sim 7...12$ μm із яскраво вираженою смугастістю, ЗТВ притаманні структура сорбітоподібного фериту з перлітом та дещо більший розмір зерна (~ 15 μm). Найменший розмір зерна ($\sim 1...3$ μm) характерний ЗШ, виконаному електродами FOX EV 50 та УОНІІ-13/55Р, а під час зварювання електродом Basic One він зростає до ~ 10 μm .

Під час сканування поверхні зразків із сталі 17Г1СУ зі ЗЗ, звареними електродами FOX EV 50 та Basic One, капіляром у рухомій краплі водного розчину МЕХ (0,045% $\text{H}_2\text{SO}_4 + 0,14\%$ $\text{H}_2\text{O}_2 + 0,00005\%$ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) встановили, що мікроелектрохімічна гетерогенність ОМ та ЗТВ майже не відрізняється: $\Delta E = 20...80$ mV. Тут помітний перехід із області ЗТВ в область ЗШ, що проявляється у зміщенні електродного потенціалу до від’ємніших значень (рис. 4*a, b*). Мікроелектрохімічна гетерогенність поверхні ЗШ, виконаного електродом FOX EV 50, дещо вища ($\Delta E = 25...95$ mV), ніж електродами Basic One (25...85 mV) та УОНІІ-13/55Р (20...80 mV) (рис. 4*c*). Ці результати узгоджуються із електрохімічними вимірами, коли зварювали електродом УОНІІ-13/55Р, застосовуючи локальні комірки: зміна потенціалу корозії для ЗШ становить 20...70 mV, для ЗТВ – 40...85 mV (табл. 3), для ОМ – 30...90 mV (табл. 2), що може викликати нерівномірність корозійних процесів та утворення виразок.

