

УДК 669-1:51-74:519.257

Структура та властивості металу зони термічного впливу зварних з'єднань високоміцних спеціальних сталей

Г. М. Григоренко, академік НАН України

Т. О. Зубер

В. А. Костін, доктор технічних наук

В. Д. Позняков, член-кореспондент НАН України

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

Побудовано термодинамічні діаграми розпаду аустеніту і встановлено вплив швидкості охолодження зразків-імітаторів металу зони термічного впливу на структуру та характеристики міцності високоміцних сталей. Встановлено закономірності впливу вуглецю на структуроутворення в металі ЗТВ сталей Quardian 500 і Armstal 500. Показано, що для сталі Quardian 500 з вмістом вуглецю 0,26 % формується в зоні перегріву переважно мартенситна структура з твердістю 4850 – 4890 МПа при охолодженні в діапазоні швидкостей (V_{ox}) від 20 до 30 °C/с, в той час як для сталі Armstal 500 з більшим вмістом вуглецю 0,29 %, перетворення переохолодженого аустеніту в металі зразків-імітаторів відбувається вже при швидкостях охолодження 7 – 30 °C/с з формуванням мартенситної структури з вищим рівнем твердості 5160 – 5390 МПа, що забезпечує підвищення статичної міцності виробів.

Відомо, що механічні властивості металу зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань визначаються його структурним станом. На формування структури в ЗТВ впливає не тільки хімічний склад сталі та її початковий структурний стан, але й термічний режим нагріву та охолодження металу при дуговому зварюванні, який суттєво відрізняється від умов звичайної термічної обробки [1, 2].

Насьогодні при виготовленні зварних конструкцій легкої броньованої техніки (ЛБТ) широко застосовуються сталі високої міцності і твердості ($HV \geq 4400$ МПа). Сталі відносяться до класу високоміцних сталей системи легування Cr – Ni – Mn – Mo – V, в яких вміст вуглецю становить понад 0,25 %. Високих показників міцності і твердості броньові сталі набувають в результаті гартування і низького відпустку. Розробка та впровадження новітніх броньових сталей для сучасної бойової техніки повинна забезпечити цілий комплекс вимог. Вони повинні забезпечити високу міцність, опір удару, підвищену в'язкість руйнування, надійність, здатність до відновлювання та ремонту, бути добре зварювальними, мати опір впливу нових типів боеприпасів (бронебійних, кумулятивних, вакуумних та ін.) за відносно низької маси матеріалу [3].

Структура і фізико-механічні властивості

В світі розроблено достатню кількість броньових сталей з твердістю HB 500, зокрема марок 71 (Україна), Armoх 500 (Швеція), Quardion 500 (Бельгія), Armstal 500 (Польща), Ramor 500 (Фінляндія), MARS 270 (Франція), тощо. Зазначені сталі мають не тільки високу твердість, а й задовольняють іншим вимогам щодо броньових сталей, які забезпечуються як за рахунок відповідного легування сталей, так і за рахунок певного їх термічного оброблення при виготовленні прокату.

Структура, а відповідно і механічні властивості сталей, суттєво змінюються в процесі зварювання, внаслідок нагріву та охолодження металу, зварювальною дугою. З врахуванням цього в роботі [4] вивчали вплив термічних циклів зварювання на фазово – структурні перетворення в металі ЗТВ зварних з'єднань вітчизняної спеціальної легованої сталі типу 30X2H2MФ з різним вмістом вуглецю (0,31 та 0,36 %), шляхом побудови термокінетичних діаграм перетворення аустеніту.

Метою даної роботи було побудувати термокінетичні діаграми розпаду аустеніту, визначити температури фазових перетворень та встановити вплив термічного циклу зварювання, швидкостей охолодження на структуру та механічні властивості зварних з'єднань сталей Quardion 500 і Armstal 500 (табл. 1, 2).

