

ОСОБЕННОСТИ ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СОЕДИНЕНИЙ БРОНЕВОЙ СТАЛИ МАРКИ 71 ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Постановка проблемы. В настоящее время при изготовлении сварных конструкций легкобронированной техники (ЛБТ) широко применяются броневые стали высокой прочности и твердости ($HV \geq 4400$ МПа). Данные стали относятся к классу высокопрочных сталей системы легирования Cr-Ni-Mn-Mo-V, в которых содержание углерода составляет более 0,29%. Высокие показатели прочности и твердости броневые стали получают в результате закалки и низкого отпуска.

Наряду с высокими требованиями к качеству соединений (отсутствие трещин, непроваров и др.), металл в зоне термического влияния (ЗТВ) должен иметь прочность и твердость на уровне броневой стали. Поскольку конструкцию ЛБТ сваривают из деталей бронезащиты в конечном термообработанном состоянии, то становится очевидным, что необходимые показатели механических свойств металла ЗТВ необходимо обеспечить непосредственно при сварке.

Анализ последних достижений и публикаций. Известно, что механические свойства металла ЗТВ сварных соединений определяются его структурным состоянием. При этом, на формирование структуры в ЗТВ влияет не только химический состав стали и ее изначальное структурное состояние, но и термический режим нагрева и охлаждения металла при дуговой сварке, который существенно отличается от условий обычной термической обработки [1, 2].

Сварку бронеконструкций современных ЛБТ, толщина которых составляет от 6,0 до 20 мм, выполняют, как правило, механизированным способом в защитных газах проволокой диаметром 1,2 мм на режимах с погонной энергией 8-12 кДж/см. При таких условиях характерные параметры термического цикла в ЗТВ следующие. Скорость нагрева металла ЗТВ до температуры 1300°C составляет 190...260°C/с, время пребывания металла выше температуры A_{c3} - не более 11 с, а скорость охлаждения в интервале температур 600...500°C ($W_{6/5}$) - 15...30°C/с [3, 4]. При сварке на повышенных режимах, или с применением предварительного подогрева деталей до температур 100-200°C, скорость охлаждения в ЗТВ может понижаться до 4°C/с. Очевидно, что такие условия нагрева-охлаждения будут существенно влиять на структурное состояние металла ЗТВ соединений броневой стали.

Для изготовления ЛБТ в Украине разработана отечественная броневая сталь высокой прочности и твердости марки 71 [5], изделия из которой отличаются повышенными служебными свойствами. Химический состав и механические свойства стали в конечном термообработанном состоянии приведены в табл.1 и табл.2.

Таблица 1

Содержание легирующих элементов, мас. %											
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al	Ti	S	P
0,29-0,36	1,20-1,50	0,60-1,0	1,50-2,0	2,0-2,40	0,45-0,55	$\leq 0,30$	0,18-0,25	0,015-0,050	0,005-0,025	$\leq 0,003$	$\leq 0,012$

© В.Д. Позняков, 2017

$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	Ψ , %	KCU^{+20} , Дж/см ²	KCU^{-40} , Дж/см ²	НВ*, МПа
1470 - 1660	1750 - 1960	≥ 7	≥ 15	$\geq 68,6$	$\geq 29,4$	4760 - 5380

Как видно, основные легирующие элементы находятся в достаточно жестких пределах, а содержание углерода в стали может изменяться в сравнительно широком диапазоне (от 0,29 до 0,36%), что может существенно повлиять на формирование структуры и механические свойства металла ЗТВ сварных соединений.

Целью настоящей работы является изучение особенностей влияния дуговой сварки на структурные изменения в броневой стали марки 71 и определение параметров термического цикла, обеспечивающих необходимый уровень механических свойств металла ЗТВ сварных соединений.

Материал и методика исследования. В качестве материала для исследований использовали броневые стали марки 71 следующих составов, мас. %:

№ 1 - **0,31 C**; 1,16 Si; 0,74 Mn; 1,66 Cr; 2,26 Ni; 0,30 Mo; 0,20 V; 0,040 Al; 0,024 Ti.

