

Напружено-деформований стан об'єктів з корозійними дефектами при відновленні шляхом заварювання

І. І. Перепічай¹ • А. О. Перепічай¹ • К. О. Зворикін¹

Received: 12 May 2020 / Accepted: 24 November 2020

Анотація. Доведено актуальність проблематики пов'язаної з періодичною діагностикою та ремонтом лінійної ділянки магістральних трубопроводів та доцільність застосування ремонтних технологій для відновлення необхідної товщини стінки. Експериментальна частина роботи полягала у заварюванні корозійного дефекту на зовнішній поверхні труби послідовним наплавленням «ниткових» валиків в середовищі CO₂ (MAG) - metal active gas та ручним дуговим (ММА) - manual metal arc способом в три шари, з контурним швом. Наведено результати залишкового напружено-деформованого стану, отримані експериментальним шляхом при заварюванні дефекту корозійного походження, а також – моделювання напружено-деформованого стану (НДС) методом скінченних елементів (МСЕ), який формується при цьому на ділянці труби із сталі 17Г1С діаметром 1420×16 мм. В якості моделі дефекту прийнято заглиблення овальної форми розмірами 100×60 мм і глибиною 6 мм в центральній частині. Проведено аналіз та порівняння розподілу напружень, пластичних деформацій та переміщень для цих способів. Встановлено основні фактори, що впливають на НДС. Показано, що НДС для різних способів зварювання має однаковий характер розподілу, але відрізняється за величиною. Зроблено припущення про взаємозв'язок переміщень зразка при формуванні залишкових напружень у вільному стані та, при наявності жорстких в'язей. Підтверджено доцільність використання MAG способу ремонту стоншеної ділянки магістрального трубопроводу з точки зору формування рівня залишкового НДС. Виявлено ефект пов'язаний з формуванням області з підвищеними значеннями залишкових напружень розтягу після накладання останнього шва кожного шару який пояснюється дією поперечної та повздовжньої усадки металу через взаємодію останнього валика в шарі з боковою стінкою дефекту.

Ключові слова: дефект корозійного походження; ручне-дугове зварювання (ММА), зварювання в середовищі CO₂ (MAG); метод скінченних елементів (МСЕ); напружено-деформований стан (НДС).

Вступ

Результати систематичних обстежень об'єктів нафтопереробного комплексу свідчать про те, що під час експлуатації технологічного устаткування виготовленого з низьковуглецевих і низьколегованих сталей може виникати граничний стан, обумовлений, в першу чергу, утворенням місцевих об'ємних дефектів корозійного походження [1]. Критичним при цьому є збереження працездатності конструкції. Однак подальша експлуатація об'єкта пов'язана з підвищеним ризиком

виникнення відмов. За цих обставин виникає необхідність відновлення ділянки з таким видом дефекту, зокрема зварюванням. З другого боку при заварюванні дефектів формується плоский напружено-деформований стан [2], який може призвести до порушення геометрії об'єктів, виникнення тріщин, та погіршення працездатності конструкції в цілому [3–5]. Відповідно встановлення величини та характеру розподілу залишкових напружень і деформацій, які виникають в результаті ремонту об'ємних корозійних дефектів, а також визначення їх впливу на працездатність тонкостінної оболонкової конструкції при статичних навантаженнях, залишається досить актуальним і проблемним питанням.

✉ І. І. Перепічай
irunaperepichay@gmail.com

✉ К. О. Зворикін
constantine.oleg@gmail.com

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

Мета досліджень

Провести експериментальні дослідження по визначенню напруженого стану при заплавленні корозій-

ного дефекту в три шари на трубі із сталі 17Г1С ММА і МАG способами зварювання. Порівняти отримані результати НДС при наплавленні з розв'язком зв'язаної задачі термопружнопластичності моделювання об'ємного дефекту стоншення стінки заданих розмірів на ділянці труби магістрального трубопроводу. Визначити характер розподілу, величини залишкових напружень, еквівалентних пластичних деформацій і переміщень а також закономірності їх формування після зварювання дефекту на ділянці труби магістрального трубопроводу.

Методика проведення досліджень

Моделювання проводились на зразку труби діаметром 1420×16 мм із сталі 17Г1С (табл.1) з дефектом 100×60×6 мм, який імітує локальне корозійне пошкодження (рис. 1). Механічні властивості сталі наведені в табл. 2.

