

СТРУКТУРА І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БІМЕТАЛУ ТИТАНОВИЙ СПЛАВ GRADE 12 – ВУГЛЕЦЕВА СТАЛЬ 16 Mn, ОТРИМАНОГО ЗВАРЮВАННЯМ ВИБУХОМ

П.С. Шльонський, Фенг Гао

Liaoning Xin Huayang Weiye Equipment Manufacturing company Ltd
№ 1 Road, Tieling high-tech industrial development zone, Liaoning province, China.
E-mail: shlensk@ukr.net

На якість біметалу, отриманого зварюванням вибухом, впливають механічні характеристики матеріалу, який метається. Для розробки режимів зварювання вибухом було проведено дослідження структури і механічних властивостей біметалу титановий сплав Grade 12 (TA10, пластина, яка метається) + вуглецева сталь 16 Mn (09Г2С). Товщина пластин із титанового сплаву складала 5 і 6 мм, механічні властивості, а саме відносне подовження, у стані поставки для цих пластин відрізнялись на 15 %. Приведено результати міцності на відрив та зріз шарів біметалу титановий сплав–вуглецева сталь. На прикладі титанового сплаву TA10 показано, що для пластин з нижчим відносним подовженням міцність з'єднання, отриманого зварюванням вибухом, нижча. Випробування на згин показало відсутність розшарування у двох товщин титанового сплаву. Також для двох товщин титанового сплаву зона з'єднання має характерну для зварювання вибухом мікроструктуру. Бібліогр. 8, табл. 4, рис. 7.

Ключові слова: зварювання вибухом, біметал титан-сталь, механічні властивості

Вступ. Різні галузі сучасного машинобудування відчувають гостру потребу у біметалі титан–сталь. При отриманні цього біметалу виникають труднощі, перш за все пов'язані зі специфічними властивостями титану, а саме утворенням крихких інтерметалідів у зоні з'єднання.

Одним із способів, який дозволяє отримувати біметал титан–сталь, є зварювання вибухом завдяки малій тривалості процесу формування з'єднання і відсутності нагріву [1–3]. Однак, завдання отримання зварюванням вибухом якісного біметалу титану зі сталлю в повній мірі не вирішено, так як існує дуже вузький діапазон отримання міцного з'єднання, а також в зоні з'єднання утворюються крихкі інтерметаліди.

На прикладі [4, 5] спостерігаємо, що в даний час дослідження по отриманню біметалевих плит зварюванням вибухом у Китайській народній республіці та світі зосереджені, переважно, на чисто титані. Слід зауважити, що міцність чистого титану зменшується з підвищенням температури, а при досягненні 250 °С вона знижується удвічі. Тому для обладнання, яке працює при підвищених температурах, необхідно використовувати титанові сплави. Так, у [6] приведено дослідження властивостей біметалу титановий сплав TA10 та вуглецева сталі Q345.

Матеріали і методики досліджень. Титан TA10 представляє собою низьколегований титановий сплав системи Ti–Mo–Ni, який містить 0,3 % Mo і 0,8 % Ni (табл. 1), що не тільки покращує його механічні властивості при високих температурах, але також має гарну корозійну стій-

кість до хлоридів з низьким рН або слабководновальних кислот і його корозійна стійкість значно краще, ніж у чистого титану [7].

У якості пластини, яка метається, використовували титановий сплав TA10 завтовшки 5 і 6 мм. Механічні властивості матеріалу пластин різних товщин представлені у табл. 2 і 3. Відносне подовження у стані поставки відрізнялося для пластин різної товщини на 15 %. Розмір пластин складав 450×300 мм.

Метою даної роботи було дослідження впливу відносного подовження титанового сплаву TA10 на механічні властивості і мікроструктуру з'єднання біметалу TA10 + 09Г2С, отриманого зварюванням вибухом.

При відпрацюванні режиму зварювання вибухом титанового сплаву TA10 зі сталлю 09Г2С були проведені експерименти на масштабних зразках.