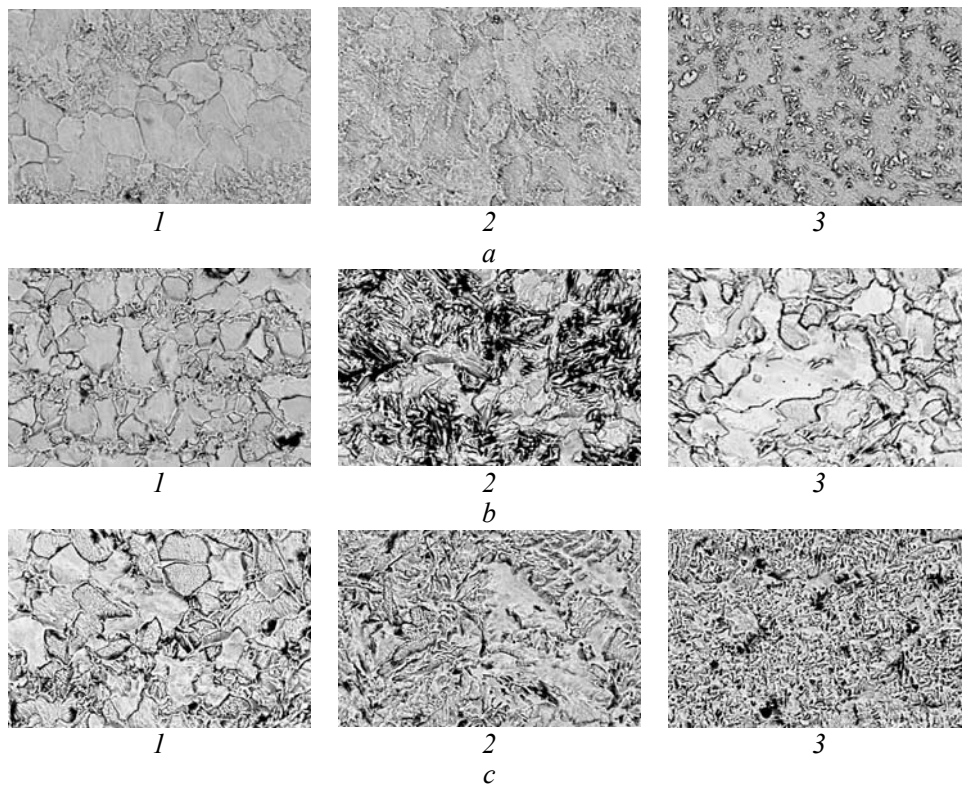


Рис. 3. Мікроструктура різних зон зварного з'єднання сталі 17Г1СУ, виконаного електродами FOX EV 50 (a), Basic One (b) та УОНИИ-13/55P (c): 1 – основний метал; 2 – зона термічного впливу; 3 – зварний шов.

Fig. 3. Microstructure of the weld different areas of 17Г1СУ steel done by electrodes FOX EV 50 (a), Basic One (b) and УОНИИ-13/55P (c): 1 – parent metal; 2 – thermal affected zone; 3 – joint weld.

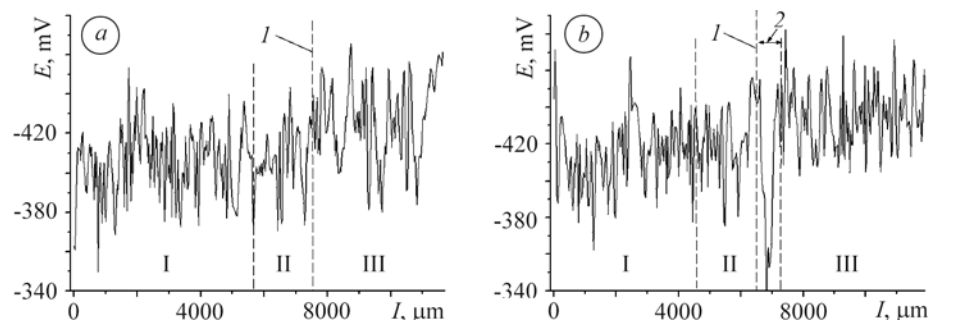
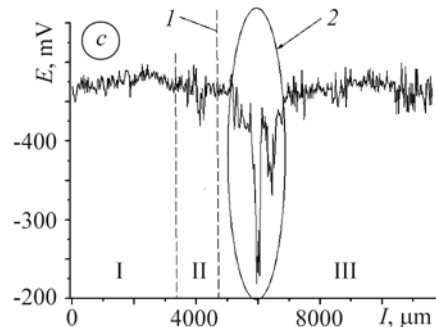


Рис. 4. Локальні потенціали поверхні зварного з'єднання сталі 17Г1СУ, виконаного електродами FOX EV 50 (a), Basic One (b), УОНИИ-13/55P (c) у рухомій краплі МЕХ: I – основний метал; II – зона термічного впливу; III – зварний шов; 1 – лінія сплавлення; 2 – пора.

Fig. 4. Change of local potentials of 17Г1СУ steel surface of the weld done by electrodes FOX EV 50 (a), Basic One (b), УОНИИ-13/55P (c) in a mobile drop of MEX solution: I – parent metal; II – thermal affected zone; III – joint weld; 1 – fusion line; 2 – pore.



Шви, зварені негартованими електродами Basic One та УОНІИ-13/55Р, містять пори, в межах яких різниця значень локальних електродних потенціалів $\Delta E = 100 \dots 265$ mV (рис. 4b, c).

За мікроелектрохімічного сканування ЗТВ (див. рис. 1) різних шарів ЗШ поблизу найбільша різниця між локальними електродними потенціалами зафіксована біля облицовального шару $\Delta E = 20 \dots 75$ mV (рис. 5a; табл. 3). Гетерогенність поверхні різних ділянок шва, звареного електродами УОНІИ-13/55Р, практично однакова (рис. 5b; табл. 3), що обумовлюватиме рівномірніший розвиток корозії.