Таблиця 1

Хімічний склад сталей

Сталь	Масова частка елементів, %													P _{CM} , %
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Al	Ti	S	P	B	
Quardion 500 Бельгія	0,26	0,21	0,78	0,42	0,74	0,27	0,023	0,001	0,033	0,004	0,006	0,012	0,001	0,48
ARMSTAL 500 Польща	0,29	0,24	0,89	0,74	1,03	0,23	0,09	0,06	0,019	0,037	0,005	0,009	0,002	0,50

Таблиця 2

Механічні властивості сталей

Сталь	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	ψ , %	KCU-40, Дж/см ²	HB, МПа
Quardion 500 Бельгія	1450	1250	≥ 10	≥ 16	20	350-450
ARMSTAL 500 Польща	1620	1516	≥ 8	≥ 18	24	470-540

Сталі мають вміст вуглецю більше 0,25 % (0,26 та 0,29 %), який істотно впливає на утворення гартівних структур в металі ЗТВ та, як наслідок, може призводити до утворення холодних тріщин. Якщо говорити про відмінності сталей Quardion 500 і Armstal 500, то в першу чергу це різниця вмісту таких легуючих елементів, як хром (0,42 та 0,74 %) та ванадій (0,001 та 0,06 %), які розширюють α -область, а нікель (0,74 та 1,03 %) розширює γ -область, тобто змінюють температури A_{c3} і A_{c4} . Алюміній (0,033 та 0,019 %) нікель, кремній (0,21 та 0,24 %), мідь (0,023 та 0,09 %), як некарбідотворюючі елементи принципово не змінюють вигляд С-подібної кривої ізотермічного перетворення аустеніту, лише зміщує її по температурі

Структура і фізико-механічні властивості

перетворення і підвищує стійкість аустеніту, зміщуючи лінії діаграми праворуч. А титан (0,037 та 0,004 %), хром, ванадій та молібден (0,27 та 0,23 %), як карбідоутворюючі елементи також вносять зміни в кінетику ізотермічного перетворення, за різних температур вони по різному впливають на швидкість розпаду аустеніту, обумовлюючи чіткий поділ перлітного і бейнітного перетворення з появою області підвищеної стійкості аустеніту між ними. Вміст вуглецю та основних легуючих елементів знаходяться в достатньо жорстких межах щодо впливу на формування структури та механічних властивостей металу ЗТВ зварних з'єднань високоміцних спеціальних сталей.

Тому було проведено, близьке до реальних умов зварювання, моделювання термічного циклу зварювання (ТЦЗ) та дилатометричні дослідження на установці Gleeble 3800 [5]. Характер зміни структури зразків, що імітували охолодження металу у ЗТВ вивчали на ділянці максимального нагріву (ділянці крупного зерна) металу ЗТВ цих сталей. Зразки-імітатори металу ЗТВ досліджено методами металографічного та дюрOMETричного аналізів за стандартними методиками. Для визначення впливу кінетики розпаду аустеніту на структуру та властивості сталей проведено імітацію ТЦЗ на установці Gleeble 3800 дослідних зразків, охолоджених із заданими швидкостями в діапазоні 1 – 30 °С/с та побудовано термокінетичні діаграми перетворення аустеніту цих сталей (рис. 1).

