

Вплив структури на властивості зварних з'єднань сталей

О. М. Савицький, кандидат технічних наук

М. М. Савицький, доктор технічних наук

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

Досліджено вплив структури металу зварних з'єднань на їх властивості. Показано, що збільшення вмісту продуктів проміжного і дифузійного розпаду аустеніту в структурі металу супроводжується зростанням його в'язкості та посиленням стійкості щодо утворення холодних тріщин і крихкого руйнування. Стійкість щодо утворення гарячих тріщин визначається тривалістю перебування зварювальної ванни у рідкому стані і не залежить від фазового складу металу шва. Її посилює періодична кристалізація ванни, особливо із застосуванням додаткового холодильника, який прискорює кристалізацію, змінює її характер та послаблює негативний вплив теплового бар'єру на формування з'єднання.

Дослідження особливостей формування структури сталей під впливом різних методів обробки є актуальною задачею, особливо для сталей, чутливих до термообробки, яка дозволяє в широких межах змінювати їх структуру і, відповідно, властивості [1 – 4].

Зварювання, як технологічний процес отримання нероз'ємних з'єднань металоконструкцій здійснюється з локальним плавленням металу, що супроводжується достатньо тривалим існуванням рідкої зварювальної ванни, нагріву прилеглого твердого металу до високих температур (зона термічного впливу – ЗТВ) і створює ряд труднощів при зварюванні сталей, чутливих до термічного впливу. Тепловий стан зварних з'єднань визначається погонною енергією – відношенням теплової потужності джерела нагріву до швидкості його переміщення (q/V), що обмежує можливості регулювання умов нагріву і охолодження металу порівняно із термообробкою [5]. Наслідком є підвищена схильність до утворення тріщин та крихкого руйнування зварних з'єднань.

Тому задачею даної роботи було визначення факторів, які підвищують стійкість зварних з'єднань щодо утворення вказаних дефектів.

Дослідження виконували на сталях 35ГС, 40ХН і М72, хімічний склад яких та здатність до утворення зварних з'єднань наведені в табл. 1. Сталі 35ГС і 40ХН відносяться до обмежено зварюваних, тобто для отримання якісних зварних з'єднань необхідно застосувати додаткові технологічні прийоми: підігрів металу, термічну обробку після зварювання або комплекс цих заходів. Сталь М72 не рекомендована для зварних конструкцій, тобто вважається, що отримати якісні зварні з'єднання цієї сталі неможливо. Однак за останні десятиріччя були розроблені способи керування структуроутворенням, які дозволяють отримувати якісні зварні

з'єднання вуглецевих сталей без додаткових технологічних заходів [6]. При цьому утворюються структури, які є наслідком перетворення переохолодженого аустеніту в дифузійній, проміжній чи бездифузійній температурних областях і не спотворені додатковим термічним впливом.

Основною причиною утворення холодних тріщин і крихкого руйнування є несприятлива структура металу [7] – як правило крупнозерниста мартенситна.

Дослідження, проведені у відповідності з методами випробування на опір утворенню холодних тріщин по ГОСТ 26388-88 на зразках типу VI і VIII, дозволили оцінити вплив структур на стійкість зварних з'єднань проти утворення холодних тріщин. У випадках, коли в шві і ЗТВ формуються структури, які є продуктами дифузійного і проміжного перетворення аустеніту, холодні тріщини не виникають. На рис. 1 наведені мікроструктури зразків проб зі сталей 35ГС, 40ХН, М72, які представляють собою суміші з різним співвідношенням продуктів дифузійного і проміжного розпаду аустеніту (рис. 1 а, б, в). Ці дані свідчать про відсутність холодних тріщин у зварному з'єднанні навіть при виконанні його дротом зі сталі 65Г (рис. 1 в).

Висока стійкість проти утворення холодних тріщин забезпечується і тоді, коли розпад аустеніту починається в проміжній області, а закінчується в бездифузійній з утворенням не більше 50 % мартенситу [8].

