

УДК 621.791.75.052:669.14.018.295

КОНСТРУКЦІЙНІ СТАЛІ КЛАСУ МІЦНОСТІ С350...С490 ТА ЇХ ЗДАТНІСТЬ ДО ЗВАРЮВАННЯ

ПОЗНЯКОВ В. Д. ^{1*}, д.т.н.

^{1*} Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, вул. Боженка, 11, 03680, Київ, Україна, тел. +38(044) 200-73-66

Анотація. Мета. Структура і механічні властивості сталі можуть змінюватися, деколи істотно, під дією термічних циклів зварювання. Як це відбувається в металі зони термічного впливу зварних з'єднань деяких, найбільш поширених низьколегованих та мікролегованих конструкційних сталей класу міцності від С350 до С490, потрібно було дослідити. **Методи.** Дослідження виконувалися стосовно оброблених по термічному циклу зварювання зразків та зразків, які виготовлялись з наплавлень на пластину. Вплив термічних циклів зварювання на структуру металу зони термічного впливу вивчали методом дилатометричних досліджень та оптичної мікроскопії. Механічні випробування на статичний розтяг та ударний вигин проводили з використанням стандартних зразків: тип II по ГОСТ 6996-66 і тип IX по ГОСТ 9454-78. **Результати.** Встановлено, що в результаті дії термічних циклів зварювання структура металу зони термічного впливу більшості низьколегованих сталей змінюється від феритно-перлітної до бейнітної-мартенситної та мартенситної. За рахунок цього показники статичної міцності та ударної в'язкості металу зростають, а його пластичні властивості зменшуються. На відміну від низьколегованих сталей структура металу зони термічного впливу зварних з'єднань більшості мікролегованих сталей класу міцності від С350 до С490, за винятком сталі 09Г2СЮч, в широкому діапазоні швидкостей охолодження залишається стабільною, а механічні властивості суттєво не змінюються. **Наукова новизна.** Розширено уявлення щодо впливу термічних циклів зварювання т структуру та механічні властивості металу зони термічного впливу зварних з'єднань низьколегованих та мікролегованих конструкційних сталей. **Практична значимість.** Результати досліджень можуть бути використані при розробці технологій зварювання для виготовлення і ремонту металевих конструкцій із сталей класу міцності від С350 до С490.

Ключові слова: зона термічного впливу, термічний цикл зварювання, структура металу, механічні властивості

КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ С350...С490 И ИХ СВАРИВАЕМОСТЬ

ПОЗНЯКОВ В. Д. ^{1*}, д.т.н.

^{1*} Інститут електросварки ім. Є. О. Патона НАН України, вул. Боженка, 11, 03680, Київ, Україна, тел. +38(044) 200-73-66

Аннотация. Цель. Структура и механические свойства сталей могут изменяться, порой существенно, под действием термических циклов сварки. Как это происходит в металле зоны термического влияния сварных соединений некоторых, наиболее распространенных низколегированных и микролегированных конструкционных сталей класса прочности от С350 до С490, нужно было исследовать. **Методы.** Исследования выполнялись относительно обработанных по термическому циклу сварки образцов и образцов, которые изготавливались из наплавлялок на пластину. Влияние термических циклов сварки на структуру металла зоны термического влияния изучали методом дилатометрических исследований и оптической микроскопии. Механические испытания на статическое растяжение и ударный изгиб проводили с использованием стандартных образцов: тип II по ГОСТ 6996-66 и тип IX по ГОСТ 9454-78. **Результаты.** Установлено, что в результате действия термических циклов сварки структура металла зоны термического влияния большинства низколегированных сталей изменяется от феррито-перлитной до бейнито-мартенситной и мартенситной. За счет этого показатели статичной прочности и ударной вязкости металла растут, а его пластичные свойства уменьшаются. В отличие от низколегированных сталей структура металла зоны термического влияния сварных соединений большинства микролегированных сталей класса прочности от С350 до С490, за исключением стали 09Г2СЮч, в широком диапазоне скоростей охлаждения остается стабильной, а механические свойства существенно не изменяются. **Научная новизна.** Расширено представление относительно влияния термических циклов сварки на структуру и механические свойства металла зоны термического влияния сварных соединений низколегированных и микролегированных конструкционных сталей. **Практическая значимость.** Результаты исследований могут быть использованы при разработке технологий сварки для изготовления и ремонта металлических конструкций из сталей класса прочности от С350 к С490.