№ 2 - **0,36 C**; 1,32 Si; 0,81 Mn; 1,65 Cr; 2,34 Ni; 0,50 Mo; 0,20 V; 0,037 Al; 0,025 Ti.

Химический анализ стали определяли эмиссионным методом на спектрометре «Спектровак-1000» производства фирмы «Baird». Металлографические исследования выполняли с помощью микроскопа «Neophot-32». Образцы для исследований изготавливали по стандартной методике с применением алмазных паст различной дисперсности. Твердость по Виккерсу измеряли на твердомере М-400 фирмы «Лесо» при нагрузке 1 Н и 10 Н. Механические свойства броневой стали в конечном термообработанном состоянии и металла ЗТВ определяли при статическом растяжении согласно ГОСТ 1497. Структурно-фазовые превращения в металле ЗТВ исследовали методом имитации термомодеформационного цикла сварки с использованием комплекса «Gleeble 3800» [6]. Скорость нагрева модельных образцов до 1250°C составляла 210°C/с, а скорость охлаждения $W_{6/5}$ изменяли от 2,5 до 30°C/с. При этом практически охватывался весь диапазон скоростей охлаждения, которые могут быть достигнуты при механизированной сварке в среде защитных газов броневых сталей на различных режимах, а также с использованием предварительного подогрева сварных соединений.

Основная часть (анализ результатов исследований). Броневая сталь марки 71 в состоянии поставки, без конечной термической обработки, не зависимо от содержания углерода, имеет смешанную структуру верхнего и нижнего бейнита (рис.1, а). Микротвердость структурных элементов колеблется в пределах $HV_{0,1} = 2660-3210$ МПа, а твердость металла составляет $HV = 3080-3200$ МПа. После закалки и низкотемпературного отпуска структура стали характеризуется как однородная мартенситная (рис.1, б). В стали с содержанием углерода 0,31% (№1) микротвердость мартенсита составляет 4430-4620 МПа, а при содержании C = 0,36% она увеличивается до величин 4640-4820 МПа. Твердость металла после термической обработки соответственно составляет 4480 и 4860 МПа.

Под действием термомодеформационного цикла сварки, в зависимости от скорости охлаждения и содержания углерода в стали, структура и свойства металла ЗТВ броневых сталей существенно изменяется. Обобщенные результаты исследований представлены в виде термокинетических диаграмм превращения переохлажденного аустенита в металле ЗТВ (рис.2). На рис.3 приведены характерные микроструктуры металла ЗТВ стали с содержанием C = 0,36%.

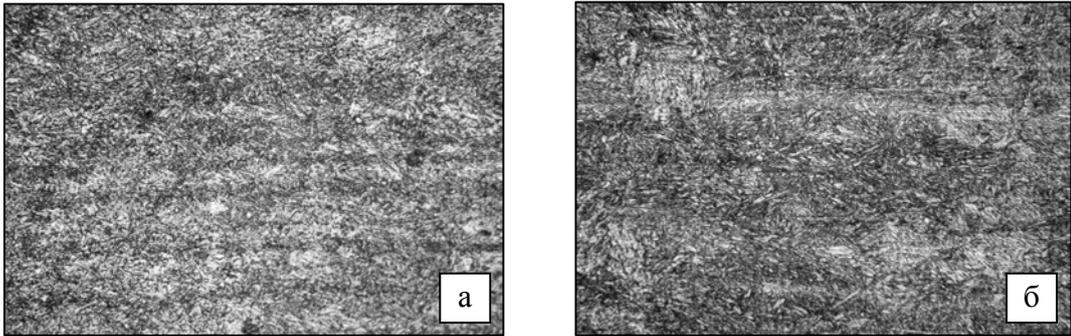


Рис.1. Структура броневой стали марки 71 в состоянии поставки (а) и после конечной термической обработки (б) (x500)