У якості основи використовували пластину з вуглецевої сталі 09Г2С, завтовшки 80 мм.

Висота вибухової речовини складала 50 і 45 мм відповідно для пластини з титанового сплаву 6 і 5 мм. Швидкість детонації вимірювали з допомогою дровових датчиків, вона становила 2100 і 2040 м·с⁻¹ відповідно для пластин завтовшки 6 і 5 мм. Зовнішній вигляд пластин перед (а) зварюванням вибухом та після (б) нього показано на рис. 1.

Після зварювання вибухом виконували термічну обробку для зняття внутрішніх напружень

Таблиця 1. Хімічний склад TA10 по GB/T 3620.1-2007 (стандарт КНР)

Ti, решта, %	Домішки, не більше, %						
	Mo	Ni	Fe	C	N	H	O
	0,2...0,4	0,6...0,9	0,30	0,08	0,03	0,015	0,25

Таблиця 2. Механічні властивості листа титанового сплаву TA10, завтовшки 6 мм

Стан матеріалу	σ_p , МПа	σ_b , МПа	δ , %
М	275	345	30

Таблиця 3. Механічні властивості листа титанового сплаву TA10, завтовшки 5 мм

Стан матеріалу	σ_p , МПа	σ_b , МПа	δ , %
М	227	362	26

за температури не вище 540 °С і перевірку якості з'єднання шляхом ультразвукової дефектоскопії. Зразки для проведення механічних випробувань вирізали по схемі, яка представлена на рис. 2.

Швидкість співударання пластин розраховували по формулі де: D – швидкість детонації; r – коефіцієнт навантаження, відношення маси вибухової речовини до маси пластини, яка метається [1].

Густина вибухової речовини складає 1 гр·см⁻³.

$$Vc = D \frac{\left(\sqrt{1 + \frac{32}{27}r} - 1\right)}{\left(\sqrt{1 + \frac{32}{27}r} + 1\right)}$$

Виконавши нескладний розрахунок отримаємо, що швидкість співударання буде становити 592 і 598 м·с⁻¹ відповідно для пластин завтовшки

6 і 5 мм. Отже енергії пластин при співударанні будуть близькими за значенням, навіть енергія, пластини завтовшки 5 мм, буде нижчою.

Дослідження мікроструктури виконували за допомогою металографічного мікроскопу MS600. Мікроструктура з'єднання титановий сплав TA10 + 09Г2С показана на рис. 3.

Результати експериментів та їх обговорення. Як видно з рис. 3, зона з'єднання має характерну для зварювання вибухом хвилюву границю. Форма хвиль, їх амплітуда та частота майже однакові для різних товщин плакування. При цьому на границі з'єднання TA10 + 09Г2С з товщиною плакування 5 мм (рис 3, б) спостерігаються інтерметаліди у вигляді дисперсних включень на ділянках на зворотній частині хвилі. Це повністю корелюється з результатами роботи [8], в якій проведено дослідження особливостей фазоутворення при зварюванні тиском.

Оцінку механічних властивостей отриманого зварювання вибухом біметалу TA10 + 09Г2С виконували шляхом випробувань на відрив плакування, на зріз і на загин.

Випробування на відрив проводили шляхом відриву по кільцевому контуру. Зразок для випробувань вставляють в опору трубчастої форми, а зверху у глухий отвір зразка вставляють пуансон



Рис. 1. Зовнішній вигляд пластин з титанового сплаву Grade12 і вуглецевої сталі 09Г2 перед зварюванням вибухом (а) і після нього (б)