Ключові слова: зона термічного впливу, термічний цикл зварювання, структура металу, механічні властивості

STRUCTURAL STEEL OF STRENGTH CLASS S350...S490 AND WELDABILITY

POZDNYAKOV V.D.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.)*

^{1*} *Institute of Electric them. Paton NAS of Ukraine, ul. Bozhenko, 11, 03680 Kiev, Ukraine, Phone. +38(044) 200-73-66*

Annotation. Goal. Structure and mechanical properties of the steel can vary, sometimes significantly, by thermal welding cycles. As it happens in a metal heat-affected zone of welded joints of some of the most common low-alloy and micro-alloyed structural steels of strength classes from C350 to S490, it was necessary to explore. **Methods.** Investigations were carried out with respect to the treated by thermal cycle of welding samples and specimens, which were made of naplavlavok on the plate. Effect of welding thermal cycles on the metal structure of the heat affected zone was studied by dilatometric studies and optical microscopy. Mechanical tests on static tensile and impact tests were carried out using standard samples: type II according to GOST 6996-66 and type IX according to GOST 9454-78. **Results.** It is found that the effect of the thermal cycles of the welding metal structure of the HAZ most alloy steels ranges from ferrite-pearlite to martensite-bainite and martensite. Due to this static parameters the strength and toughness of the metal grow and its plastic properties decrease. In contrast to low-alloyed steel HAZ of welded joints of most micro-alloyed steels with strength class area of the metal structure of the C350 to S490 except 09G2SYuch steel, in a wide range of cooling rates remained stable, and the mechanical properties do not change significantly. **Scientific novelty.** Expanded view on the influence of thermal cycles of welding on the structure and mechanical properties of the metal heat-affected zone of welds low-alloy and micro-alloyed structural steels. **Practical significance.** The research results can be used in the development of welding technology for the manufacture and repair of metal structures made from steel of strength classes from C350 to S490.

Keywords: heat-affected zone, thermal cycle of welding, metal structure, mechanical properties

Вступ

Сталі, що призначені для виготовлення зварних конструкцій, повинні мати високу міцність при достатньому рівні пластичності та ударної в'язкості, добре опиратися крихкому руйнуванню, задовільно оброблятися і мати хорошу здатність до зварювання. Щоб задовольнити всі ці вимоги в металургії широко використовують різні системи легування та мікролегування сталей, технологічні і металургійні прийоми їх виготовлення, поєднання яких забезпечує отримання необхідних властивостей прокату, що й визначає сферу його застосування.

Оцінка здатності сталей до зварювання зводиться до визначення оптимальних умов зварювання, за яких виключається можливість утворення в з'єднаннях холодних тріщин, а в металі зони термічного впливу (ЗТВ) структур, які сприятимуть зниженню його міцності, пластичності та холодостійкості.

На відміну від сталевого прокату на формування структури в металі ЗТВ зварних з'єднань високоміцних сталей суттєво впливає термічний цикл зварювання (ТЦЗ). Найбільш суттєві зміни в структурі сталі при зварюванні відбуваються на ділянці перегріву металу ЗТВ, тобто в тій його зоні, яка знаходиться в безпосередній близькості до шва і нагрівається до температури 1300–1150 °С.

При дуговому зварюванні параметри ТЦЗ залежать від багатьох факторів. Найважливішими з них є погонна енергія зварювання, початкова температура металу та його товщина, тип зварного з'єднання. Зі збільшенням погонної енергії зварювання та початкової температури металу швидкість охолодження металу ЗТВ в інтервалі температур 600 – 500 С ($W_{6/5}$, °С/с) зменшується, а при збільшенні товщини металу - зростає.

Мета

Метою даної роботи було дослідити зміни в структурі та механічні властивості металу зони термічного впливу зварних з'єднань конструкційних сталей класу міцності від С350 до С490 під впливом дугових процесів зварювання.

Методика

Дослідження виконувалися стосовно оброблених по термічному циклу зварювання зразків та зразків, які виготовлялися з наплавлень на пластину. Вплив термічних циклів зварювання на структуру металу зони термічного впливу вивчали методом дилатометричних досліджень та оптичної мікроскопії. Механічні випробування на статичний розтяг та ударний вигин проводили з використанням стандартних зразків: тип II по ГОСТ 6996-66 і тип IX по ГОСТ 9454-78.

Результати

Для визначення впливу хімічного складу та умов охолодження металу на його структуру зазвичай використовують діаграми перетворення аустеніту, які побудовані з урахуванням процесів, що відбуваються при зварюванні. При цьому, щоб забезпечити характерну для зварювання високу стійкість аустеніту, при побудові діаграм перетворення в якості стандартних вибирають такі умови нагрівання (W_n), за яких достатньо чітко починають проявлятися індивідуальні особливості сталей щодо схильності до росту зерна. Зазвичай під час дилатометричних досліджень швидкість нагрівання зразків встановлюють в межах 150–300 °С/с [4]. Швидкості охолодження дилатометричних зразків вибирають виходячи з необхідності забезпечення в інтервалі температур найменшої стійкості аустеніту таких

умов охолодження, які будуть максимально наближені до умов охолодження металу в певній ділянці зони термічного впливу з'єднань, виконаних на характерних для процесів дугового зварювання режимах.