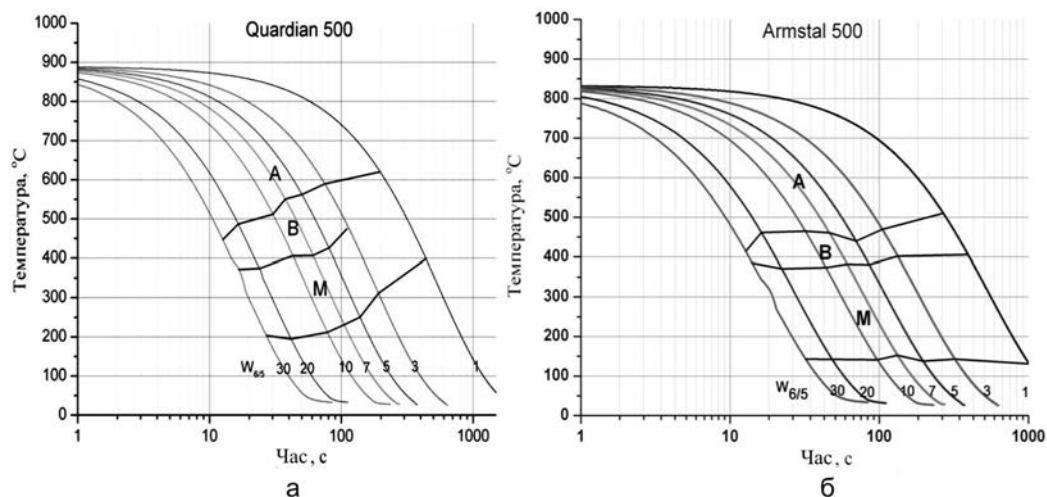


Рис. 1. Термокінетичні діаграми перетворення аустеніту сталей Guardian 500 (а) та Armstal 500 (б).

Встановлено, що температури фазових перетворень у дослідних сталях значно відрізняються. Максимальна температура розпаду аустеніту в сталі Guardian 500 спостерігається при швидкості охолодження 1 °С/с та становить 620 °С, тоді як у сталі Armstal 500 при цій швидкості охолодження ця температура нижча майже на 100 °С. Мінімальна температура розпаду аустеніту для сталі Guardian 500 складає 200 °С, тоді як для сталі Armstal 500 – 150 °С і майже не залежить від швидкості охолодження (рис. 1 б). Тобто у сталі марки Armstal 500 у металі ЗТВ в процесі зварювання повинні формуватися значно більш гартівні структурні складові.

Структура вихідного металу (ВМ) сталей має суттєві відмінності: структура ВМ сталі Quardian 500 складається із суміші голчастого фериту (HV1 2210 – 2280 МПа) та сорбіту (HV1 2560 – 3090 МПа) зі слідами прокатування, а структура Armstal 500 складається з суміші сорбіту (HV1 2990 – 3190 МПа) та троститу (HV1 3480 – 4010 МПа) (рис. 2 а, б). Тому загальна твердість ВМ сталі Quardian 500 та Armstal 500 теж відрізняється та становить 2600 – 2720 та 2970 – 4210 МПа. Отже сталь Armstal 500 (з більшим вмістом вуглецю – 0,29 %) має вищу твердість ВМ.

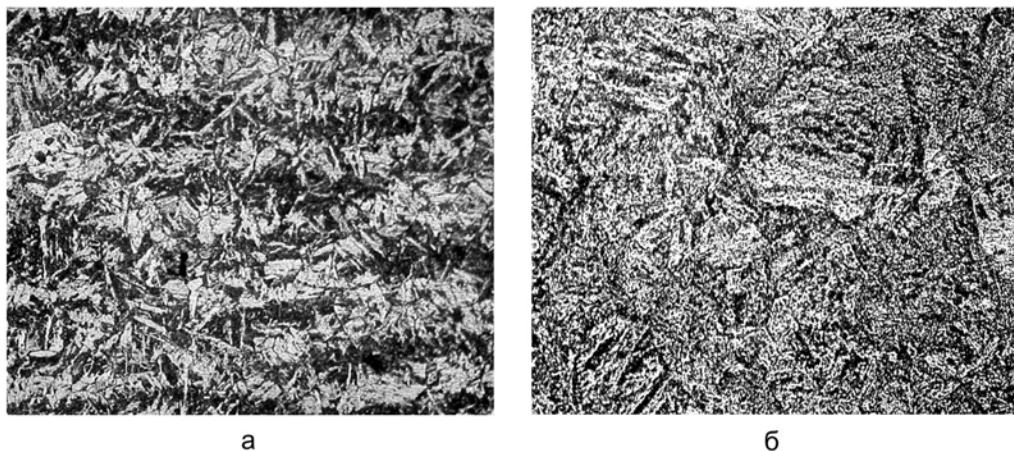


Рис. 2. Мікроструктура вихідного металу високоміцних сталей. а – Quardian 500, б – Armstal 500, x100.