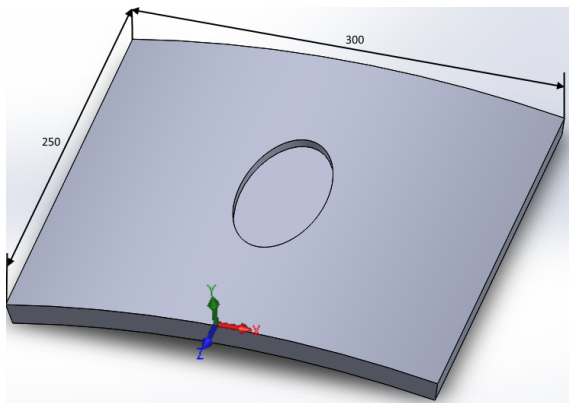


Рис. 1. Схематичне подання ділянки труби 17Г1С з дефектом, який імітує локальне корозійне пошкодження

Таблиця 1. Хімічний склад сталі 17Г1С, % [6]

Матеріал	C	Si	Mn	Cr	Ni	As	Cu	S	P
17Г1С	0,17	0,4–0,6	1,15–1,6	< 0,3	< 0,03	< 0,08	< 0,3	< 0,04	< 0,008

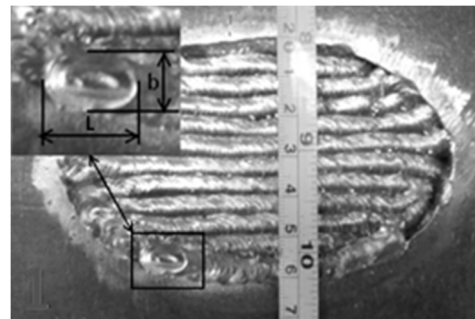
Таблиця 2. Механічні характеристики сталі 17Г1С [6]

Матеріал	σ_b , МПа	σ_t , МПа	δ , %
17Г1С	510	345	23

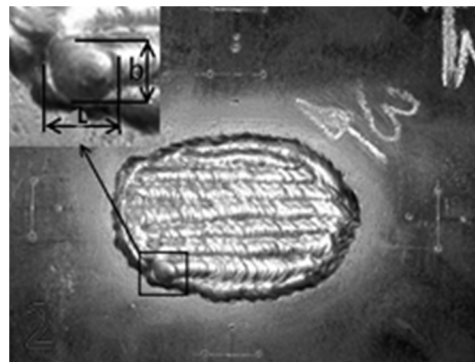
Згідно до рекомендацій нормативних документів, схема ремонту (наплавлення дефекту) відбувається в три шари [7]. Перший шар накладають вздовж дефекту зліва направо, другий перпендикулярно першому –

зверху вниз, після чого наноситься контурний шов по периметру дефекту, та третій – відпалювальний шар, що виконується аналогічно першому.

Достовірність скінчено-елементного моделювання залежить від повноти даних вхідних параметрів, правильності граничних умов та густини сітки скінчених елементів в зоні зварювання. Для проведення розрахунку методом скінчених елементів (МСЕ), експериментальним шляхом встановлені геометричні параметри зварювальної ванни (табл. 3) для кожного шару при застосуванні ручного дугового способу (ММА) та в середовищі CO₂ (МАG). На рис. 2 наведено схему вимірювання геометричних параметрів зварювальної ванни при застосуванні способу МАG. Розміри ванни характеризують об'ємне джерело теплоти [8], яке є вхідним параметром для подальшого розрахунку МСЕ.



a



б

Рис. 2. Зовнішній вигляд ремонтної ділянки та геометричні параметри ванни при зварюванні МАG, де *a* – для 1-го і 2-го шарів, *б* – для 3-го і контурного швів наплавки; *l* – довжина ванни, *b* – ширина ванни

Скінчено-елементна модель представляє собою вирізану з труби область прямокутної форми розмірами 250×300×16 мм. В якості граничних умов виступає жорстке закріплення у вузлі з координатами (0;0;0) для забезпечення відповідності змодельованого процесу зварювання дефекту умовам зварювання дефекту на вільній пластині-зразку експериментальним шляхом.