Швидкість нагрівання регулюють змінюючи по заданій програмі силу струму, який проходить через зразок, а швидкість охолодження – охолоджуючи пристрої, які передають струм від нагрівальної машини до зразка водою, обдуваючи зразки газом за допомогою спреєрів, або пропускаючи через них струм невеликої величини.

Завдяки жорсткому закріпленню зразків в нагрівальній машині в них на ділянці рівномірного нагрівання імітуються процеси розвитку внутрішніх деформацій, які по величині і характеру змін близькі до поздовжніх внутрішніх деформацій, що утворюються на ділянці перегріву металу ЗТВ при дуговому наплавленні шару металу на крайки пластин.

Побудовані на підставі діаграми перетворення аустеніту залежності щодо зміни структурних складових, які відбуваються при різних швидкостях охолодження на ділянці перегріву металу ЗТВ найбільш вживаних низьколегованих конструкційних сталей, хімічний склад та механічні властивості яких наведено в табл. 1 і 2, представлені на рис. 1 [5, 6].

Таблиця 1.

Хімічний склад низьколегованих сталей

Сталь	Масова частка елементів, %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	V	S	P
14Г2	0,16	0,37	1,22	---	---	---	---	0,028	0,027
14Г2АФ	0,14	0,45	1,46	---	---	---	0,10	0,027	0,022
09Г2С	0,07	0,65	1,42	---	---	---	---	0,031	0,029
10Г2С1	0,09	1,03	1,65	---	---	---	---	0,030	0,026
17Г1С	0,17	0,47	1,22	---	---	---	---	0,034	0,023
10ХСНД	0,09	0,98	0,70	0,77	0,80	0,37	---	0,018	0,020
16Г2АФ	0,18	0,17	1,32	---	---	---	0,09	0,028	0,017
15ХСНД	0,15	0,62	0,70	0,79	0,60	0,31	---	0,030	0,026

Таблиця 2.

Механічні властивості низьколегованих сталей

Сталь	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ_5	Ψ	KCV ₄₀	KCV ₄₀
	МПа		%		Дж/см ²	
14Г2	293	486	22,5	60,1	36	20
14Г2АФ	320	560	24,0	60,2	39	13
09Г2С	390	487	43,3	65,3	60	24
10Г2С1	400	607	30,3	52,6	45	23
17Г1С	420	577	25,5	57,7	30	15
10ХСНД	450	590	26,6	54,9	50	26
16Г2АФ	450	600	23,1	55,0	48	25
15ХСНД	465	690	24,4	41,8	38	18

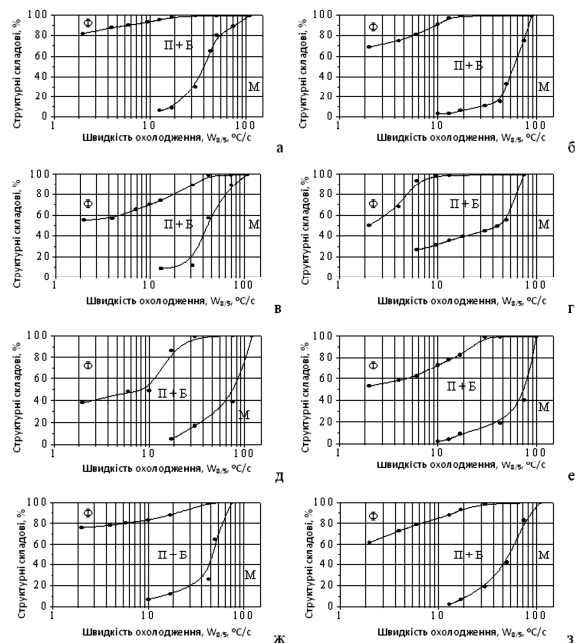


Рис. 1. Діаграми структурних перетворень аустеніту на ділянці перегріву металу ЗТВ низьколегованих сталей: а – 14Г2; б – 09Г2С; в – 15ХСНД; г – 17Г1С; д – 10Г2С1; е – 10ХСНД; ж – 14Г2АФ; з – 16Г2АФ

Загальним для низьколегованих високоміцних конструкційних сталей типу 14Г2, 14Г2АФ, 09Г2С, 10Г2С1, 17Г1С, 15ХСНД, 16Г2АФ та 10ХСНД є те, що під впливом термічних циклів зварювання, в залежності від швидкостей охолодження, перетворення аустеніту в них відбувається в феритній, бейнітній та мартенситній областях та те, що при збільшенні швидкостей охолодження, температури початку феритного, початку та кінця бейнітного перетворень понижуються, а температура початку мартенситного перетворення, яке відбувається після бейнітного, підвищується. Особливим для цих сталей є те, що за однакових умов охолодження кількість структурних складових в сталях різного хімічного складу різна.