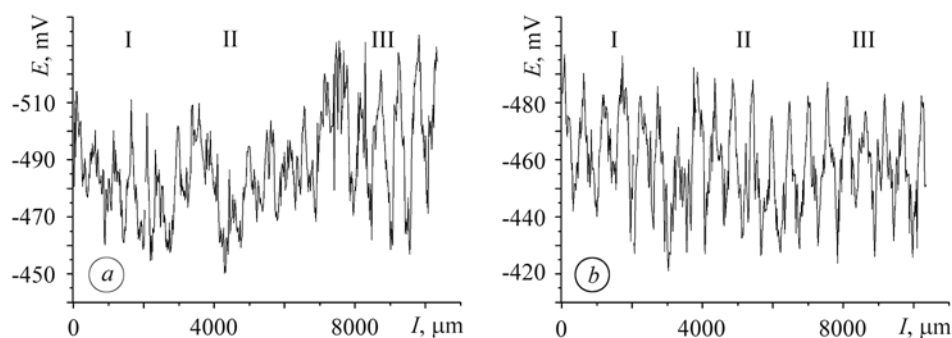


Рис. 5. Локальні потенціали поверхні зварного з'єднання сталі 17Г1СУ, виконаного електродами УОНІИ-13/55Р у рухомій краплі МЕХ: *a* – зона термічного впливу; *b* – зварний шов. I – кореневий; II – заповнювальний; III – облицовальний шари.

Fig. 5. Change of local potentials of 17Г1СУ steel surface of the weld done by electrode УОНІИ-13/55Р in a mobile drop of МЕХ solution: *a* – thermal affected zone; *b* – joint weld. I – root; II – filling; III – facing layers.

Дослідження мікротвердості ЗШ, виконаного усіма електродами, виявили (рис. 7), що до лінії сплавлення її значення практично не відрізняються (1,6... 2,25 GPa). Проте середні значення мікротвердості шва, звареного електродами Basic One та УОНІИ-13/55Р, дещо вище (1,6... 2,2 GPa), ніж електродами FOX EV 50 (1,2... 1,4 GPa). Мікротвердість ЗТВ за використання електродів Basic One та УОНІИ-13/55Р зростає до 2,25 GPa, так як їй властива феритно-перлітна голчаста структура з дещо вищою мікротвердістю, ніж полідрічна [5, 6]. Це чітко проявляється для ЗТВ зразка, виконаного електродами FOX EV 50 (рис. 7).

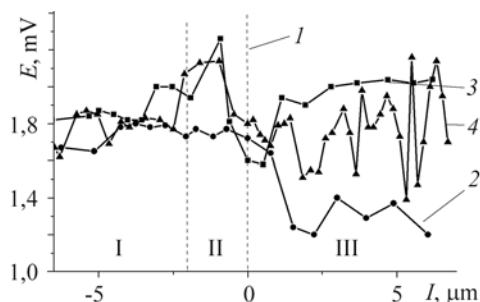


Рис. 6. Мікротвердість зварного з'єднання сталі 17Г1СУ, виконаного електродами FOX EV 50, Basic One, УОНІИ-13/55Р (криві 2–4, відповідно): *1* – лінія сплавлення; I – основний метал; II – зона термічного впливу; III – зварний шов.

Fig. 6. Microhardness of 17Г1СУ steel weld done by the electrodes of FOX EV 50, Basic One, УОНІИ-13/55Р (curves 2–4, respectively); *1* – fusion line. I – parent metal; II – thermal affected zone; III – joint weld.

Отже, найбільше значення струму корозії має ЗТВ зразків із ЗШ, виконаними усіма електродами. Від'ємніші значення потенціалів корозії, що властиві саме ЗТВ, пришвидшуватимуть корозійно-механічне пошкодження. За використання

електрода FOX EV 50 мікроелектрохімічна гетерогенність ЗШ зростає, а мікротвердість знижується.