Результати моделювання напружено-деформованого стану при зварюванні способами MAG та MMA

Проведено розрахунок МСЕ [8] та показано розподіл залишкових напружень, деформацій та переміщень для способу зварювання в середовищі вуглекислого газу та ручного дугового зварювання покритим електродом. Режими та параметри наплавки для обох способів наведено в (табл. 3, 4). В розрахунковий алгоритм включені механічні та теплофізичні характеристики сталі (модуль пружності, межа текучості, температурний коефіцієнт лінійного розширення, теплопровідність, об'ємна теплоємність), які змінювались в залежності від температури нагріву та охолодження. Граничні умови, спосіб закріплення та розмірність сітки скінченних елементів однакові для обох способів зварювання.

Таблиця 3. Параметри режиму наплавлення

№ шару	Зварювальний струм, А	Напруга, В	Швидкість наплавлення, м/год	ККД
Ручне дугове зварювання (ММА)				
1,2	118	19,0	9,0	0,8
3,4	118	19,0	9,0	0,8
Зварювання в CO ₂ (MAG)				
1,2	135	19,5	16,2	0,8
3,4	135	19,5	13,6	0,8

Для зварювання в середовищі вуглекислого газу застосовано дріт марки Св08Г2С[9], а для ММА способу покриті електроди марки УОНИ 13/55А[10].

Таблиця 4. Геометричні параметри зварювальної ванни

№ шару	Ширина, мм	Довжина, мм	Глибина, мм
Ручне дугове зварювання (ММА)			
1,2	9	12	4
3,4	10	12	4
Зварювання в CO ₂ (MAG)			
1,2	8	11	4
3,4	10	12	4

Як видно з рис. 3, розподіл залишкових напружень на лицьовій та зворотній поверхні зразка для ММА та MAG способів зварювання практично не відрізняються. Проте навколо дефектної області на лицьовій поверхні спостерігається значна концентрація напружень. В той же час на зворотній поверхні розподіл напружень однаковий за характером для обох способів, але зона розтягувальних залишкових напружень

під дефектом для ММА ширша ніж для MAG способу. Вказана різниця пов'язана з більшим сумарним тепловкладенням та меншою швидкістю при застосуванні ММА способу. Крім того, для обох способів зварювання в зоні наплавлення дефекту присутня локальна область з підвищеними на 45–50% значеннями поздовжніх залишкових напружень розтягу. Ефект пояснюється сплеском пластичних деформацій (сильною дією поперечної та повздовжньої усадки металу через взаємодію останнього валика в шарі з боковою стінкою дефекту) що виникають в місці накладання останнього шва, які і спричинили підвищення напружень розтягу в даній області. Зростання напружень спостерігається після виконання кожного наступного шару рис. 3, (приведено розподіл лише для останнього).

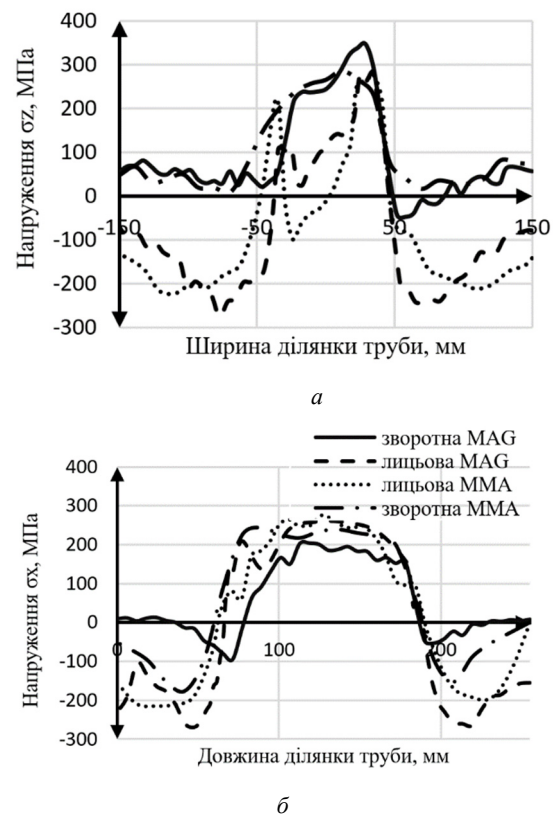


Рис. 3. Розподіл повздовжніх (а) та поперечних (б) нормальних напружень

Основною причиною утворення залишкових зварювальних напружень є некомпенсовані в процесі наплавки пластичні деформації. Як видно з рис. 4, на якому показано поля еквівалентних залишкових пластичних деформацій, деформації для обох способів зварювання не перевищують 0,1% і зосереджені в зоні накладання швів. Наявність залишкових пластичних деформацій на зворотній стороні пояснюється значною поперечною та повздовжньою усадкою наплавленої ділянки