В діапазоні швидкостей охолодження $W_{8/5}$ від 2 до 10 °C/c перетворення аустеніту на ділянці перегріву металу ЗТВ сталей 14Г2, 09Г2С, 15ХСНД, 10ХСНД, 14Г2АФ та 16Г2АФ відбувається переважно з утворенням фериту та бейніту. Для сталі 17Г1С цей діапазон дещо вужчий, від 2 до 7 °C/c, а для сталі 10Г2С1 – ширший, від 2 до 20 °C/c. При більших швидкостях охолодження на ділянці перегріву металу ЗТВ зазначених сталей починає утворюватися мартенсит. При $W_{8/5} \geq 70$ °C/c в сталях 09Г2С, 10Г2С1 та 10ХСНД його кількість в металі досягає 50%. За даними роботи [7] метал, що містить більше 50% мартенситу, стає схильним до уповільненого руйнування, яке відбувається під дією розтягуючих напруг та інтенсифікується дифузійним воднем.

При $W_{8/5} \geq 100$ °C/c майже у всіх цих сталях, за винятком сталей 17Г1С та 10ХСНД, його кількість

досягає 100%. В сталях 17Г1С та 10ХСНД 100% мартенситу утворюється при $W_{8/5} \geq 80$ °C/с.

По особливому відбуваються перетворення аустеніту на ділянці перегріву металу ЗТВ низьковуглецевих мікролегованих високоміцних сталей марок 06ГБД, 06Г2Б та 10Г2ФБ, хімічний склад та механічні властивості яких представлені в табл. 3 та 4 відповідно. Навіть при швидкостях охолодження $W_{6/5} = 70$ °C/с кількість мартенситу в них не перевищує 40% (рис. 2). Майже у всьому дослідженому діапазоні швидкостей охолодження перетворення аустеніту на ділянці перегріву металу ЗТВ сталей 06Г2Б та 10Г2ФБ відбувається переважно з утворенням бейніту, а в сталі 06ГБД – фериту, перліту та бейніту.

Таблиця 3.

Хімічний склад низьковуглецевих мікролегованих сталей

Сталь	Масова частка елементів, %							
	C	Si	Mn	V	Nb	Al	S	P
06ГБД	0,07	0,20	1,20	0,04	0,019	---	0,006	0,008
06Г2Б	0,08	0,27	1,50	---	0,05	0,04	0,006	0,011
09Г2СЮч	0,10	0,36	1,90	---	---	0,06	0,010	0,015
10Г2ФБ	0,08	0,25	1,57	0,05	0,05	---	0,007	0,013

Таблиця 4.

Механічні властивості низьковуглецевих мікролегованих сталей

Сталь	$\sigma_{0,2}$	σ_b	δ_5	Ψ	КСУ ⁻⁴⁰	КСV ⁻⁴⁰
	МПа		%		Дж/см ²	
06ГБД	410	535	32,3	84,2	348	300
06Г2Б	448	550	34,1	81,6	330	290
09Г2СЮч	460	590	32,6	80,1	260	196
10Г2ФБ	530	612	25,6	62,4	279	256

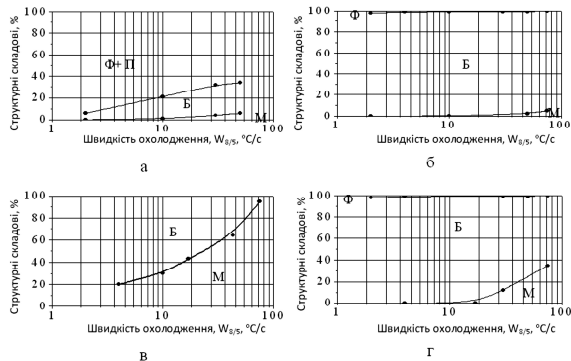


Рис. 2. Діаграми структурних перетворень аустеніту на ділянці перегріву металу ЗТВ мікролегованих сталей типу: а – 06ГБД; б – 06Г2Б; в – 09Г2СЮч; г – 10Г2ФБ

Подібні до більшості представлених легованих високоміцних сталей перетворення аустеніту при безперервному охолодженні зразків по термічному циклу зварювання відбуваються і на ділянці перегріву металу ЗТВ низьковуглецевої сталі марки 09Г2СЮч, яка мікролегована церієм. Як і в легованих високоміцних сталях, перетворення аустеніту в ній при охолодженні відбувається з утворенням бейніту та мартенситу.