Неметалеві включення в сталі Quardian 500 та Armstal 500 одного типу – точкові оксиди та карбонітриди 1 балу згідно з ДСТУ. Різниця полягає в тому, що в сталі Quardian 500 зустрічаються силікати неправильної форми, з 2 – 3 балом забрудненості, а в сталі Armstal 500 зустрічаються поодинокі сульфіди, що не підлягають оцінюванню згідно ДСТУ.

З метою підтвердження результатів структурного моделювання на Gleeble 3800 було досліджено реальну структуру сталей. В структурі зразка – імітатора сталі Quardian 500, охолодженого зі швидкістю 1 °С/с, спостерігається структура сорбіту (2070 – 2280 МПа) з окремими зернами мартенситу з твердістю 3480 – 3660 МПа, а також ділянки зі структурою голчастого фериту (1810 – 1850 МПа), що складає основну фазу (рис. 3 а). А в зразку сталі Armstal 500, охолодженого з такою ж швидкістю (1 °С/с) (рис. 3 б), спостерігається переважно бейнітна структура (3600 – 4420 МПа) з окремими ділянками мартенситу (5140 – 5420 МПа).

При швидкостях охолодження 5 °С/с і вище в сталі Quardian 500 формується бейнітно-мартенситна структура (рис. 3 в). Мікротвердість структурних складових становить: бейніту 3510 – 3970 МПа, а мартенситу – 4280 – 4580 МПа. Слід зауважити, що при збільшенні швидкості охолодження, кількість мартенситної складової зростає, що позначається на загальній твердості (HV10 3790 – 4210 МПа). А структура зразка сталі Armstal 500, який охолоджено зі швидкістю 5 °С/с (рис. 3 г), складається з