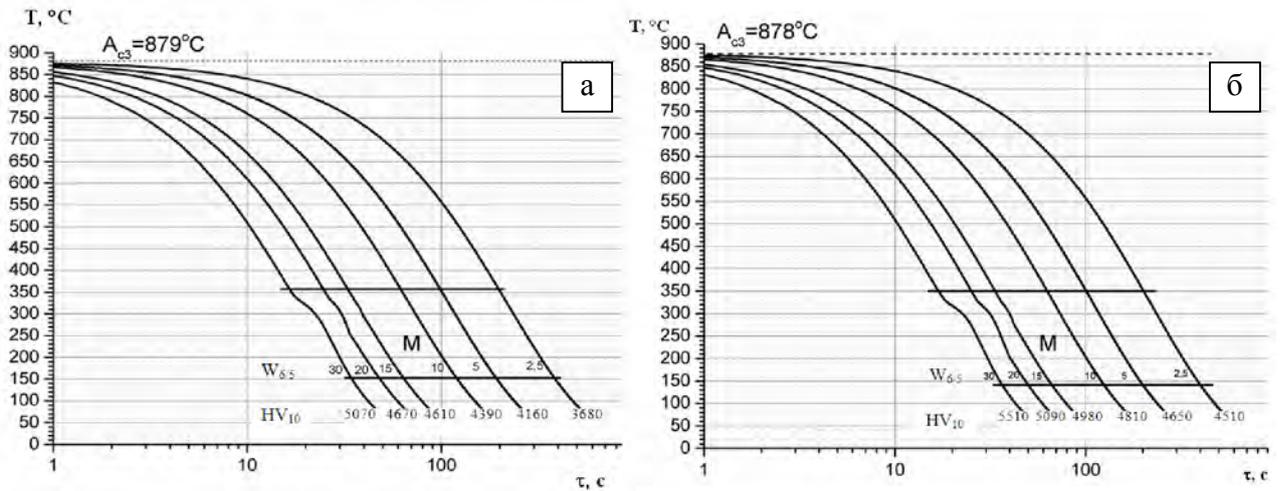


Рис.2. Термокинетические диаграммы превращения аустенита в металле ЗТВ сварных соединений броневой стали марки 71 с содержанием углерода 0,31% (а) и 0,36% (б)