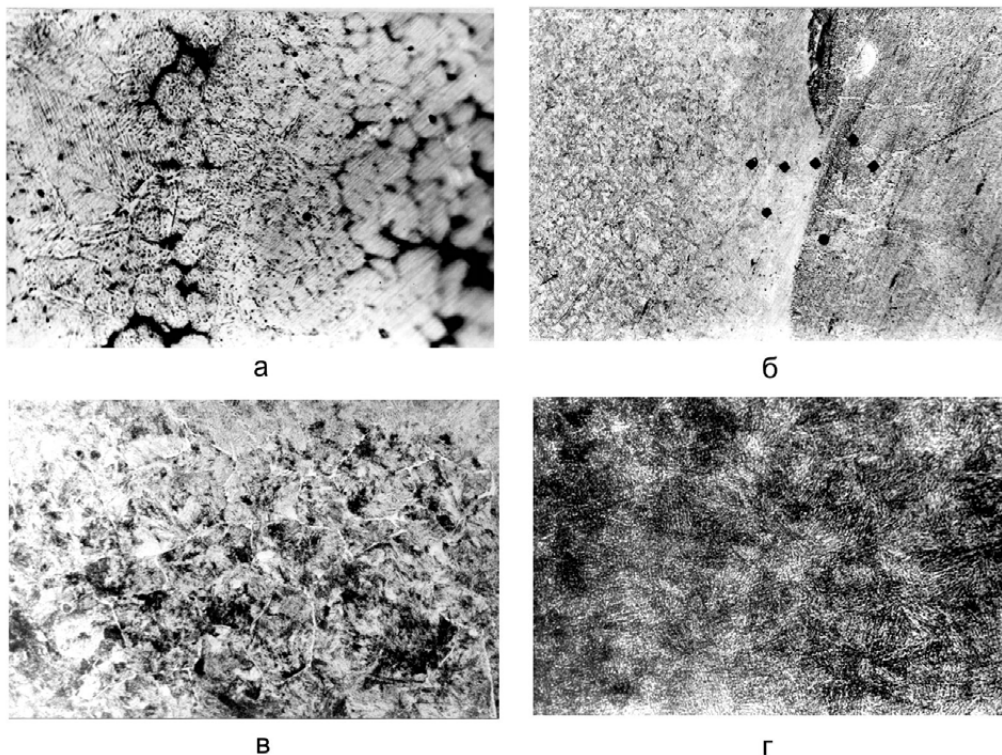


Рис. 1. Мікроструктури в ЗТВ зварних з'єднань, які забезпечують високу стійкість проти утворення холодних тріщин: а – бейніт – сталь 40ХН (х400); б – суміш бейніту і фериту – сталь 35ГС (х120); в – суміш бейніту, фериту, перліту, трооститу – сталь М72 (х400); г – мартенсит відпуску – сталь 40ХН (х200).

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних сталей

Марка сталі	Схильність до утворення зварних з'єднань	Масові частки елементів, %							
		C	Si	Mn	Cr	Ni	не більше		
							Cu	P	S
35ГС	обмежено зварювана	0,30-0,37	0,60-0,90	0,80-1,20	≤0,30	≤0,30	0,30	0,040	0,045
40ХН	обмежено зварювана	0,36-0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,45-0,75	1,00-1,40	0,30	0,035	0,035
М72	не рекомендована для зварних конструкцій	0,67-0,78	0,18-0,45	0,75-1,05	-	-	-	0,040	0,035
65Г	не рекомендована для зварних конструкцій	0,66-0,70	0,17-0,37	0,90-1,20	≤0,25	≤0,25	0,20	0,035	0,035

Таблиця 2

Механічні властивості і структура зварних з'єднань сталі М72

Номер зварного з'єднання	Ділянка зварного з'єднання	Мікроструктура	Розмір зерна		σ _т , МПа	σ _в , МПа	КСУ, Дж/см ²	КСУ, Дж/см ²
			мм	бал по ГОСТ 5639-82				
	Основний метал	сорбіт	0,125	3	516	1004	10,0	3,7
1	ЗТВ	перліт-ферит-троостит-бейніт	0,0079-0,031	7-11	705	1040	25,0	16,3
2	ЗТВ	ферит-троостит-бейніт	0,015-0,031	6-9	710	1040	22,5	16,3
3	ЗТВ	бейніт	0,062-0,125	3-5	785	1065	11,3	6,2
4	ЗТВ	мартенсит - троостит	0,088-0,125	3-4	1090	1325	7,3	2,0