Таким чином, наведені матеріали свідчать про те, що в процесі зварювання під впливом ТЦЗ структура металу високоміцних сталей в зоні високотемпературного нагріву змінюється. В залежності від хімічного складу сталей та умов охолодження зварних з'єднань ці зміни можуть бути досить суттєвими, що не може не позначитися на їх механічних властивостях. Як саме вони змінюються в зоні термічного впливу найбільш поширених низьколегованих та легованих високоміцних сталей висвітлено нижче.

Одним з найбільш поширених методів, які використовуються для досліджень впливу термічних циклів зварювання (ТЦЗ) на показники ударної в'язкості металу ЗТВ низьколегованих та легованих високоміцних конструкційних сталей, є метод, який базується на використанні «валикової проби» та виконується відповідно до ГОСТ 13585-68. Умови випробувань зводяться до наступного. На складену із окремих брусків пластину розмірами $\delta x (\delta_1 = \delta) x (200-450)$ мм наплавляється валик, який виконується на режимах, що забезпечують найбільш характерні для дугових процесів зварювання металу різної товщини швидкості охолодження.

Складову пластину збирають у спеціальному кондукторі таким чином, щоб наплавлення виконувалося на поверхні різі брусків (рис. 3). Кількість брусків для складеної пластини вибирають виходячи з необхідної кількості зразків, що будуть випробовуватись. Після наплавлення пластину звільняють з кондуктора та у вільному стані охолоджують на повітрі. Потім бруски по черзі відділяють один від одного, попередньо видаливши механічним способом посилення наплавленого металу. З наплавлених і підготовлених вищевказаним способом брусків виготовляються зразки для випробувань на ударний вигін відповідно до ГОСТ 6996-66.

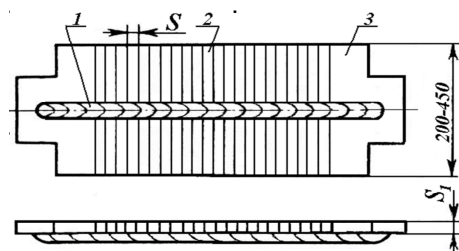


Рис. 3. Пластина з наплавленням: 1 – валик; 2 – брусок; 3 – планка приставна.

Для визначення ударної в'язкості використовувалися зразки перерізом 10 x 10 x 55 мм (тип VI з круглим надрізом і тип IX з гострим надрізом). Випробування зразків проводили при температурі мінус 40 °С.

В якості критерію ТЦЗ брали швидкість охолодження металу, нагрітого до температури 1200...1300 °С, при його остиганні в інтервалі температур 600...500 °С ($W_{6/5}$). Дослідження проводилися у діапазоні швидкостей охолодження від 3,0 °С/с до 50 °С/с, які є характерними для ручного, механізованого в захисних газах та автоматичного під шаром флюсу дугових процесів зварювання та охоплюють практично увесь діапазон режимів зварювання, що застосовуються під час виготовлення, монтажу і ремонту металевих конструкцій різної товщини. Режим зварювання при цьому виражається сукупністю параметрів зварювального процесу (струм, напруга, швидкість зварювання і ефективний коефіцієнт корисної теплової дії дуги) або погонною енергією зварювання. Щоб забезпечити зазначені умови охолодження зварних з'єднань, наплавлення на пластини товщиною 20 мм виконували дротом суцільного перетину діаметром 4,0 мм під шаром флюсу на режимах, які наведені у табл. 5.

Таблиця 5.

Режими, на яких виконувалося наплавлення на пластини

№ п/п	Ізв, А	U _д , В	V _{зв} , м/г	Q _{зв} , кДж/см	W _{8/5} , °С/с
1	580...600	34...38	9,8	62,7	3
2	580...600	34...38	14,7	41,8	6
3	580...600	34...38	17,3	35,7	10
4	580...600	34...38	21,7	28,6	20
5	380...400	30...32	15,2	23,0	30
6	380...400	30...32	20,1	16,7	50