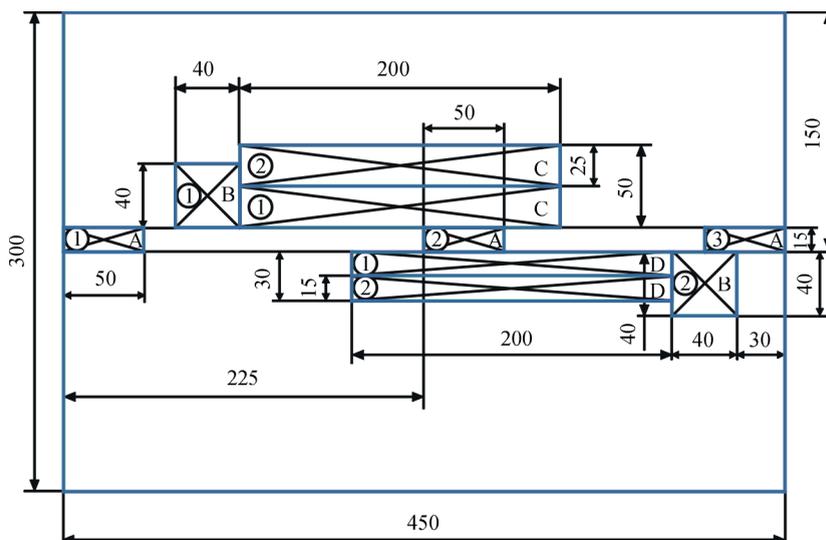


Рис. 2. Схема вирізки зразків для проведення механічних випробувань: 1А, 2А, 3А – зразки для дослідження мікроструктури; 1В, 2В – зразки для дослідження міцності на відрив плакування; 1С, 2С – зразки для дослідження міцності на зріз плакування; 1D, 2D – зразки для дослідження міцності на загин

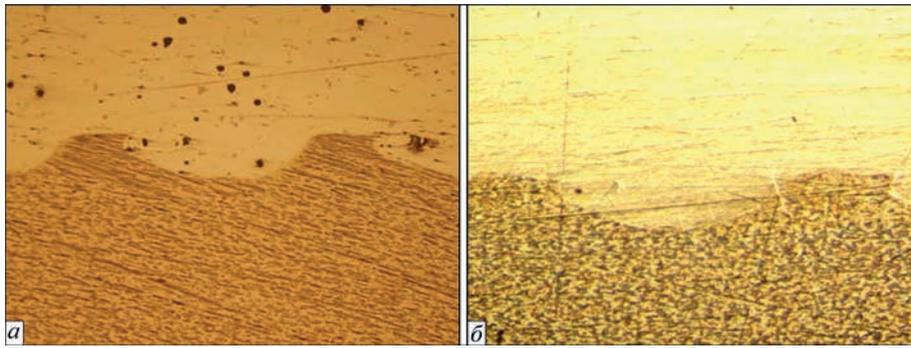


Рис. 3 Мікроструктура зони з'єднання титан ТА10 (зверху) + сталь 09Г2С (знизу), товщина плакування 6 мм (а) ($\times 100$) і 5 мм (б) ($\times 200$)

на який прикладають тиск від розривної машини (рис. 4, а).

Міцність з'єднання біметалу ТА10 + 09Г2С на відрив визначали шляхом поділу зусилля що прикладене, щоб відірвати плакування, на площу кільця. З рис. 4, б видно, що розрив стався по зоні з'єднання, що є характерним для біметалу титановий сплав – вуглецева сталь, а границя з'єднання має чітко виражений хвилювий характер.

Результати випробування на відрив та зріз показано у табл. 4. Як видно з результатів табл. 4, міцність на відрив для титанового сплаву з меншим відносним подовженням менша на 73 і 112 % для зразків з ділянок 1 і 2 відповідно. В середньому міцність на відрив знижується на 92,5 %.

Випробування міцності біметалу на зріз проводилося шляхом розтягування плоских зразків з поперечними надрізами шарів (рис. 5). Результати випробувань міцності на зріз повністю корелюються з результатами міцності на відрив.