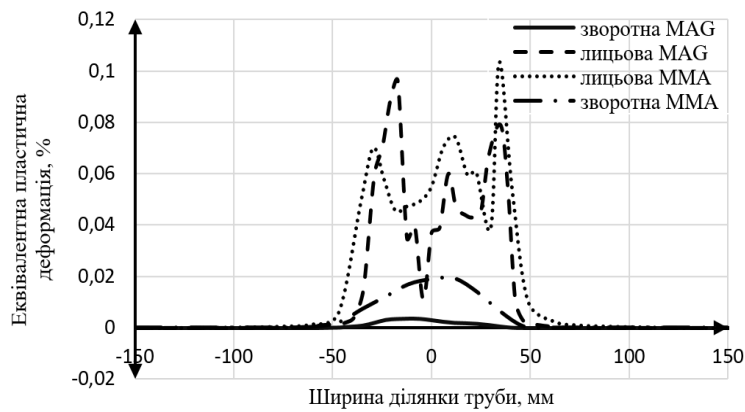


Рис. 4. Розподіл еквівалентних пластичних деформацій в середньому поперечному перерізі

Звичайно, що процес наплавлення або заповнення в декілька шарів окремих ділянок ушкодженої поверхні характеризується висококонцентрованим внесенням тепла. При цьому кількість внесеного тепла для різних способів зварювання різна, тому і переміщення будуть дещо відрізнятись. При аналізі напружено-деформованого стану ділянки тонкостінної оболонки доцільно розглядати наступні види переміщень: повздовжні, поперечні і вигин з площини [2]. Для подальших досліджень представляло інтерес порівняти переміщення для обох способів зварювання.

Для MAG способу величина повздовжніх переміщень (рис. 5, а) на лицьовій стороні зразка складає 0,48 мм, а для MMA способу – 0,33 мм. В той же час, на зворотній стороні зразка переміщення для MMA способу в два рази вищі ніж переміщення для MAG, і складають «->»0,28 мм та «->»0,12 мм відповідно.

Графіки поперечних переміщень (рис. 5 б), схожі за характером до повздовжніх переміщень. Відрізняються лише напрямком і величиною. Згідно до рисунка, переміщення для обох способів мають однаковий характер розподілу через дію в області наплавлення