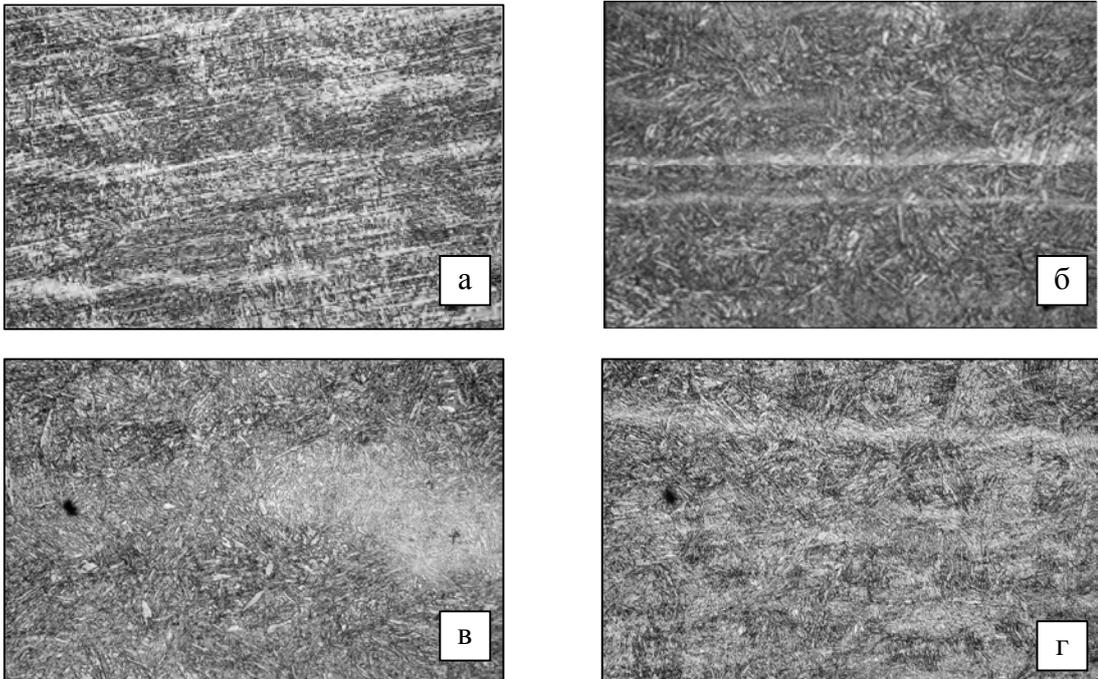


Рис.3. Характерная микроструктура в металле ЗТВ сварных соединений броневой стали марки 71 ($C = 0,36\%$) при $W_{6/5} = 2,5$ (а), 10 (б), 20 (в) и $30^\circ\text{C}/\text{c}$ (г) (x500)

Проведенные исследования показали, что превращение переохлажденного аустенита в металле ЗТВ броневой стали марки 71 с содержанием углерода 0,31% и 0,36% происходит исключительно в области мартенситного превращения. Независимо от скорости охлаждения, формирование мартенсита начинается при температуре 360°C, заканчивается при температуре 150°C (рис.2, а, б). Отличительной особенностью является то, что твердость закаленного металла HV_{10} в стали с содержанием углерода 0,36% при $W_{6/5} = 30-10^\circ\text{C}/\text{с}$ выше на 8,7-9,6%. При охлаждении с более низкими скоростями (5,0-2,5°C/с) разница в показателях твердости увеличивается до 11,2-22,5%. Очевидно, что это связано с особенностями формирования структуры в сталях с разным содержанием углерода.

При скорости охлаждения $W_{6/5} = 2,5-5,0^\circ\text{C}/\text{с}$ в металле ЗТВ стали с содержанием углерода 0,31% образуется мартенсит с микротвердостью $HV_{0,1} = 3360-3830$ МПа, размеры пакетов которого составляют примерно 34 мкм. Твердость закаленного металла при этом составляет $HV_{10} = 3680-4160$ МПа. При аналогичных условиях охлаждения в металле ЗТВ стали с содержанием углерода 0,36% формируется такой же мартенсита, но микротвердость которого уже существенно выше - 3930-4720 МПа. При этом твердость закаленного металла в абсолютных величинах повышается на 830-490 МПа.

С увеличением скорости охлаждения до 10°C/с и выше в металле ЗТВ сталей формируется мартенсит более дисперсного вида, размеры пакетов которого постепенно снижаются и при 30°C/с составляют уже 12,5 мкм. Это приводит к повышению микротвердости мартенсита для сталей с разным содержанием углерода соответственно до 4170-4720 и 4460-5200 МПа, что в конечном итоге способствует общему повышению твердости закаленного металла до 5070 и 5510 МПа. При этом, максимальная разница в абсолютных величинах твердости металла ЗТВ сталей с содержанием углерода 0,31% и 0,36% снижается с 830 до 440 МПа.

Обобщенные результаты испытаний образцов стали марки 71 после нагрева-охлаждения при статическом растяжении приведены в табл.3.