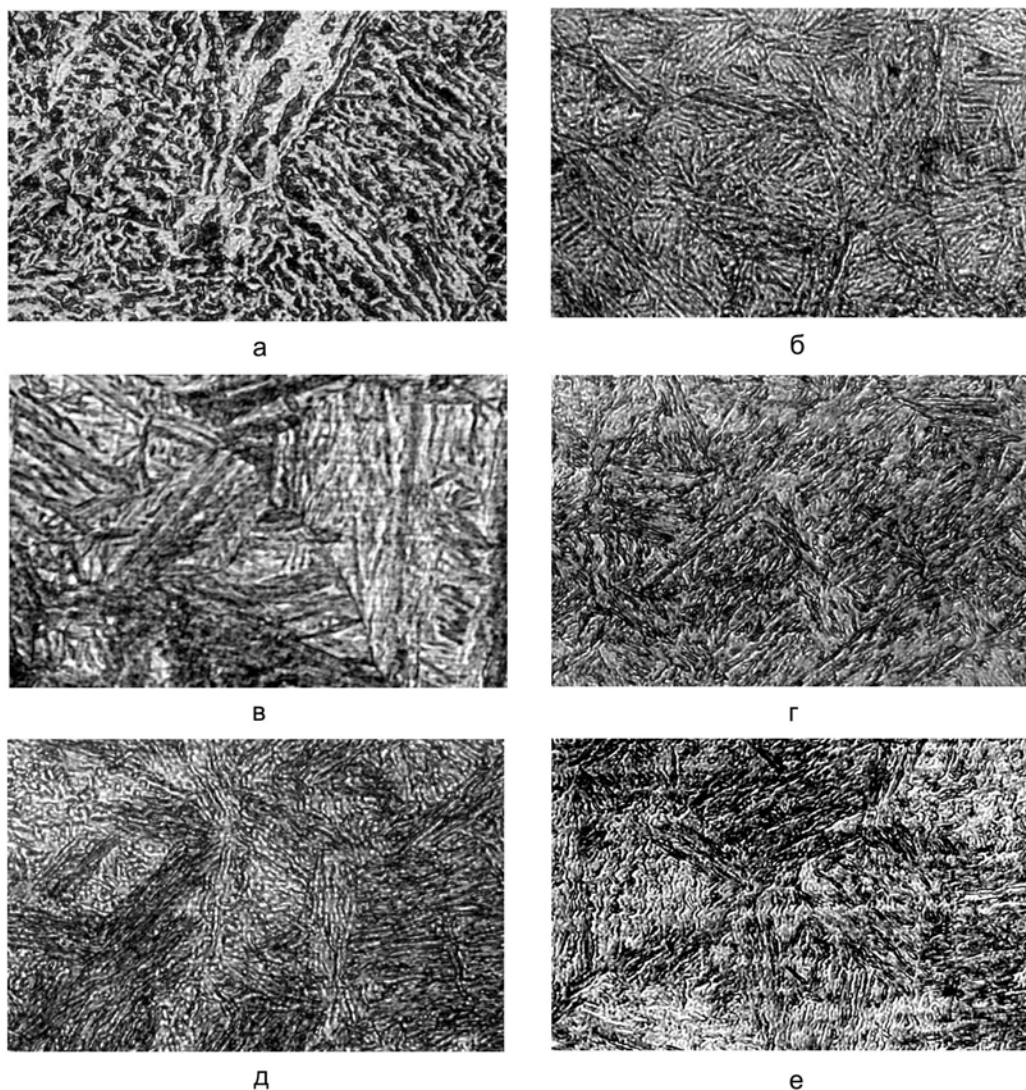


Рис. 3. Структура металу 3ТВ сталей Guardian 500 (а, в, д) та Armstal 500 (б, г, е) при охолодженні зі швидкостями (V_{ox}): а, б – 1 °C/c; в, г – 5 °C/c; д, е – 20 °C/c. x500.

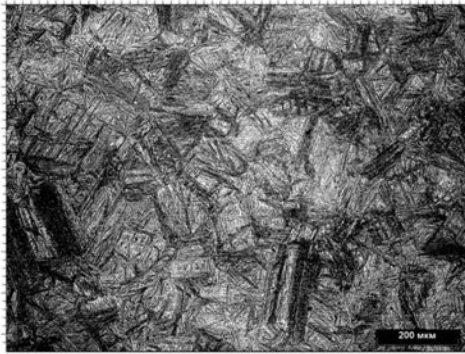
бейнітних пакетів (HV10 4550 – 5420 МПа) різної орієнтації та голчастого мартенситу (HV10 5480 – 6270 МПа). Загальна твердість в межах 5080 – 5590 МПа.

При подальшому збільшенні швидкості охолодження до 20 °C/c і вище в зразку сталі Guardian 500 формується мартенситна структура з твердістю 4780 – 4970 МПа (рис. 3 д), причому зі збільшенням V_{ox} до 30 °C/c зростає щільність упакування пакетів темно травленого (4640 МПа) та світло травленого мартенситу (5350 МПа). Загальна твердість структури становить 4800 – 4980 МПа. В той час, як в зразках сталі Armstal 500 при зростанні швидкості охолодження до 20 °C/c і вище (рис. 3 з) утворюється щільні рівномірні пакети мартенситної структури з твердістю 5080 – 5590 МПа. Через смугастість структури спостерігається світло травлений (5360 –

Структура і фізико-механічні властивості

6130 МПа) та темно травлений мартенсит (5600 – 5850 МПа). Загальна твердість складає 4530 – 5510 МПа.