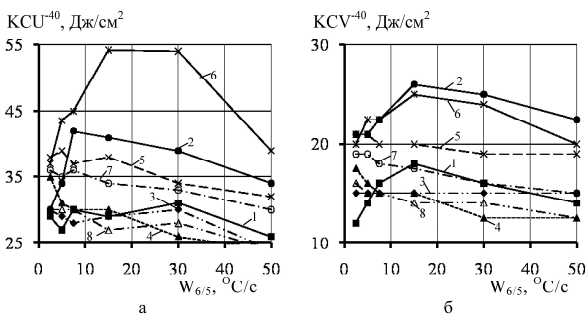


Рис. 4. Вплив швидкості охолодження $W_{6/5}$ на показники ударної в'язкості металу ЗТВ сталей: 14Г2 (1), 09Г2С (2), 15ХСНД (3), 17Г1С (4), 10Г2С1 (5), 10ХСНД (6), 14Г2АФ (7), 16Г2АФ (8)

Залежності, які характеризують вплив швидкості охолодження зварних з'єднань на показники ударної в'язкості металу ЗТВ низьколегованих сталей класу міцності С350–С440, наведені на рис.4. Вони свідчать про те, що в діапазоні швидкостей

охолодження $W_{6/5} = 3,0-30$ °С/с ударна в'язкість металу на ділянці перегріву ЗТВ знаходиться на рівні вимог ($KCU^{-40} \geq 29$ Дж/см²), що пред'являються до зварних з'єднань металевих конструкцій, які виготовляються з таких сталей. При збільшенні швидкості до $W_{6/5} > 30$ °С/с показники KCU^{-40} металу ЗТВ більшості низьколегованих сталей типу 14Г2, 15ХСНД, 17Г1С, 16Г2АФ значно зменшуються та перестають відповідати зазначеним вимогам.

Щодо сучасних вимог до ударної в'язкості низьколегованих сталей класу міцності С350–С440 ($KCV^{-40} \geq 25$ Дж/см²), то вони можуть бути забезпечені лише при використанні сталей типу 09Г2С та 10ХСНД і лише в тих випадках, коли зварювання виконується на режимах, які забезпечують охолодження металу ЗТВ зварних з'єднань в діапазоні $W_{6/5}$ від 15 до 30 °С/с.

Більш високі показники ударної в'язкості має метал ЗТВ зварних з'єднань низьковуглецевих сталей, які мікролеговані, окремо або в поєднанні, ванадієм, алюмінієм, ніобієм та церієм (рис. 5). Але й до них існують певні обмеження щодо вибору режимів зварювання, коли мова йде про забезпечення ударної в'язкості зварних з'єднань на рівні сучасних вимог. Гарантовано отримати показники KCV^{-40} на рівні, який суттєво перевищує 25 Дж/см² в металі ЗТВ таких сталей можливо за умов охолодження зварних з'єднань з $W_{6/5} \geq 6$ °С/с.

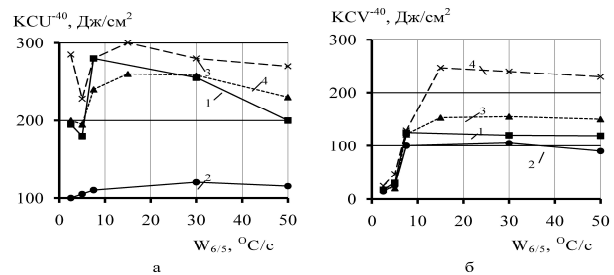


Рис. 5. Вплив швидкості охолодження $W_{6/5}$ на показники ударної в'язкості металу ЗТВ сталей: 06ГБД (1), 09Г2СЮч (2), 06Г2Б (3), 10Г2ФБ (4)

Для отримання інформації про вплив ТЦЗ на показники статичної міцності і пластичні властивості металу ЗТВ зварних з'єднань використовують стандартні зразки на розтяг, які виготовляються із заздалегідь оброблених по термічному циклу зварювання брусків металу, що досліджується. Це пов'язано з тим, що зазвичай розміри ЗТВ та окремих її складових значно менші ніж розміри зразків, які випробовуються. Тому в даному посібнику наведені дані щодо змін границі текучості, границі міцності, відносного подовження та відносного звуження, які відбуваються в металі ЗТВ деяких низьколегованих та легованих високоміцних сталей під впливом ТЦЗ, отримані саме з використанням вище зазначеного підходу.

При проведенні досліджень використовувались брускочки розміром 13x13x150 мм, які оброблялися по термічному циклу зварювання на установці МСР-75, розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [11].