Таблица 3

Механические свойства металла ЗТВ броневой стали марки 71 в зависимости от содержания углерода в стали

C, %	$W_{6/5}$, °C/с	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	Ψ , %
0,31	Сталь*	1320	1675	12,4	57,1
	5	1127	1330	14,1	58,0
	10	1200	1410	13,0	57,0
	15	1300	1510	12,4	55,1
	20	1330	1540	12,8	54,8
	30	1534	1684	11,7	48,8
0,36	Сталь*	1460	1780	11,1	48,6
	5	1262	1490	12,7	55,0
	10	1395	1615	12,1	53,6
	15	1445	1705	11,2	48,3
	20	1502	1805	10,6	47,3
	30	1607	1896	10,4	46,8

*Сталь толщиной 12 мм в конечном термообработанном состоянии

Как видно, наиболее низкие показатели прочностных свойств металла ЗТВ стали с содержанием углерода 0,31%, примерно на 15-20% ниже уровня прочности стали марки 71, соответствуют скорости охлаждения $5^{\circ}\text{C}/\text{с}$. С увеличением скорости охлаждения прочностные показатели возрастают 20-30%, а пластические свойства снижаются на 10-15%. Наиболее близкие показатели механических свойств металла ЗТВ и основного металла соответствуют скорости охлаждения при сварке на уровне $W_{6/5} = 20-30^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Подобные изменения прочностных и пластических свойств металла ЗТВ характерны и для стали с содержанием углерода 0,36%. Но с увеличением концентрации углерода показатели механических свойств металла ЗТВ приближаются к таковым для основного металла уже при скорости охлаждения $15^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Показатель твердости является одной из наиболее важной характеристикой механических свойств броневой стали, определяющей ее служебные свойства. Согласно требованиям (см. табл.2), твердость НВ броневой стали марки 71 в состоянии конечной термической обработки должна быть в пределах от 4760 до 5380 МПа. Исходя из рис.2 этим требованиям соответствует скорость охлаждения $20^{\circ}\text{C}/\text{с}$ и выше для стали с 0,31% углерода, а для стали с 0,36% - $10^{\circ}\text{C}/\text{с}$.

Параметры термического цикла дуговой сварки в металле ЗТВ соединений стали толщиной 12-16 мм, определенные экспериментально методами термического анализа [7], приведены в табл.4.

Таблица 4

Параметры термического цикла в металле ЗТВ при сварке металла толщиной 12-16 мм.

Погонная энергия сварки $Q_{\text{СВ}}$, кДж/см	Температура металла при сварке T , $^{\circ}\text{C}$	Скорость охлаждения $W_{6/5}$, $^{\circ}\text{C}/\text{с}$	Время охлаждения от 800 до 500°C , $\tau_{8/5}$, с	Время охлаждения от 800 до 100°C , $\tau_{8/1}$, с
8,6	20	25-30	8	170
	50	20-25	10	230
	70	15-20	11	250
	100	12-15	12	450
	150	8-10	14	760
	250	3-4	25	1050
11,5	20	15-17	14	210
	50	12-14	16	360
	100	6-8	20	850

Как видно, при сварке без предварительного подогрева и температуре металла 20°C на серийном режиме, на токах 160-180 А (погонная энергия 8,6 кДж/см), скорость охлаждения в ЗТВ соединений составляет $W_{6/5} = 25-30^{\circ}\text{C}/\text{с}$. При непрерывном способе сварке многопроходного соединения металл разогревается до температур 100-250 $^{\circ}\text{C}$. При этом скорость охлаждения в ЗТВ может снижаться до 3-4 $^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Учитывая выше приведенные результаты исследований структуры и механических свойств металла ЗТВ можно констатировать следующее. При многопроходной сварке на серийном режиме соединений броневой стали марки 71, содержание углерода в которой находится ближе к нижнему пределу легирования, необходимо чтобы температура металла была не выше 100 $^{\circ}\text{C}$. При изготовлении конструкций ЛБТ выполнить такие условия возможно с разбивкой порядка сварки соединений, когда она проходит поочередно на различ-

ных участках. А использование повышенного режима, сварочный ток 200-250 А (погонная энергия 11,5 кДж/см), возможно только при сварке однопроводных соединений. Следует также отметить, что применение предварительного подогрева при сварке данной стали не допустимо, т.к. это приведет к снижению прочностных свойств в зоне сварного соединения. Аналогичные условия необходимо соблюдать и при сварке соединений стали с содержанием углерода ближе к верхнему пределу легирования, но температура металла может быть выше и составлять до 150°C, а на повышенном режиме возможно выполнять и двухпроводные соединения. При этом будет соблюдено требование обеспечения механических свойств в металле ЗТВ соединений на уровне броневой стали повышенной прочности и твердости марки 71.