ВИСНОВКИ

Показано, що у 3%-му розчині NaCl потенціали корозії різних зон зварних з'єднань, виконаних електродами FOX EV 50, Basic One та УОНІІІ-13/55Р, різняться на 20...150 mV. Швидкість корозії зони термічного впливу більша майже в ~1,4 рази, ніж зварного шва, звареного електродом FOX EV 50; у 2,5 рази – електродом Basic One та практично не відрізняється для зварного з'єднання, виконаного електродом УОНІІІ-13/55Р. Потенціали корозії різних шарів зварного шва та зони термічного впливу біля них збільшують електрохімічну гетерогенність до ~130 mV, порівняно з основним металом. Струми корозії основного металу відрізняються на ~15%, а різних шарів зварного шва – не більше ніж на 69%. Мікроелектрохімічна гетерогенність різних зон зварного з'єднання за використання всіх електродів, визначена методом рухомої краплі, майже однакова ($\Delta E = 20...80$ mV), крім зварного шва, виконаного електродом FOX EV 50 ($\Delta E = 25...95$ mV). Зауважимо, що його мікротвердість теж нижча.

РЕЗЮМЕ. Изучены электрохимические и микроэлектрохимические характеристики, а также микротвердость фрагмента трубы из стали 17Г1СУ со сварным швом, выполненным электродами FOX EV 50, Basic One и УОНІІІ-13/55Р. Потенциалы коррозии разных слоев сварного шва и зоны термического влияния около них увеличивают электрохимическую гетерогенность до ~130 mV, сравнительно с основным металлом. Токи коррозии основного металла отличаются на ~15%, а разных слоев сварного шва – не более чем на 69%. Микроэлектрохимическая гетерогенность разных зон сварного соединения при использовании всех электродов определена методом подвижной капли и практически не отличается ($\Delta E = 20...80$ mV). Только сварному шву, выполненному электродом FOX EV 50, свойственно более высокое ее значение ($\Delta E = 25...95$ mV). Микротвердость металла до линии сплавления со стороны основного металла остается неизменной для всех исследуемых электродов (1,6...2,25 GPa), однако она ниже для шва, выполненного электродом FOX EV 50 (1,2...1,4 GPa), чем для шва, сваренного электродами Basic One и УОНІІІ-13/55Р (1,6...2,2 GPa).

SUMMARY. The electrochemical, microelectrochemical characteristics and microhardness of 17Г1СУ pipe steel fragment with a weld, done by FOX EV 50, Basic One and УОНІІІ-13/55Р electrodes has been studied. Corrosion potentials of the joint weld different layers and thermal affected zone near them increase the electrochemical heterogeneity to ~130 mV, comparatively with a parent metal. Corrosion currents of the parent metal differs by ~15%, and different layers of the joint weld – not more than by ~69%. Microelectrochemical heterogeneity of the weld different areas when using all electrodes was identical ($\Delta E = 20...80$ mV), except for the joint weld of the specimens which done by FOX EV 50 electrode ($\Delta E = 25...95$ mV). The value of microhardness to the fusion line from the side of the parent metal remains unchanged for all electrodes (1.6...2.25 GPa). However, they are much lower for the weld executed by FOX EV 50 electrode (1.2...1.4 GPa), than for that done by the Basic One and УОНІІІ-13/55Р electrodes (1.6...2.2 GPa).

1. <http://weldingsite.com.ua/spravochnik/analogi/>
2. <http://www.boehler-welding.com>
3. <http://www.lincolnelectric.com/products/msds/>
4. Хома М. С., Сисин Г. М. Корозійно-електрохімічні характеристики сталі 10Г2С1 магістрального газопроводу, експлуатованого протягом 45 років // Проблеми корозії і протикорозійного захисту матеріалів: в 2-х т. – Спецвип. журн. “Фіз.-хім. механіка матеріалів”. – 2010. – № 5. – С. 650–654.
5. Гуляев А. П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1977. – 647 с.
6. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. – К.: Наук. думка, 1973. – 216 с.

Одержано 29.06.2011