Структура, зношування, руйнування

Утворення холодних тріщин у зварному з'єднанні ініціюється при наявності в його структурі мартенситу в кількості більше 50 % всіх структурних складових (рис. 2). Однак, не завжди поява мартенситу супроводжується утворенням холодних тріщин. Трещінонебезпечним є мартенсит, що утворюється при низьких температурах і має високу мікротвердість (HV450 і вище). Якщо мартенсит утворюється при температурах вище 300 °С, де розвиваються процеси його самовідпуску (рис. 1 г), а мікротвердість не перевищує HV380, то навіть при вмісті його в структурі зварного з'єднання більше 50 %, воно має досить високу стійкість проти утворення холодних тріщин.

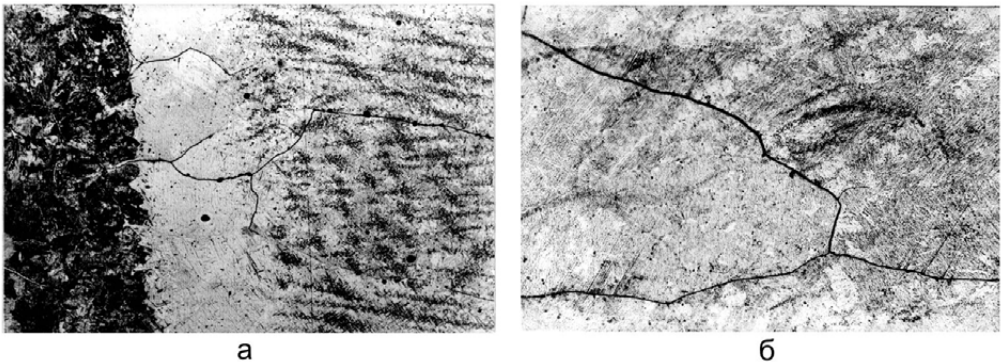


Рис. 2. Холодні тріщини в зварних з'єднаннях сталі М72 (шов сталь 65Г) з переважачим вмістом мартенситу (x240): а – границя сплавлення; б – зона термічного впливу.

Дані таблиці 2, дозволяють оцінити вплив структури металу зварних з'єднань на їх ударну в'язкість, яка є показником стійкості проти крихкого руйнування. Ці дослідження були проведені на зварних з'єднаннях високовуглецевої сталі М72 (табл. 1). У випадках, коли в зварних з'єднаннях формуються дрібнозернисті структури, які є наслідком перетворення переохолодженого аустеніту в дифузійній і проміжній температурних областях (з'єднання №1 і №2), метал характеризується високими показниками ударної в'язкості, які в 2,0 – 2,5 рази (по КСУ) і майже в 4,5 рази (по КСВ) перевищують аналогічні показники основного металу. Зміщення розпаду переохолодженого аустеніту в проміжну область і формування в металі з'єднання (табл. 2, № 3) більш крупнозернистої, ніж у попередніх випадках, структури, супроводжується різким зниженням показників ударної в'язкості. По КСУ вона майже така ж, як у основного металу, а по КСВ перевищує його тільки в 1,6 рази.

Якщо в металі ЗТВ формується крупнозерниста мартенситна структура (табл. 2, №4), то він за показниками ударної в'язкості поступається основному металу.