Для моделювання ТЦС зразки нагрівалися струмом, що проходить, до температури 1250 °С (швидкість нагріву 150 °С/с), а потім охолоджувалися за заданою програмою. За рахунок регулювання інтенсивності обдування зразків інертним газом швидкість їх охолодження в інтервалі температур 600 – 500 °С змінювали від 3 до 50 °С/с. Режим нагріву – охолодження зразків контролювався хромель-алюмельовою термопарою діаметром 0,5 мм, а швидкість охолодження оцінювалася за результатами обробки осцилограм, запис яких вівся на осцилограф 117/1 в координатах температура – час.

Для випробування на статичний (короткочасний) розтяг із оброблених по ТЦЗ брусоків механічним способом виготовляли зразки типу II відповідно до ГОСТ 6996-96 (по 2 зразки на кожну швидкість охолодження). Випробування виконували відповідно до ГОСТ 6996-66 при температурі плюс 20 °С.

Дані щодо впливу ТЦЗ на механічні властивості металу ЗТВ низьколегованих сталей, які наведено на рис. 6, свідчать про те, що по мірі зростання швидкості охолодження, границя текучості та границя міцності металу монотонно збільшуються, а відносне подовження та відносне звуження – зменшуються. В різних сталях це відбувається по різному. Найбільш стрімко зростає статична міцність та зменшується пластичність в металі ЗТВ зварних з'єднань сталей, що мають підвищений вміст вуглецю, таких як 14Г2, 15ХСНД, 17Г1С тощо. Саме в цих сталях навіть при відносно невеликих швидкостях охолодження утворюється мартенсит (рис. 1), який характеризується високою твердістю та міцністю та низькою здатністю до деформування. Враховуючи це, зварювання таких сталей повинно виконуватися на більш високих режимах, які забезпечать охолодження ($W_{6/5}$) металу ЗТВ зварних з'єднань на рівні, що не перевищує 15 °С/с. Для інших низьколегованих сталей режими зварювання повинні вибиратися виходячи з умов забезпечення зварним з'єднанням необхідних показників ударної в'язкості, про що йшлося вище.

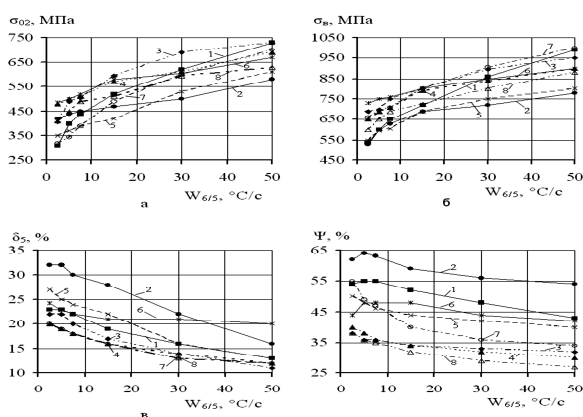


Рис. 6. Вплив швидкості охолодження $W_{6/5}$ на показники границі текучості (а), границі міцності (б), відносного подовження (в) та відносного звуження (г) металу ЗТВ сталей: 14Г2 (1), 09Г2С (2), 15ХСНД (3), 17Г1С (4), 10Г2С1 (5), 10ХСНД (6), 14Г2АФ (7), 16Г2АФ (8)

По іншому під впливом термічних циклів зварювання поводить метал ЗТВ низьковуглецевих мікролегованих сталей типу 06ГБД, 09Г2СЮч, 06Г2Б та 10Г2ФБ (рис. 7).

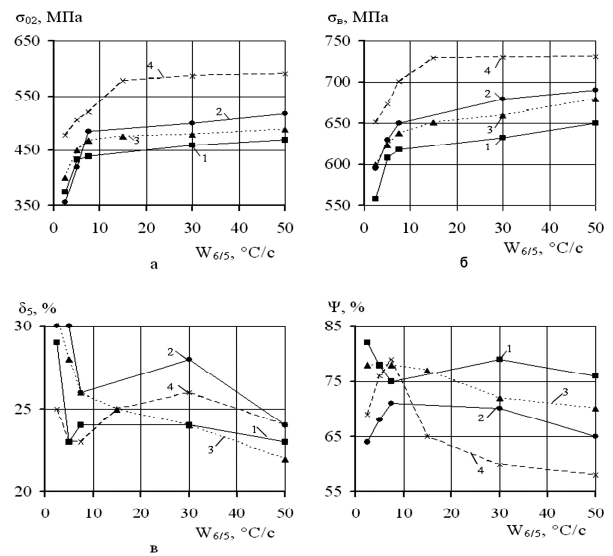


Рис. 7. Вплив швидкості охолодження $W_{6/5}$ на показники границі текучості (а), границі міцності (б), відносного подовження (в) та відносного звуження (г) металу ЗТВ сталей: 06ГБД (1), 09Г2СЮч (2), 06Г2Б (3), 10Г2ФБ (4)

