

УДК 621.791.011; 539.512; 620.181

УДАРНА В'ЯЗКІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ЗІ СТАЛІ 34ХН2МА, ВИКОНАНИХ ЕЛЕКТРОДАМИ РІЗНОГО ФАЗОВОГО СКЛАДУ

А. Р. ДЗЮБИК

Національний університет "Львівська політехніка"

Оцінено опір крихкому руйнуванню металу різних зон зварних з'єднань зі сталі типу 34ХН2МА, отриманих з використанням електродів різного фазового складу або за їх поєднання. Встановлено, що незалежно від зони зварного з'єднання, в якій виконували надріз на зразку, найвищою ударною в'язкістю володіє метал шва, одержаний аустенітним електродом, а найнижчою – за поєднання аустенітного (корінь шва) і феритно-перлітного. Незалежно від вжитих електродів ударна в'язкість металу зони термічного впливу завжди була найнижча і тому саме вона визначала роботоздатність зварних з'єднань за динамічних навантажень. Фрактографічно підтвердили, що аустенітні електроди є оптимальними для зварювання листів із високоміцної сталі, оскільки забезпечують найвищу енергоємність їх руйнування за динамічних навантажень.

Ключові слова: зварні з'єднання, ударна в'язкість, фрактографічні особливості руйнування.

Вступ. Відомо, що високоміцний металопрокат у машинобудуванні ефективний у зварних конструкціях. Проте за наявності концентраторів напружень від дефектів у зварних з'єднаннях (ЗЗ) через недосконалі технології і режими зварювання, незадовільну якість електродів, покриттів і флюсів, низьку кваліфікацію зварників тощо [1] небезпека їх руйнування зростає. Однак це ще не свідчить про втрату роботоздатності зварених елементів [2]. Адже механічні властивості ЗЗ залежать від використаних матеріалів, розмірів і форми дефектів, наводнотворного чинника, умов експлуатації, навантажень тощо [3–6], які важливо враховувати за періодичного впливу на зварні (особливо корпусні) конструкції високих динамічних навантажень, коли більшість матеріалів стають схильними до крихкого руйнування [7, 8]. Адже ударна в'язкість як інтегральна характеристика, що одночасно залежить від міцності і пластичності металу, чутливіше реагує на неоднорідність металу [9] і загалом для металу шва (МШ) знижується зі збільшенням площі дефектів у ЗЗ. Проте навіть за співвідношення площі дефектів (пори, непровари і шлакові включення) і перерізу зразка 30% ударна в'язкість МШ за динамічного навантаження не була нижчою за допустимий рівень (0,26 MJ/m²) [10].

Технологічні аспекти зварювання (особливо спрямовані на запобігання утворенню холодних тріщин) також залишаються в полі зору дослідників [11, 12]. Це стосується в першу чергу режимів нагрівання та охолодження [13–16], чи обґрунтування вибору електродів [17] для оптимізації структури і властивостей металу ЗЗ. Водночас висновки авторів [18, 19] про підвищення стійкості ЗЗ до зародження холодних тріщин за аустенітної структури МШ не узгоджуються з висновками праці [13]. Тому нижче, розвиваючи виконані раніше дослідження [20], проаналізуємо вплив фазового складу електродів на опір крихкому руйнуванню металу різних зон ЗЗ та фрактографічні особливості їх руйнування.

Контактна особа: А. Р. ДЗЮБИК, e-mail: dar.lviv@gmail.com

Матеріали та методи. Листову сталь типу 34ХН2МА (mass%: 0,27 С; 0,26 Si; 0,94 Mn; 0,76 Cr; 0,21 Мо; 1,16 Ni; 0,14 Cu; 0,06 V; 0,06 W) товщиною 10 mm зварювали суцільними електродами (дроти діаметром 1,2 mm) півавтоматичним способом у суміші газів (98% Ar + 2% O₂). За хімічним складом вони належали до різних систем легування: Св-08Г2С (феритно-перлітного типу) та Св-08Х20Н9Г7Т (аустенітного), що забезпечило МШ відповідну структуру. Використали двошарове (зони I та II на рис. 1а) заповнення об'єму між крайками зварюваних листів. У кореневій частині МШ (зона I) струм зварювання становив 110...125 А, а напруга дуги – 19...20,5 V, а у заповнюваній (зона II) струм досягав 190...220 А, а напруга дуги – 21...23 V. Швидкість зварювання в кореневій частині шва становила ~ 25, а в заповнюваній – ~ 30 m/h.