Враховуючи те, що зварні з'єднання високовуглецевих сталей характеризуються мінімальною стійкістю до утворення гарячих тріщин [1, 3, 7], ці дослідження виконували відповідно до вимог ГОСТ 26389-84 на зразках зварних з'єднань сталі М72 типу 9а і 9б. Показано, що утворення гарячих тріщин не пов'язано із фазовим складом металу шва. Найбільший

вплив на тріщиностійкість справляє тривалість перебування зварювальної ванни у рідкому стані, яка залежить від погонної енергії зварювання. Чим більша погонна енергія, тим триваліше існування рідкої ванни і вища вірогідність утворення гарячих тріщин. Попередити утворення гарячих тріщин дозволяє періодичне охолодження зварювальної ванни при імпульсному зварюванні дугою періодичної дії, яке передбачає чередування періодів горіння дуги (імпульс) і періодичне переривання дугового процесу (пауза). Даний технологічний прийом забезпечує періодичну повну або часткову кристалізацію ванни.

Встановлено, що при частковій кристалізації зварювальної ванни стійкість металу шва проти утворення тріщин залежить від хімічного складу металу шва, погонної енергії зварювання, співвідношення об'ємів закристилизованого і рідкого металу. Врахувати сумісний вплив цих факторів у кожному конкретному випадку надзвичайно складно, а тому перспективніша періодична повна кристалізація рідкої ванни.

На рис. 3 наведено криву, яка демонструє залежність тривалості паузи (t_n), необхідної для повної періодичної кристалізації зварювальної ванни, від погонної енергії зварювання ($q/V_{зв}$). Ці дані свідчать, що повна періодична кристалізація зварювальної ванни дозволяє усунути небезпеку утворення гарячих тріщин. При цьому слід враховувати, що по мірі зростання погонної енергії збільшується тривалість паузи, необхідної для кристалізації ванни. Така закономірність пов'язана зі зниженням інтенсивності тепловідведення з ванни в результаті збільшення розмірів теплового бар'єру [9].

Додатковим фактором, що посилює стійкість металу до утворення гарячих тріщин є періодичне переохолодження зварного шва нижче температур кристалізації. Чим нижче температура охолодження металу шва в паузі, тим вище його стійкість проти утворення гарячих тріщин.

Скоротити тривалість паузи, необхідної для періодичної кристалізації зварного шва, дозволяє періодичне занурення в рідкий метал додаткового холодильника (дроту), який прискорює охолодження металу, створює додатковий осередок кристалізації в центрі ванни (рис. 4). В результаті формуються два зустрічних фронти кристалізації: один – традиційно рухається від країв ванни до її центру (рис. 4 а), а інший – від центру ванни поширюється до її країв (рис. 4 б). У поєднанні з підвищенням швидкості охолодження ванни це сприяє подрібненню кристалітів і формуванню в металі шва дезорієнтованої структури. Дріт, занурений в

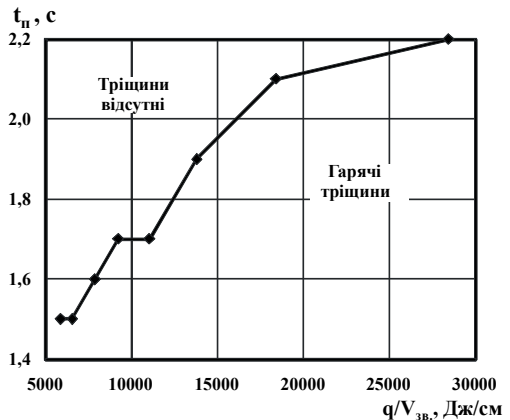


Рис. 3. Вплив тривалості охолодження зварювальної ванни (t_n) та погонної енергії зварювання ($q/V_{зв}$) на стійкість металу шва проти утворення гарячих тріщин.