Выводы. 1 Установлено, что в диапазоне скоростей охлаждения 2,5...30°C/с превращение переохлажденного аустенита в металле ЗТВ соединений броневой стали марки 71 при дуговой сварке, независимо от содержания в ней углерода, происходит в области образования мартенситных структур.

2. На показатели механических свойств металла ЗТВ существенное влияние оказывают содержание углерода в стали и скорость охлаждения сварных соединений. Наиболее близкие показатели механических свойств металла ЗТВ и основного металла соответствуют скорости охлаждения при сварке на уровне $W_{6/5} = 10-30^\circ\text{C}/\text{с}$.

3. Показатели твердости металла ЗТВ сварных соединений стали марки 71 на уровне $HV = 4760-5380$ МПа могут быть достигнуты, когда режимы сварки обеспечивают скорости охлаждения $W_{6/5}$ не ниже 20°C/с в сталях с содержанием углерода 0,31%, и не ниже 15°C/с в сталях с содержанием углерода 0,36%.

4. При сварке броневой стали марки 71, содержание углерода в которой находится ближе к его нижнему пределу легирования, температура не должна превышать 100°C. Максимальная температура при сварке соединений стали, содержание углерода в которой ближе к верхнему пределу легирования, может быть выше и составлять до 150°C. При этом металл ЗТВ сварных соединений будет иметь высокую прочность и твердость.

Литература: 1. Специальные стали / Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. // М.: Металлургия. – 1985. – 408 с. 2. Грабин В.Ф., Денисенко А.В. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей. – К.: Наукова думка, 1978. – 272с. 3. Структурные превращения в ЗТВ и сопротивляемость сварных соединений высокопрочных мартенситных сталей замедленному разрушению / В.Ф.Мусяченко, В.Г.Гордонный, Ю.М.Лебедев и др.// Автоматическая сварка. – 1992. - №4. –С. 4. 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 др. // Автоматическая сварка. – 2015. – №2. – С. 8-15. 5. ТУ У 27.1-14313056-001-2009. Листы стальные специального назначения из марок 71 и 92. Технические условия. 6. Григоренко Г.М., Костин В.А., Орловский В.Ю. Современные возможности моделирования превращения аустенита в сварных швах низколегированных сталей // Автомат. сварка. – 2008. – №3. – С. 31-34. 7. Гайворонский А.А. Сопротивляемость образованию холодных трещин металла ЗТВ сварного соединения высокопрочных углеродистых сталей // Автоматическая сварка. – 2014. – №2. – С.3-12.

Bibliography (transliterated): 1. Special'nye stali / Gol'dshtejn M.I., Grachev S.V., Veksler YU.G. // M.: Metallurgiya. – 1985. – 408 s. 2. Grabin V.F., Denisenko A.V. Metallovedenie svarki nizko- i srednelegirovannyh stalej. – K.: Naukova dumka, 1978. – 272s. 3. Strukturnye prevrashcheniya v ZTV i soprotivlyaemost' svarnykh soedinenij vysokoprochnykh martensitnykh stalej zamedlennomu razrusheniyu / V.F.Musiyachenko, V.G.Gordonnyj, YU.M.Lebedev i dr.// Avtomaticheskaya svarka. – 1992. - №4. –С. 4. Vliyanie termicheskogo cikla svarki na strukturno-fazovye prevrashcheniya i svojstva metalla ZTV sredneuglerodistoj legirovannoj stali tipa 30H2N2MF /