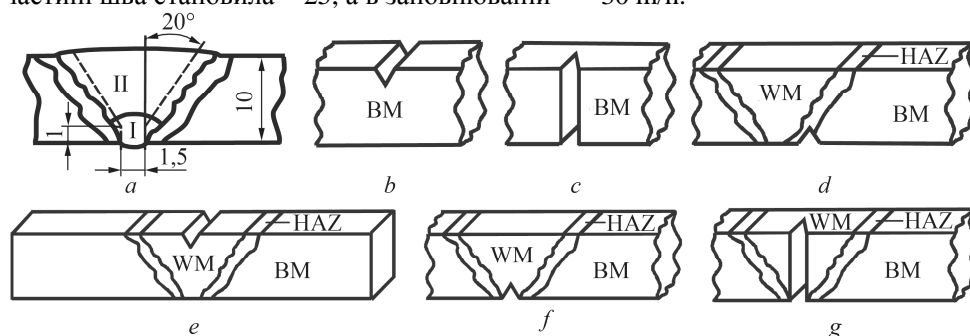


Рис. 1. Типові зони (штрихами позначені крайки листів) у поперечному перерізі зварного з'єднання між двома листами (а) та схеми розташування надрізів на ударних зразках в ОМ (b, c), ЗТВ (d) та МШ (e-g).

Fig. 1. Typical zones (dashed edges of the sheets) in the cross-section of the welded joint between two sheets (a) and schemes of mechanical notches location in impact specimens in the base metal (BM) (b, c), in the heat-affected zones (HAZ) (d) and in the weld metal (WM) (e-g).

Загалом для досліджень використали три варіанти ЗЗ: варіант 1 відповідав ЗЗ, обидві зони (I та II на рис. 1а) в якому виконані дротом Св-08Х20Н9Г7Т, варіант 2 – ЗЗ, зона I якого виконана дротом Св-08Х20Н9Г7Т, а II – дротом Св-08Г2С, варіант 3 – ЗЗ, обидві зони якого виконані дротом Св-08Г2С.

Зразки вирізали поперек зварних швів лазером, щоб якнайменше спотворити механічне оброблення. Для випробувань на ударну в'язкість використали стандартні зразки 10×10×55 mm з гострим (радіус 0,25 mm) V-подібним концентратором (зразки Шарпі), які досліджували на маятниковому копрі типу ІО-5003. Надрізи на зразках у різних зонах ЗЗ розташували згідно зі схемами на рис. 1b-g. Фрактографічні особливості зламів вивчали на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP.

Результати та їх обговорення. Опір крихкому руйнуванню металу різних зон ЗЗ. Результати випроб на удар наведені у таблиці (усереднені значення 4–5 випроб, розкид даних не перевищував 5%). Виявили, що опір крихкому руйнуванню ОМ (сталь типу 34ХН2МА) практично нечутливий до напрямку вальцювання, що є ознакою однорідності його властивостей. Тоді як у МШ ця однорідність порушується. Зокрема, у всіх трьох варіантах ЗЗ ударна в'язкість МШ найнижча за поширення руйнування вздовж напрямку зварювання (концентратор на зразку згідно з рис. 1g). Причому її мінімальне значення (0,51 MJ/m²) зафіксували у МШ, кореневу зону I якого виконали електродам з аустенітної сталі, а зону заповнення II – дротом Св-08Г2С (варіант 2 ЗЗ у таблиці). А найкращий результат за такого ж розташування концентратора у зразку отримали для МШ, одержаного тільки аустенітним електродам (варіант 1, KCV = 1,3 MJ/m²). Причому за інших