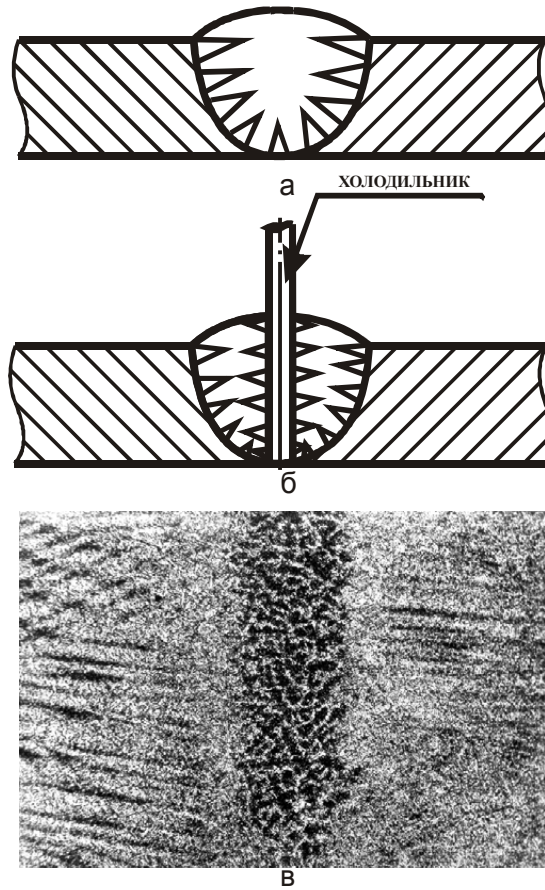


Рис. 4. Схема кристалізації зварювальної ванни: а – традиційна; б – з додатковим холодильником; в – мікроструктура металу шва, виконаного дротом 65Г із застосуванням додаткового холодильника. x400.

зварювальну ванну не переплавляється, а сплавляється з металом шва і утворює в ньому сердечник з дрібнодисперсною структурою (рис. 4 в). Такі умови кристалізації перешкоджають ліквідації домішок і утворенню в центрі шва лінії слабину.

Крім цього різко послаблюється негативний вплив теплового бар'єру на формування зварних з'єднань за рахунок додаткового центру поглинання тепла із зварного з'єднання.

Таким чином, стійкість металу зварних з'єднань проти утворення холодних тріщин забезпечується, коли розпад аустеніту починається в проміжній області, а закінчується в бездифузійній – з утворенням не більше 50 % мартенситу. По мірі зміщення розпаду аустеніту в проміжну і дифузійну області з формуванням дрібнозернистих структур, стійкість проти утворення холодних тріщин і крихкості металу поступово зростає. Небезпека утворення холодних тріщин у зварному з'єднанні виникає при наявності в його структурі більше 50 % мартенситу, що утворюється за низьких температур і має високу мікротвердість (вище HV450), та зростає по мірі збільшення мартенситної складової.

Що стосується гарячих тріщин в металі шва, то запобігти їх утворенню дозволяє періодична повна кристалізація рідкої ванни, особливо із застосуванням додаткового холодильника, який змінює характер кристалізації і прискорює її, а також послаблює негативний вплив теплового бар'єру на формування з'єднання.

Література

1. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1966. – 680 с.
2. Садовский В.Д. Превращения переохлажденного аустенита. – М.: Металлургиздат, 1947. – 56 с.
3. Садовский В.Д. Структурные превращения при закалке и отпуске конструкционных сталей. – Свердловск: Издательство уральского филиала АН СССР, 1945. – 72 с.
4. Садовский В.Д., Фокина Е.А. Остаточный аустенит в закаленной стали. – М.: Наука, 1986. – 112 с.
5. Савицький О.М., Шкрабалюк Ю.М. Особливості впливу високих швидкостей нагріву на температурний інтервал гомогенізації аустеніту і росту вторинного зерна у вуглецевих сталях // Металознавство та обробка металів. – 2013. – № 3. – С. 31 – 37.
6. Савицький О.М. Керування структуроутворенням у вуглецевих сталях при локальному термічному впливові // Металознавство та обробка металів. – 2006. – № 3. – С. 13 – 18.
7. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.
8. Савицький О.М. Керування структурою та властивостями металу при дуговому зварюванні гартівних сталей : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.03.06 «Зварювання та споріднені технології» « Київ: ІЕЗ ім. Є.О.Патона, 2001. – 19 с.
9. Савицький О.М. Теплофізичний стан вуглецевих сталей та його вплив на формування теплового бар'єру при локальній термічній дії // Металознавство та обробка матеріалів. – 2015. – № 3. – С. 28 – 34.