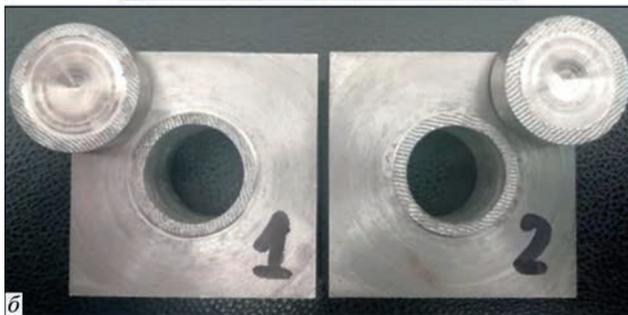


Рис. 4. Видгляд випробувань на відрив плакування (а) і зразків після випробувань для плакування завтовшки 6 мм (б)

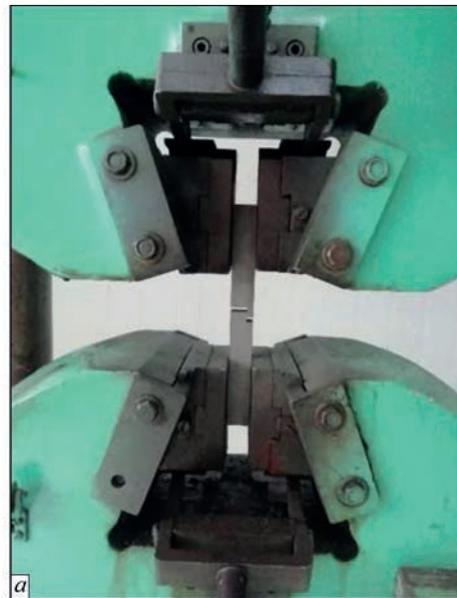


Рис. 5. Видгляд випробувань міцності на зріз (а) і зразка після випробувань (б)

Таблиця 4. Результати випробувань на відрив плакування та зріз для біметалу ТА10 + 09Г2С отриманого зварюванням вибухом

Товщина плакування/номер зразка	Міцність на відрив, МПа	Міцність на зріз, МПа
5 мм/№ 1	289,1	163,2
5 мм/№ 2	167,1	146,9
6 мм/№ 1	502,4	354,4
6 мм/№ 2	354,8	247

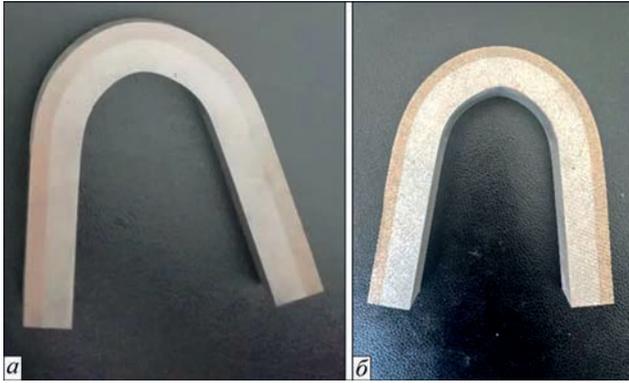


Рис. 6. Випробування біметалу TA10 + 09Г2С на згин, товщина плакування 6 мм (а), товщина плакування 5 мм (б)



Рис. 7. Вигляд біметалевої трубної дошки TA10-09Г2С діаметром 3340 мм після термічної обробки

Як видно з табл. 4, міцність на зріз для титанового сплаву з меншим відносним подовження менша на 117 і 68 % для зразків з ділянок 1 і 2 відповідно. Міцність на зріз на початку зразку вища ніж у кінці для обох товщин. В середньому міцність на зріз знижується на 92,5 %. Розбіжність результатів механічних випробувань на ділянках 1 і 2 можна пояснити дисперсністю формування інтерметалідів.

При дослідженні механічних властивостей біметалу, отриманого зварюванням вибухом, досить показовим є випробування на згин, оскільки, у разі неякісного зварювання відбувається розшарування по зоні з'єднання. Зразки для обох товщин плакування 6 і 5 мм (рис. 6) витримали загин на 180° без відшарування. Це свідчить про високу якість зварювання.

Ультразвукове дослідження суцільності з'єднання показало відсутність розшарувань по усій площині біметалевої пластини.