розташувань (рис. 1e, f) МШ, виконаний тільки аустенітним електродом, виявився найкращим за значенням KCV . Така тенденція збереглася для МШ (варіант 1 проти інших варіантів 33) незалежно від місцезнаходження концентраторів. Тоді як МШ після зварювання двома типами електродів (варіант 2) виявився найгіршим (за винятком випадку, коли надріз розташовували з боку кореня шва; рис. 1f). Це пояснили тим, що вершина концентратора в зразку вже вийшла за межі кореневої аустенітної зони I і опинилася в зоні II заповнення об'єму між крайками зварюваних листів, виконаної дротом Св-08Г2С. Проте позитивний вплив аустенітного електрода на ударну в'язкість все ще зберігається. Про це свідчить вище значення KCV ($1,38 \text{ MJ/m}^2$) МШ у 33 варіанта 2 з розташуванням концентратора від кореневої зони (рис. 1f), ніж для МШ ($1,16 \text{ MJ/m}^2$) у 33 варіанта 3.

Ударна в'язкість KCV різних зон зварного з'єднання сталі

Зона 33	Розташування концентратора на зразку згідно з рис. 1	Ударна в'язкість KCV , MJ/m^2		
		варіант 1 33	варіант 2 33	варіант 3 33
ОМ	Рис. 1b	0,62		
	Рис. 1c	0,57		
ЗТВ	Рис. 1d	1,07	0,41	0,78
МШ	Рис. 1e	1,67	0,61	1,13
	Рис. 1f	1,47	1,38	1,16
	Рис. 1g	1,30	0,51	0,98

Проте найнижчі значення KCV властиві металу ЗТВ, причому для усіх варіантів 33 (див. таблицю). До того ж і в цьому випадку варіант 2 33, виконаного різнорідними електродами, виявився найгіршим (ударна в'язкість металу ЗТВ становила $0,41 \text{ MJ/m}^2$), а варіант 1, коли застосовували лише аустенітні електроди, – найкращим ($KCV = 1,07 \text{ MJ/m}^2$). Тому дійшли висновку, що, по-перше, незалежно від фазового складу електродів опір крихкому руйнуванню металу ЗТВ завжди був найнижчим і тому саме він визначатиме роботоздатність 33 за динамічних навантажень. А, по-друге, ударна в'язкість металу ЗТВ у 33, виконаному лише аустенітними електродами (варіант 1), вища, ніж ОМ, що є важливою передумовою їх використання за динамічних навантажень.

Фрактографічні особливості руйнування металу різних зон 33. Незалежно від орієнтації надрізів на зразках ОМ до напряму вальцювання, випробуваних на ударну в'язкість, їх злами руйнувалися переважно за в'язким ямковим механізмом. Виокремлювалися лише серії невеликих (до $10 \mu\text{m}$ завдовжки) паралельно розташованих мікророзшарувань вздовж напряму вальцювання в центральній частині зламів.

Для фрактографічних досліджень особливостей руйнування МШ використали зразки з мінімальними значеннями ударної в'язкості, в яких концентратори знаходилися вздовж осі МШ (рис. 1g). На макрорівні лінія розмежування між зонами I і II (коренева та заповнювальна) у МШ чітко виявлялася на зламі зразка, отриманого електродами різного фазового складу (варіант 2). Менше це властиво варіанту 3 з феритно-перлітною структурою і практично нехарактерно для МШ з аустенітною, де для зварювання коренів швів і заповнення розплавом об'єму між крайками використовували феритно-перлітні або аустенітні електроди відповідно. Отже, навіть макрособливості руйнування МШ такі ж, як і під час випроб на удар: найнижчу ударну в'язкість має МШ, отриманий різнорідними електродами.

Дослідження різних варіантів ЗЗ на мікрорівні, виявили, що МШ з аустенітною структурою руйнується шляхом зародження, росту та злиття суміжних мікропор, що сформувались навколо включень. Внаслідок цього виникає переважно ямковий (dimple like) рельєф (рис. 2а), який вважають результатом високоенергійного механізму руйнування, що узгоджується з найвищим значенням ударної в'язкості такого МШ (варіант 1).