V.D.Poznyakov, V.A.Kostin, A.A.Gajvoronskij i dr. // Avtomaticheskaya svarka. – 2015. – №2. – S. 8-15. 5. TU U 27.1-14313056-001-2009. Listy stal'nye special'nogo naznacheniya iz marok 71 i 92. Tekhnicheskie usloviya. 6. Grigorenko G.M., Kostin V.A., Orlovskij V.YU. Sovremennye vozmozhnosti modelirovaniya prevrashcheniya austenita v svarnyh shvah nizkolegirovannyh stalej // Avtomat. svarka. – 2008. – №3. – S. 31-34. 7. Gajvoronskij A.A. Soprotivlyaemost' obrazovaniyu holodnyh treshchin metalla ZTV svarnogo soedineniya vysokoprochnyh uglerodistyh stalej // Avtomaticheskaya svarka. – 2014. – №2. – S.3-12.

Позняков В.Д., Гайворонский А.А., Костин В.А., Дураченко В.В., Костин Ю.Н.
ОСОБЕННОСТИ ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА И МЕХАНИЧЕСКИЕ
СВОЙСТВА МЕТАЛЛА В ЗОНЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ СОЕДИНЕНИЙ
БРОНЕВОЙ СТАЛИ МАРКИ 71 ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Установлены особенности формирования структуры и механических свойств в металле зоны термического влияния сварных соединений в зависимости от содержания углерода в броневой стали марки 71. Установлено, что распад переохлажденного аустенита в металле ЗТВ соединений при сварке, не зависимо от содержания углерода в стали, происходит в области образования закалочных мартенситных структур. Показатели механических свойств и твердости металла ЗТВ соединений могут быть достигнуты на уровне требований к стали марки 71 при условиях сварки, когда скорость охлаждения не ниже 20°С/с в сталях с содержанием углерод 0,31%, и не ниже 15°С/с в сталях с содержанием углерода 0,36%.

Позняков В.Д., Гайворонский О.А., Костин В.А., Дураченко В.В., Костин Ю.М.
ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕТВОРЕННЯ АУСТЕНІТУ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
МЕТАЛУ В ЗОНІ ТЕРМІЧНОГО ВПЛИВУ З'ЄДНАНЬ БРОНЬОВАНОЇ СТАЛІ
МАРКИ 71 ПРИ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

Встановлено особливості формування структури і механічних властивостей в металі зони термічного впливу зварних з'єднань в залежності від вмісту вуглецю в броньовій сталі марки 71. Встановлено, що розпад переохолодженого аустеніту в металі ЗТВ з'єднань при зварюванні, не залежно від вмісту вуглецю в сталі, відбувається з утворенням гартівних мартенситних структур. Показники механічних властивостей і твердості металу ЗТВ з'єднань можуть бути досягнуті на рівні вимог до сталі марки 71 за умов зварювання, коли швидкість охолодження не нижче 20°С/с в сталі з вмістом вуглець 0,31%, і не нижче 15°С/с в сталі з вмістом вуглецю 0,36%.

V. Poznyakov, A. Gajvoronskij, V. Kostin, V. Durachenko, Yu. Kostin
FEATURES OF AUSTENITE TRANSFORMATION AND MECHANICAL METAL
PROPERTIES IN THE AREA OF THERMAL INFLUENCE OF BRONT STEEL
CONNECTIONS OF MARK 71 AT ARC WELDING

Specific features of the formation of the structure and mechanical properties in the metal of the zone of thermal influence of welded joints depending on the carbon content in the armored steel of grade 71. It is established that the decay of super cooled austenite in the metal of the HAZ compounds during welding, regardless of the carbon content in the steel, occurs in the field of formation Quenching martensitic structures. The parameters of the mechanical properties and hardness of the metal of the HAZ compounds can be achieved at the level of the requirements for the steel of grade 71 under welding conditions when the cooling rate is not lower than 20°С/s in steels with a carbon content of 0.31% and not lower than 15° C s in steels with a carbon content of 0.36%.