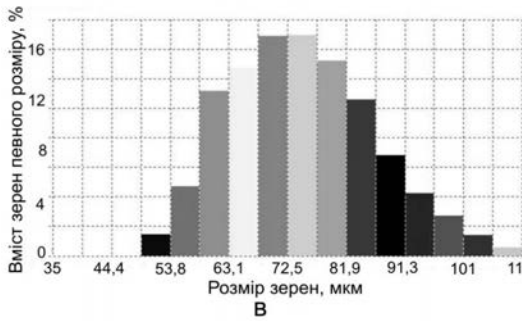
За допомогою прикладного пакету аналізу зображень Thixomet Pro було визначено розподіл зерен за розміром у зварних зразках сталей Quardian 500 та Armstal 500 (рис. 4). Встановлено, що майже при всіх швидкостях охолодження (крім швидкості 1 °С/с) розмір структурних складових у металі ЗТВ сталі Armstal 500 нижчий на 10 – 20 %, ніж у металі ЗТВ сталі Quardian.500. Це зумовлює більш високі механічні властивості (твердість, міцність) металу ЗТВ сталі Armstal 500 (рис. 5).



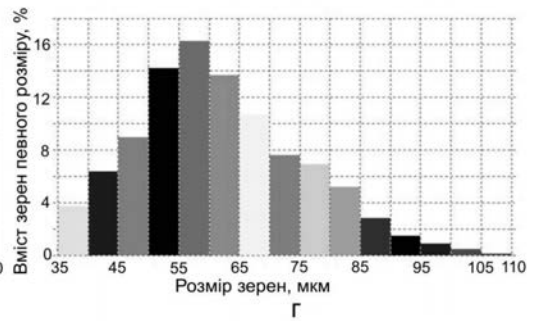
а



б



в



г

Рис. 4. Розподіл зерен у металі ЗТВ зразків сталі Quardian 500 (а, в) та Armstal 500 (б, г). а, б – мікроструктура; в, г – гістограма розподілу за розміром.

Результати досліджень впливу швидкості охолодження на твердість металу ЗТВ високоміцних сталей показали, що для сталі Armstal 500 зі збільшенням швидкості охолодження від 1 до 5 °С/с твердість зростає від 4480 до 5420 МПа, а при збільшенні швидкості охолодження до 30 °С/с твердість майже не змінюється 5420 – 5160 МПа. Для сталі Quardian 500 з підвищенням швидкості охолодження від 1 до 30 °С/с мікротвердість металу ЗТВ

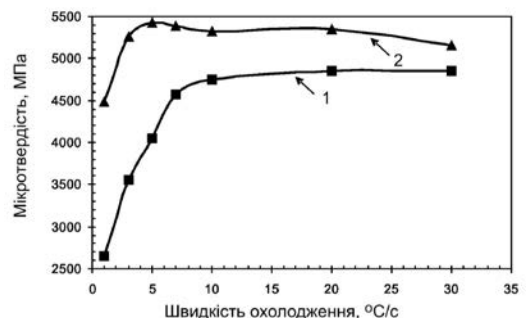


Рис. 5. Залежність мікротвердості металу ЗТВ зразків-імітаторів сталі Quardian 500 (1) та Armstal 500 (2) від швидкості охолодження.

на ділянці перегріву поступово зростає (2650 – 4850 МПа), що забезпечує підвищення статичної міцності.

Аналіз отриманих результатів щодо впливу швидкості охолодження на твердість металу ЗТВ спеціальних сталей показав, що зростання твердості зумовлено зміною мікроструктури у напрямку $\Phi \rightarrow \text{Б} \rightarrow \text{М}$, а зниження – формуванням структур відпалу.