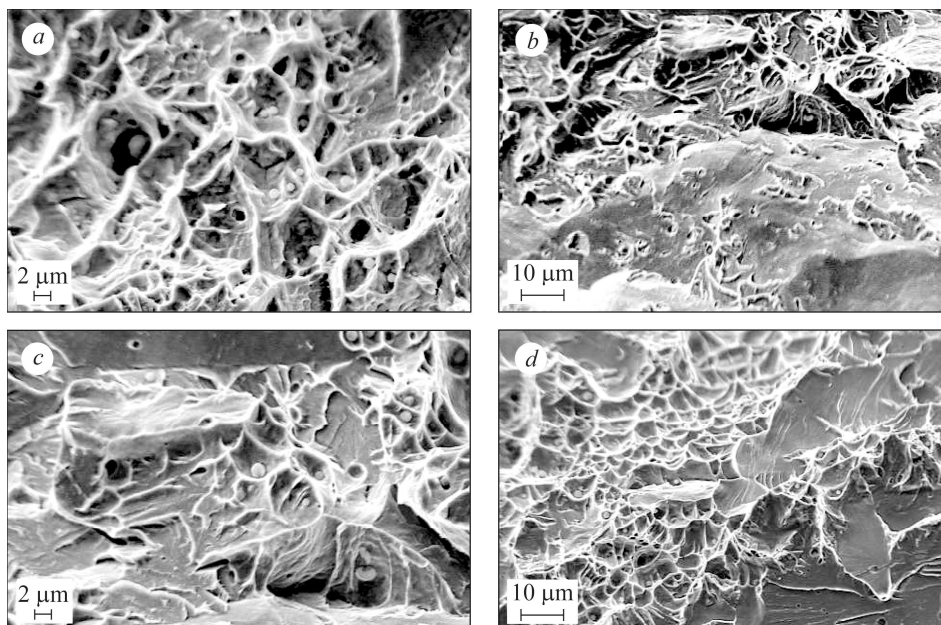


Рис. 2. Фрактограми зламів ударних зразків, напрям руйнування яких збігався з напрямом зварювання, за розташування концентраторів у них вздовж осі МШ у ЗЗ трьох варіантів: *a* – 1; *b*, *c* – 2 та *d* – 3.

Fig. 2. Fractograms of the fracture surfaces of impact testing specimens, fracture direction of which coincided with the welding direction, with concentrators in them located along the WM axis in the welding joints (WJ) of three options: *a* – 1; *b*, *c* – 2 and *d* – 3.

Рельєф зламу зразка ЗЗ, виконаного різнорідними електродами (варіант 2), неоднорідний (рис. 2*b*, *c*). Його структура смугаста з широкими (до 500 μm) ділянками доволі крихких крізьзеренних відколів, які перемежувалися вузькими (до 55 μm) ділянками міжзеренного руйнування (рис. 2*b*). На зламі міжзеренні фрагменти витягувалися в напрямі зварювання на віддалі до 500 μm. Встановили, що ділянки, інтерпретовані як крізьзеренні відколи за меншого збільшення, за вищої роздільної здатності насправді є сукупністю дрібних і низькорельєфних мікровідколів та в'язкого ямкового руйнування перетинок між ними (рис. 2*c*). Тому зробили висновок, що саме міжзеренні ділянки, які найчастіше пов'язують з холодними тріщинами, послаблюють ЗЗ варіанта 2 і відповідальні за такий низький опір крихкому руйнуванню МШ, сформованого різнорідними електродами. Важливо також враховувати, що така смугаста структурна неоднорідність поширювалася вздовж напрямку зварювання, а отже, проявлятиметься по всій довжині ЗЗ і знижуватиме його роботоздатність за динамічних навантажень.

МШ у ЗЗ, отриманому лише феритно-перлітним електродом (варіант 3), руйнувався за змішаним крихко-в'язким механізмом з чітко окресленими фасетками крізьзеренних відколів з річковими візерунками на їх поверхні, які виділялися на фоні переважно в'язкого ямкового рельєфу (рис. 2*c*). Саме з домінуванням в'яз-

кого рельєфу на зламі пов'язали вдвічі вищу ударну в'язкість цього варіанта 33 проти варіанта 2.

Оскільки найнижчі значення KCV отримали за випроб на удар зразків із 33 варіанта 2 ($KCV = 0,41 \text{ MJ/m}^2$), концентратор в яких був у ЗТВ (згідно з рис. 1d), порівняли фрактографічні особливості рельєфу зразка із найкращим (варіант 1) і найгіршим (варіант 2) за ударною в'язкістю 33 (рис. 3).