References

1. Guliaev A.P. (1966). *Metallovedenie [Metal Science]* Moskow: Metallurgy [in USSR].
2. Sadovskii V.D. (1947). *Prevrashchenja pereohlazhdennogo austenita [Transformations of supercooled austenite]* Moskow: Metallurgizdat [in USSR].
3. Sadovskii V.D. (1945). *Strukturnye prevraschenja pri zaralke i otpuske konstrukcionnyh stalei [Structural transformations during hardening and tempering of structural steels]* Sverdovsk: Izdatelstvo uralskogo philiiala AN USSR [in USSR].
4. Sadovskii V.D., & Phokina E.A. (1986). *Ostatochny austenit v zakaleno stali [Residual austenite in hardened steel]* Moskow: Nauka [in USSR].
5. Savytskyi, O. M. & Shkrabakiuk Ju. M. (2013). Osoblyvosti vplyvu vysokyh shvydkosteï nagrïvu na temperaturnyi interval gomogenizacii austenitu i rosty vtorynnogo zerna e deglecevyh staliah [Especially the effect of high heating rates on homogenization temperature range of austenite and secondary grain growth in carbon steels]. *Metaloznnavstvo ta obrobka menaliw - Metal science and metalworking*, 3, 31-37 [in Ukrainian].

6. Savytskyi, O. M. (2006). *Keruvannja strukturoutvorennjam u vuglecevyh staliah pry lokalnomu termichnomu vplyvovi [Control of the formation of a structure in carbon steels with local thermal effects] Metaloznavstvo ta obrobka metaliv - Metal science and metalworking, 3, 31-37 [in Ukrainian].*
7. Akulov A.I., Belchuk G.A., & Demiancevich V.P. (1977). *Tehnologija i oborudovanie svarki plavlenniem [Technology and equipment for melting welding].* Moscow: Mashinostroenie [in USSR].
8. Savytskyi, O. M. (2001). *Keruvannja strukturoyoyu ta vlastyvostiamy metalu pry dugovomy zvaryouvanni gartivnyh stalei [Control of the structure and properties of metal in arc welding of hardening steels]. Extended abstract of Candidate's thesis.* Kiev [in Ukrainian].
9. Savytskyi, O.M. (2015). *Teplofizychnyi stan veglecevyh stalei ta iogo vplyv na formuvannja teplovogo barrieru pry lokalni termichni dii [Thermal physical condition carbon steel and its effect on the formation of a thermal barrier at a local thermal effect]. Metaloznavstvo ta obrobka metaliv - Metal science and metalworking, 3, 28-34 [in Ukrainian].*

Одержано 11.07.17

А. М. Савицкий, М. М. Савицкий

Влияние структуры на свойства сварных соединений сталей

Резюме

Исследовано влияние структуры металла сварных соединений на их свойства. Показано, что увеличение содержания продуктов промежуточного и диффузионного распада аустенита в структуре металла сопровождается ростом его вязкости и усилением стойкости против образования холодных трещин и хрупкого разрушения. Стойкость к образованию горячих трещин определяется продолжительностью пребывания сварочной ванны в жидком состоянии и не зависит от фазового состава металла шва. Ее усиливает периодическая кристаллизация ванны, особенно с применением дополнительного холодильника, который ускоряет кристаллизацию, меняет ее характер и ослабляет негативное влияние теплового барьера на формирование соединения.

O. M. Savitsky, M. M. Savitsky

The influence of the structure on the properties of welded joints of steels

Summary

The effect of the metal structure of welded joints on their properties is studied. It is shown that an increase in the content of intermediate and diffusion austenite decomposition products in the metal structure is accompanied by an increase in its viscosity and an increase in resistance against the formation of cold cracks and brittle fracture. Resistance to the formation of hot cracks is determined by the duration of the stay of the weld pool in the liquid state and does not depend on the phase composition of the weld metal. It is strengthened by periodic crystallization of the bath, especially with the use of an additional cooler, which accelerates crystallization, changes its character and attenuates the negative effect of the thermal barrier on the formation of the compound.