При швидкостях охолодження $W_{6/5}$ зварних з'єднань, що менші ніж 10 °С/с, метал в зоні термічного впливу таких сталей знеміцнюється. Це проявляється в тому, що значення його границі текучості зменшуються по відношенню до основного металу на 10–25%. В діапазоні швидкостей від 3–10 °С/с значення σ_{02} та σ_b металу ЗТВ стрімко зростають та в подальшому підвищуються досить повільно. Це цілком закономірно, оскільки, як свідчать дані, наведені на рис. 2, структура металу ЗТВ низьковуглецевих мікролегованих сталей в широкому діапазоні швидкостей охолодження залишається стабільною. Як і в низьколегованих сталях пластичні властивості металу ЗТВ низьковуглецевих мікролегованих сталей зменшуються по відношенню до основного металу. Натомість, на відміну від більшості низьколегованих сталей вони залишаються досить високими та стабільними в широкому діапазоні швидкостей охолодження.

Наукова новизна та практична значимість

Розширено уявлення щодо впливу термічних циклів зварювання т структуру та механічні властивості металу зони термічного впливу зварних з'єднань низьколегованих та мікролегованих конструкційних сталей. Результати досліджень можуть бути використані при розробці технологій зварювання для виготовлення і ремонту металевих конструкцій із сталей класу міцності від С350 до С490.

Висновки

1. При безперервному охолодженні по термічному циклу зварювання з швидкостями $W_{6/5} < 20$ °C/c перетворення аустеніту в низьколегованих конструкційних сталях відбувається головним чином феритній, перлітній та бейнітній областях, а при $W_{6/5} > 80$ °C/c – в мартенситній.

2. На відміну від більшості конструкційних низьколегованих сталей, перетворення аустеніту в мікролегованих ванадієм та ніобієм сталях класу міцності від С350 до С 490 при безперервному охолодженні по термічному циклу зварювання відбувається переважно в бейнітній області.

3. Внаслідок структурних перетворень, які відбуваються в сталях під впливом термічних циклів

зварювання, показники статичної міцності металу зони термічного впливу зварних з'єднань зростають, а пластичні властивості зменшуються.

4. Найбільш високі показники ударної в'язкості в металі зони термічного впливу зварних з'єднань низьколегованих конструкційних сталей забезпечується в діапазоні швидкостей охолодження $W_{6/5}$ від 10 до 30 °C/c.

5. Істотне зменшення показників ударної в'язкості в металі зони термічного впливу зварних з'єднань мікролегованих конструкційних сталей спостерігається при $W_{6/5} < 10$ °C/c. Із збільшенням швидкості охолодження ударна в'язкість металу зони термічного впливу стрімко зростає, та в деяких сталях майже досягає рівня основного металу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шоршоров М.Х. , Белов В.В. Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке / М.: Наука, 1972. – 220 с.
2. Seyffarth P. Schwei b - Z.T.U. – Schaubilder. – Berlin: VEB Verlag. – 1982. – 233s.
3. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей - М.: Машиностроение, 1981. - 247 с.
4. Сварка высокопрочной стали 12ГН2МФАЮ / В.Ф. Мусяченко, Б.С. Касаткин, Л.И. Миходуй и др. // Автомат. сварка.- 1982.-№5.- С. 47-50.
5. Саржевский В.А., Сазонов В.Я. Установка для имитации термических циклов сварки на базе машины МСР-75 // Автомат. сварка. – 1981. - №5. – С.69-70.

REFERENCES

1. Shorshorov M.KH. , Belov V.V. Fazovy`e prevrashcheniia i izmeneniia svoi`stv stali pri svarke / М.: Nauka, 1972. – 220 s.
2. Seyffarth P. Schwei b - Z.T.U. – Schaubilder. – Berlin: VEB Verlag. – 1982. – 233s.
3. Makarov E`L. Holodny`e treshchiny` pri svarke legirovanny`kh stalei` - М.: Mashinostroenie, 1981. - 247 s.
4. Svarka vy`sokoprochnoi` stali 12GN2MFAIU / V.F. Musiachenko, B.S. Kasatkin, L.I. Mihodui` i dr. // Avtomat. svarka.- 1982.-№5.- S. 47-50.
5. Sarzhevskii` V.A., Sazonov V.Ia. Ustanovka dlia imitacii termicheskikh tciclov svarki na baze mashi-ny` MSR-75 // Avtomat. svarka. – 1981. - №5. – S.69-70.

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, В.И. Большаковым и д-ром техн. наук, Д.В. Лаухиным (Украина)