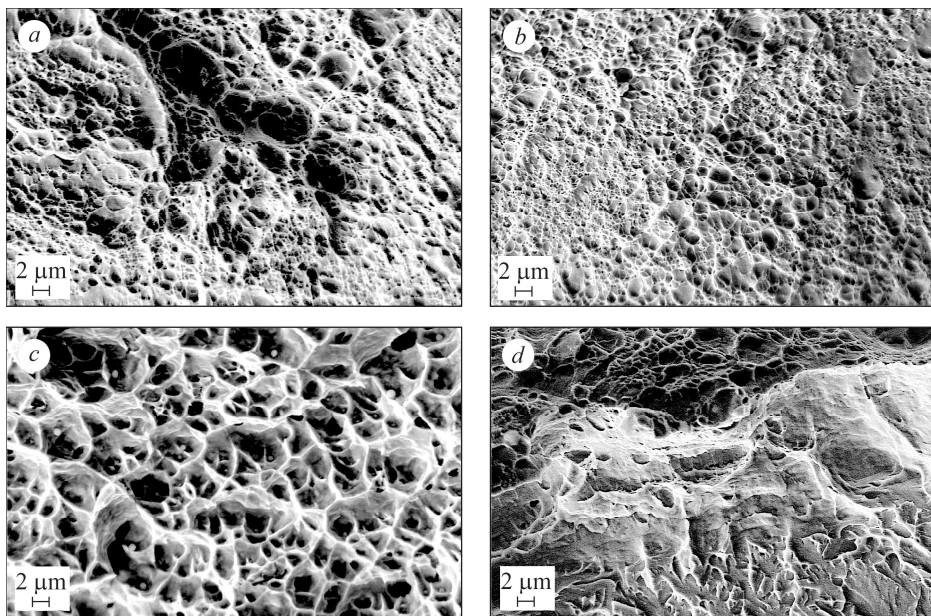


Рис. 3. Фрактограми зламів ударних зразків з концентраторами, розташованими в ЗТВ (згідно з рис. 1d) у 33 варіантів 1 (a, c) і 2 (b, d), за їх руйнування поперек ЗТВ з подальшим поширенням через МШ.

Fig. 3. Fractograms of the fracture surfaces of impact specimens with concentrators located in the HAZ (according to Fig. 1d) in WJ of variants 1 (a, c) and 2 (b, d), at their fracture across the HAZ with subsequent propagation through the WM.

В обох випадках зразки на стартовому етапі руйнувалися за в'язким ямковим механізмом (рис. 3a, b). Проте ямки на зламі 33 варіанта 1 були значно більшими і рельєфнішими, ніж для варіанта 2. Це свідчить про те, що пластична деформація, яка передувала їх формуванню (а отже, і енергозатрати), була інтенсивнішою за руйнування 33 варіанта 1, ніж варіанта 2. Це узгоджується з різницею їх значень KCV (1,07 та $0,41 \text{ MJ/m}^2$).

З поширенням руйнування зразків з концентраторами в ЗТВ до МШ рельєф зламів видозмінювався. На зламі 33 варіанта 1 з'являлися рівновісні ямки відриву, властиві матеріалам з високою ударною в'язкістю (рис. 3c), а на зламі зразка варіанта 2 – продовгуваті крихкі фрагменти з міжзеренним рельєфом (рис. 3d). Отже, зварювати листи із високоміцної сталі доцільно аустенітними електродами, які забезпечують найкраще поєднання високої ударної в'язкості усім зонам 33, а отже, найенергоємніше їх руйнування за динамічних навантажень.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що незалежно від зони зварного з'єднання на зразках з листової сталі типу 34ХН2МА з надрізом, метал шва, виконаний аустенітним електродом, має найвищу ударну в'язкість, а за поєднання аустенітного (корінь шва) і феритного електродів – найнижчу. Виявлено також, що за поширення руйнування в напрямі зварювання опір металу шва крихкому руйнуванню найнижчий.