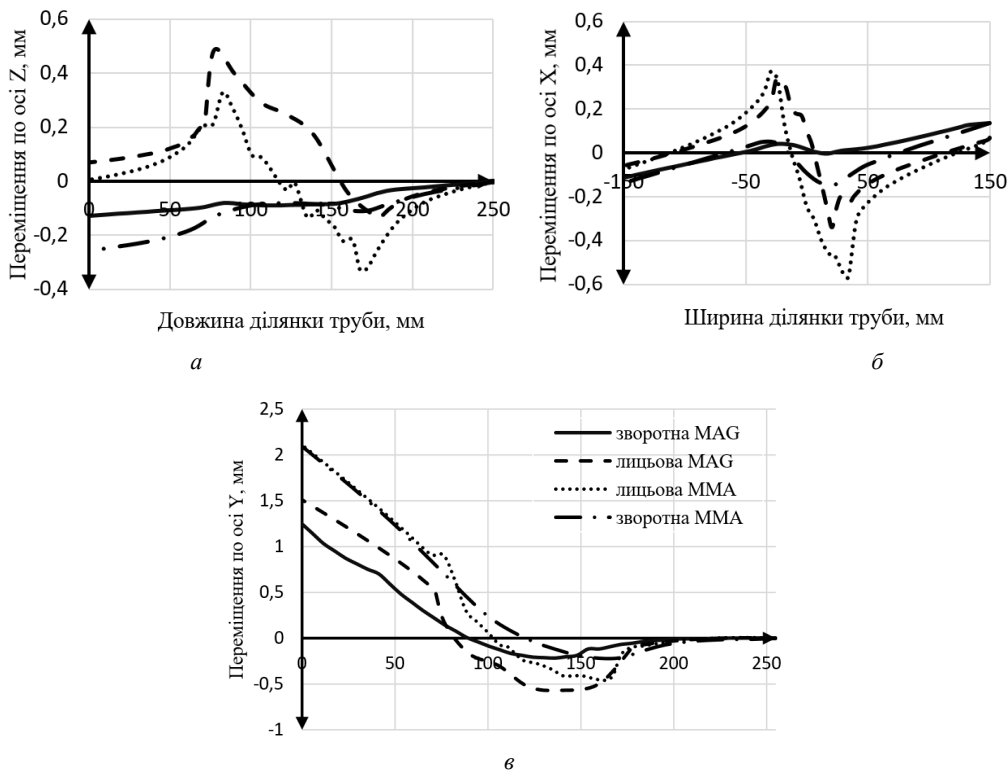


Рис. 5. Розподіл повздовжніх (а), поперечних (б) та переміщень з площини (в)

залишкових пластичних деформацій скорочення як в поздовжньому так і поперечному напрямку.

Переміщення із площини (рис. 5 в) обумовлені усадкою наплавленого металу дефектної ділянки, в т.ч. для способу МАГ на лицьовій поверхні – «→»0,5 мм та для способу ММА – «→»0,47 мм. На зворотній поверхні «←»0,2 мм для обох способів. При цьому крайки ділянки переміщуються вгору на +2,1 мм для способу ММА та +1,3...+1,5 мм для способу МАГ відносно початку координат згідно рис. 1.

Отже спосіб ММА призводить до більших переміщень із площини, як наслідок, до більших напружень в цій області за умови дії в'язей в замкненій оболонці.

Висновки

- встановлено, що характер залишкових напружень, деформацій та переміщень для ММА та МАГ зварювання в цілому мають якісно схожий характер і відрізняється лише величиною, а не напрямком;

- показано, що зварювання дефекту ММА способом призводить до більших переміщень зростає у вільному стані, а отже – більших залишкових напружень при наявності в'язей в замкненій оболонці, що є негативним явищем. Тобто при відновленні дефектних ділянок доцільно використовувати спосіб МАГ ;

- виявлено ефект пов'язаний з поступовим формуванням області з підвищеними на 45-50% значеннями залишкових напружень розтягу після накладання кожного шару який пояснюється сплеском пластичних деформацій (сильною дією поперечної та поздовжньої усадки металу через взаємодію останнього валика в шарі з боковою стінкою дефекту)

- застосування МАГ способу при ремонті посудин тиску з корозійними пошкодженнями дозволяє не тільки значно підвищити якість наплавленого металу та скоротити час ремонтних робіт але й зменшити величину залишкових напружень і як результат міцності відновленої ділянки конструкції. Даний спосіб без обмежень можна застосовувати для відновлення оболонкових конструкцій з низьколегованих низьковуглецевих сталей.

References

- [1] M.D Rabkina, A.O. Perepichai and I.I Perepichai, "Analiz rezul'tativ tekhnichnogo diagnostuvannya teploobminnikiv dlya ranzhuvannya ekspluatatsiynikh defektiv ta otsinki ikh vplivu na zalishkoviy resurs", *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchii kontrol'*, no. 2, pp. 50–53, 2017.
- [2] V.M. Prokhorenko and O.V. Prokhorenko, *Naprzhennya ta deformatsii u zvarnikh z'ednannyakh i konstruktsiyakh*, Kyiv, Ukraine: NTUU "KPI", 2009.
- [3] A.A. Antonov, "Ostatochnye napryazheniya posle remontnoi naplavki trub i ikh regulirovanie", *Territoriya neftegaz*, no. 8, pp.70–76, 2014.
- [4] V.I. Makhnenko *et al.*, "Remont magistral'nykh truboprovodov svarkoi bez vyvoda ikh iz ekspluatatsii", *Problemy prochnosti*, no. 5, 2009, pp. 86–100.
- [5] V.S. But *et al.*, "Issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i prognozirovaniye rabotosposobnosti svarnykh soedinenii konstruktivnykh elementov s truboprovodom. Sovershenstvovanie sistem upravleniya i ekspluatatsii magistral'nogo transporta nefiti", *Sb. nauchn. Tr.*, Ufa: VNIISPTneft', pp. 189–196, 1988.
- [6] *Marochnik staley i splaviv*. [Online]. Available: http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php
- [7] OTU 3-01, "Sosudy i apparaty, obshchie tekhnicheskije usloviya na remont korpusov".
- [8] Goldak, John A., Akhlaghi, Mehdi, *Computational welding mechanics*. Springer, Boston, MA, 2005. DOI: 10.1007/b101137
- [9] V. Pavelic *et al.*, "Experimental and computed temperature histories in gas tungsten arc welding of thin plates", *Welding J.*, Res. Suppl., 48. pp. 295–305, 1969.
- [10] A. Tolok *et al.*, *Metod konechnykh elementov: teoriya, algoritmy, realizatsiya*, Kyiv, Ukraine.: Nauk. dumka, 2003.
- [11] *Marochnik elektrodov*. [Online]. Available: <http://www.spetsselectrode.ru/electrod/1355-A.htm>