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY GRADE 12 – CARBON STEEL 16 Mn BIMETAL OBTAINED BY EXPLOSION WELDING

P.S. Shlonskyi, Feng Gao

Liaoning Xin Huayang Weiye Equipment Manufacturing Company Ltd. №1 Road, Tieling high-tech industrial development zone, Liaoning province, China. E-mail: shlensk@ukr.net

The quality of the bimetal produced by explosion welding is affected by the mechanical characteristics of flying plate material. For development of explosion welding modes, a study of the structure and mechanical properties of titanium alloy Grade 12 (TA10, flying plate) + carbon steel 16 Mn (09G2S) bimetal was conducted. The thickness of the titanium alloy plates was 5 and 6 mm, the mechanical properties, namely the relative elongation in as-delivered condition for these plates differed by 15 %. The results on tear and shear strength of titanium alloy-carbon steel bimetal are given. In the case of titanium alloy TA10 it is demonstrated that for plates with a lower relative elongation, the strength of the joint produced by explosion welding is lower. Bending test showed no delamination for two thicknesses of the titanium alloy. Also, for the two thicknesses of the titanium alloy, the joint zone has a microstructure characteristic for explosion welding. 8 Ref., 4 Tabl., 7 Fig.

Key words: explosion welding, titanium-steel bimetal, mechanical properties

Після проведених досліджень були надані рекомендації для отримання за допомогою зварювання вибухом біметалевих трубних дошок діаметром 3340 мм для теплообмінних апаратів (рис. 7).

Висновки

1. Встановлено, що зниження відносного подовження на 15 % для титанового сплаву TA10 призводить до зниження міцності на відрив та зріз в середньому на 92,5 % при близьких значеннях енергії зварювання вибухом.

2. У результаті проведеної роботи були надані рекомендації для коригування режиму зварювання вибухом титанового сплаву TA10 з вуглецевою сталлю 09Г2С з товщиною плакування 5 мм для підвищення якості з'єднання.

Список літератури/References

1. Кудинов В.М., Коротеев А.Я. (1978) *Сварка взрывом в металлургии*. Москва, Металлургия. Kudinov V.M., Koroteev A.Ya. (1978) *Explosion welding in metallurgy*. Moscow, Metallurgy. [in Russian].
2. Лысак В.И., Кузьмин С.В. (2005) *Сварка взрывом*. Москва, Машиностроение. Lysak V.I., Kuz'min S.V. (2005) *Explosion welding*. Moscow, Mechanical engineering. [in Russian].
3. Дерibas А.А. (1980) *Физика упрочнения и сварки взрывом*. Новосибирск, Наука. Deribas A.A. *Physics of hardening and explosionwelding* (1980) Novosibirsk. Science. [in Russian].
4. Zheng Yuanmou (2002) *Explosive Welding and Metal Cladded Materials as well as the Engineering Applications*, Central South University Press, Changsha.
5. Wang Yaohua (2007) *Researches and Practices on Explosive Welding of Metal Sheets*, National Defense Industry Press, Beijing.
6. HAN Xiao-min, WANG Shao-gang, HUANG Yan et al. (2015) Interfacial Microstructure and Mechanical Properties of TA10-Q345R Composite Plate with Explosive Welding. Doi: 10.3969/j.issn. 1001-4837. 2015.06.004 *Titanium academics J., Nanjing*, 6, 32, 24-29.
7. Findik, F. (2011) Recent developments in explosive welding. *Materials and Design*, 32 (3), 1081-1093.
8. Маркашова Л.И., Арсенюк В.В., Григоренко Г.М. (2002) Особенности фазообразования при сварке давлением разнородных металлов в условиях высокоскоростного деформирования. *Автоматическая сварка*, 9, 12-17. L.I. Markashova, V.V. Arsenyuk, G.M. Grigorenko (2002) Features of phase formation during pressure welding of dissimilar metals under high-speed deformation conditions. *Automatic welding*, 9, 12-17. [in Russian].

Надійшла до редакції 26.01.2024
Отримано у переглянутому вигляді 15.03.2024
Прийнято 25.03.2024