Тому саме цей варіант рекомендовано для удосконалення технології і режимів зварювання. Незалежно від використаних електродів значення *KCV* металу зони термічного впливу завжди найнижчі і тому саме вона визначає роботоздатність ЗЗ за динамічних навантажень. Фрактографічно підтвердили, що аустенітні електроди найдоцільніші для зварювання листів із високоміцної сталі, оскільки тоді енергоємність руйнування (за ознаками окрихчення і їх рельєфністю) зразків за динамічних навантажень найвища.

РЕЗЮМЕ. Определено сопротивление хрупкому разрушению металла различных зон сварных соединений из стали типа 34ХН2МА, полученных с использованием электродов разного фазового состава или при их сочетании. Установлено, что независимо от зоны сварного соединения, в которой выполнен надрез, наиболее высокая ударная вязкость свойственна металлу шва, сваренному аустенитным электродом, а наиболее низкая – при сочетании аустенитного (корень шва) и ферритно-перлитного электродов. Независимо от примененных электродов значения *KCV* металла зоны термического влияния были всегда наиболее низкими. Поэтому именно эта зона определяет работоспособность сварных соединений при динамических нагрузках. Фрактографически подтверждена оптимальность применения аустенитных электродов для сварки листов высокопрочной стали, поскольку они обеспечивают высокую энергоёмкость разрушения при ударе.

Ключевые слова: сварные соединения, ударная вязкость, фрактографические особенности разрушения.

SUMMARY. Brittle fracture resistance of the metal of various zones of welded joints on 34ХН2МА steel, obtained using electrodes of different phase composition or a combination of them, was determined. It was established that, regardless of the weld zone in which the notch was made on the specimen, the highest impact toughness was inherent to the weld metal obtained by welding with an austenitic electrode, and the lowest – by the combination of the austenitic (weld root) and ferrite-pearlitic electrodes. Regardless of the used electrodes, the *KCV* values of the heat affected zone of the metal were always the lowest. Therefore, just that zone determined the performance of the welded joints under dynamic loads. The optimum variant of the use of austenitic electrodes for welding sheets of high-strength steel was fractographically confirmed, since these ensured a higher energy intensity of fracture upon impact.

Keywords: welded joints, impact toughness, fractographic specific features of fracture.

1. *Лепихин А. М.* Неразрушающий контроль и оценка опасности дефектов сварки на стадии эксплуатации оборудования // Вопросы материаловедения. – 2007. – № 3. – С. 208–213.
2. *Гаспарянц Р. С.* Методология расчета на прочность и долговечность труб и сварных соединений с дефектами // Нефтепромысловое дело. – 2008. – № 2. – С. 35–41.
3. *Мясникова А. А.* Неметаллические включения и их влияние на качество сварных соединений при ручной дуговой сварке // Master's J. – 2012. – № 1. – С. 50–54.
4. *Васин Е. С., Белкин А. А., Мяжков С. П.* Совершенствование методики расчета прочности и долговечности труб и сварных соединений с дефектами на основе результатов испытаний // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2012. – № 1. – С. 56–61.
5. *Дзюбик А. Р., Николишин Т. М., Пороховський Ю. В.* Вплив залишкових напружень на граничну рівновагу трубопроводу з внутрішньою тріщиною довільної конфігурації // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – 52, № 1. – С. 83–90.
(*Dzyubyk A. R., Nykolyshyn T. M., and Porokhovs'kyi Yu. V.* Influence of residual stresses on the limit equilibrium of a pipeline with internal crack of arbitrary configuration // Materials Science. – 2016. – 52, № 1. – P. 89–98.)
6. *Evaluation of electrochemical hydrogen absorption in welded pipe with steel API X52 / J. Capelle, I. Dmytrakh, Z. Azari, G. Pluvinage // Int. J. Hydrogen Energy. – 2013. – 38, № 33. – P. 14356–14363.*
7. *Розенштейн И. М.* Хрупкое разрушение стальных сварных конструкций // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – 74, № 7. – С. 48–51.