Напряженно-деформированное состояние при восстановлении объектов с коррозионными дефектами путем сварки

И. И. Перепичай, А. А. Перепичай, К. О. Зворыкин

Аннотация. Доказана актуальность проблематики связанной с периодической диагностикой и ремонтом линейного участка магистральных трубопроводов и целесообразность применения ремонтных технологий для восстановления необходимой толщины стенки. Экспериментальная часть работы заключалась в заварки коррозионного дефекта на наружной поверхности трубы с последовательной наплавкой «ниточных» валиков в среде CO₂ (МАГ) - metal active gas и ручной дуговой (ММА) - manual metal arc способом в три слоя, с контурным швом. Приведены результаты остаточного напряженно-деформированного состояния, полученные экспериментальным путем при заварки дефекта коррозионного происхождения, а также - моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) методом конечных элементов (МКЭ), который формируется при этом на участке трубы из стали 17Г1С диаметром 1420 × 16 мм. В качестве модели дефекта принято

углубление овальной формы размерами 100×60 мм и глубиной 6 мм в центральной части .. Проведен анализ и сравнение распределения напряжений, пластических деформаций и перемещений для этих способов. Установлены основные факторы, влияющие на НДС. Показано, что НДС для различных способов сварки имеет одинаковый характер распределения, но отличается по величине. Сделано предположение о взаимосвязи перемещений образца при формировании остаточных напряжений в свободном состоянии и при наличии жестких связей. Подтверждена целесообразность использования MAG способа ремонта истонченной участка магистрального трубопровода с точки зрения формирования уровня остаточного НДС. Обнаружен эффект связан с формированием области с повышенными значениями остаточных напряжений растяжения после наложения последнего шва каждого слоя который объясняется действием поперечной и продольной усадки металла через взаимодействие последнего валика в слое с боковой стенкой дефекта.

Ключевые слова: дефект коррозионного происхождения; ручная дуговая сварка (РДС), сварка в среде CO_2 (MAG) метод конечных элементов (МКЭ) напряженно-деформированное состояние (НДС).

Stress-strain state during recovery objects with corrosion defects by welding

I. Perepichai, A. Perepichai, K. Zvorykin

Abstract. The urgency of the problems connected with periodical diagnostics and repair of the linear section of main pipelines and the expediency of the use of repair technologies for restoration of the required wall thickness are proved. The experimental part of the work was the welding of a corrosion defect on the outer surface of the pipe by successive surfacing of the "filament" rollers in the environment of CO_2 (MAG) - metal active gas and manual arc (MMA) - manual metal arc method in three layers, with a contour seam. The results of the residual stress-strain state obtained experimentally by brewing the defect of corrosive origin are presented, as well as the modeling of the stress-strain state (NDS) by the finite element method (ITU), which is formed at the same time on the section of a tube of 17G1C steel with a diameter of 1420×16 mm. As a defect model, a hollow oval shape with dimensions of 100×60 mm and a depth of 6 mm in the central part was made. The analysis and comparison of stress distribution, plastic deformations and displacements for these methods were made. The main factors influencing the VAT are established. It is shown that the VAT for different welding methods has the same distribution pattern, but differs in size. An assumption is made about the interconnection of displacements of the sample in the formation of residual stresses in the free state and, in the presence of rigid ligaments. The appropriateness of using the MAG method of repairing the thinned section of the main pipeline in terms of the formation of residual VAT rates has been confirmed. The effect is related to the formation of an area with increased values of residual tensile stress after the overlap of the last seam of each layer due to the effect of transverse and longitudinal shrinkage of the metal through the interaction of the last roller in the layer with the side wall of the defect.

Keywords: defect of corrosive origin; manual-arc welding (MAW), welding in shielding gases (MAG) finite element model; stress-strain state