8. *Calculation of trajectories and the rate of growth of curvilinear fatigue cracks in isotropic and composite plates* / Н. Pokhmurska, О. Maksymovych, А. Dzyubyk, L. Dzyubyk // Proc. IOP Conf. Mater. Sci. and Eng. – 2018. – 373. 012024. doi: 10.1088/1757-899X/373/1/012024.
9. *Обоснование прочности и ударной вязкости сварных соединений магистральных трубопроводов из высокопрочных сталей* / С. В. Головин, Н. Г. Блехерова, А. П. Ладыжанский, А. С. Зандберг // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. – 2008. – № 2. – С. 42–47.
10. *Нгуен Н., Рубан А. Р.* Влияние дефектов сварных швов на механические свойства корпусной стали, определяемые при динамическом нагружении // Вестник гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С. О. Макарова – 2015. – Вып. 4. – С. 126–130.
11. *Лобанов Л. М., Позняков В. Д., Махненко О. В.* Образование холодных трещин в сварных соединениях высокопрочных сталей с пределом текучести 350...850 МПа // Автомат. сварка. – 2013. – № 7. – С. 8–13.
12. *Залишкова* міцність надземної ділянки магістрального трубопроводу з кільцевими тріщинами / А. Р. Дзюбик, Л. В. Дзюбик, Г. В. Похмурська, І. А. Прокопишин // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 6. – С. 93–101.
(*Residual strength of the overhead section of a main pipeline with annular cracks* / А. R. Dzyubyk, L. V. Dzyubyk, G. V. Pokhmurs'ka, I. A. Prokopyshyn // Materials Science. – 2019. – **54**, № 6. – P. 855–865.)
13. *Ефименко Л. А., Рамусь А. А., Меркулова А. О.* Особенности распада аустенита в зоне термического влияния при сварке высокопрочных сталей // Физика металлов и металловедение. – 2015. – **116**, № 5. – С. 520–529.
14. *Влияние* термического цикла сварки на структурно-фазовые превращения и свойства металла ЗТВ среднеуглеродистой легированной стали типа 30Х2Н2МФ / В. Д. Позняков, В. А. Костин, А. А. Гайворонский, И. А. Моссоковская, В. В. Жуков, А. В. Клапачук // Автомат. сварка. – 2015. – № 2. – С. 8–15.
15. *Вплив* режимів термічної обробки на міцність і циклічну тріщиностійкість сталі 65Г / О. П. Осташ, В. В. Кулик, В. Д. Позняков, О. А. Гайворонський, В. В. Віра // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 6. – С. 24–29.
(*Influence of the modes of heat treatment on the strength and cyclic crack-growth resistance of 65G steel* / О. P. Ostash, V. V. Kulyk, V. D. Poznyakov, O. A. Gaivorons'kyi, V. V. Vira // Materials Science. – 2019. – **54**, № 6. – P. 776–782.)
16. *Estimation of rolling contact fatigue resistance of high-tempered 65Г steel.* / T. Lenkovskiy, A. Glazov, R. Kovalchuk, A. Dzyubyk, V. Topilnytskyy, L. Dzyubyk, O. Bilash, N. Sokul'ska // Strength, Fracture and Complexity. – 2019. – **12**, № 1. – P. 1–11.
17. *Структура* и вязкость зоны термического влияния сварных соединений высокопрочной стали / Т. И. Табатчикова, А. Д. Носов, С. Н. Гончаров, Н. З. Гуднев, С. Ю. Дельгадо Рейна, И. Л. Яковлева // Физика металлов и металловедение. – 2014. – **115**, № 12. – С. 1309–1317.
18. *Макара А. М.* Сварка высокопрочных сталей. – К.: Техніка, 1971. – 140 с.
19. *Земзин В. Н.* Сварные соединения разнородных сталей. – М.: Машиностроение, 1966. – 232 с.
20. *Особливості* втомного руйнування зварних з'єднань сталі 34ХН2МА, сформованих електродами різного фазового складу / А. Р. Дзюбик, А. А. Войтович, Л. В. Дзюбик, Л. О. Бабій // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2018. – **54**, № 2. – С. 75–81.
(*Specific features of the fatigue fracture of welded joints of 34KhN2MA steel formed by electrodes with different phase compositions* / А. R. Dzyubyk, А. А. Voitovych, L. V. Dzyubyk, L. O. Babii // Materials Science. – 2018. – **54**, № 2. – P. 215–222.)

Одержано 06.08.2019