Для сталі Quardian 500 з вмістом вуглецю 0,26 % перетворення переохолодженого аустеніту в металі ЗТВ зразків-імітаторів відбувається в мартенситній області при швидкостях охолодження вище 20 – 30 °С/с, в той час як невелика кількість верхнього та нижнього бейніту (з твердістю 3550 – 4640 МПа) утворюється при низьких швидкостях охолодження до 10 °С/с. Разом з тим зростає твердість мартенситу від 4780 (темнотравлених) до 4980 МПа (світлотравлених).

Збільшення вмісту вуглецю до 0,29 % (сталь Armstal 500) призводить до того, що перетворення переохолодженого аустеніту в металі ЗТВ зразків-імітаторів з формуванням мартенситної області відбувається вже в діапазоні швидкостей охолодження 7 – 30 °С/с з вищим рівнем твердості 5160 – 5390 МПа.

Література

1. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. – М.: Металлургия. – 1985. – 408 с.
2. Грабин В.Ф., Денисенко А.В. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей. – К.: Наукова думка, 1978. – 272 с.
3. ТУ У 27.1-14313056-001-2009. Листы стальные специального назначения из марок стали 71 и 92. Технические условия.
4. Valery A. Kostin, Valery D. Poznyakov, Alexander A. Gajvoronsky. Influence of arc welding conditions on kinetics of phase transformation in HAZ weldment of structural alloyed steels // Shipbuilding and Marine Infrastructure. – 2015. – № 1 (3). – P. 87 – 101.
5. 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.

Reference

1. Goldshtejn M.I., Grachev S.V., Veksler YU.G. Specialnye stali (*Special steels*), Moskva: Metallurgiya, 1985, 408 p. [in Russian].
2. Grabin V.F., Denisenko A.V. Metallovedenie svarki nizko- i srednelegirovannyh stalej (*Metallurgy of welding low- and medium-alloyed steels*), Kiev: Naukova dumka, 1978, 272 p. [in Russian].
3. TU U 27.1-14313056-001-2009. Listy stalnye special'nogo naznacheniya iz marok 71 i 92. Tekhnicheskie usloviya (Sheets steel special purpose from brands 71 and 92. Technical specifications).
4. Valery A. Kostin, Valery D. Poznyakov, Alexander A. Gajvoronsky, Shipbuilding and Marine Infrastructure, 2015, No 1 (3), pp. 87 – 101 [in English].

Одержано 10.08.18

Г. М. Григоренко, Т. А. Зубер, В. А. Костин, В. Д. Позняков

Структура и свойства металла зоны термического влияния сварных соединений высокопрочных специальных сталей

Резюме

Построены термокинетические диаграммы распада аустенита и установлено влияние скорости охлаждения образцов-имитаторов металла ЗТВ на структуру и свойства высокопрочных сталей. Установлены закономерности влияния содержания углерода на структурообразование в металле ЗТВ сталей Quardian 500 и Armstal 500 и оценена их склонность к хрупкому разрушению. Проведенный комплекс исследований показал, что для высокопрочной стали Quardian 500 с содержанием углерода 0,26 % приводит к образованию в зоне перегрева преимущественно мартенситной структуры с твердостью 485 – 4890 МПа при охлаждении в диапазоне скоростей от 20 до 30 °С/с, в то время, как для стали Armstal 500 с большим содержанием углерода 0,29 %, преобразование переохлажденного аустенита в металле ЗТВ образцов-имитаторов происходит уже при скоростях охлаждения 7 – 30 °С/с с образованием мартенситной структуры с более высоким уровнем твердости 5160 – 5390 МПа.

G. M. Grigorenko, T. A. Zuber, V. A. Kostin, V. D. Poznyakov

Structure and properties of the heat effected zone of welded joints of special high – strength steels

Summary

The built in thermokinetic diagrams of austenite decomposition are established and the influence of the cooling rate of samples of the HAZ metal imitators on the structure and strength properties of high-strength steels Quardian 500 and Armstal 500 is established. For Quardian 500 and Armstal 500 steels, the regularities of the influence of carbon content on the structure formation in the HAZ metal steel have been established and the propensity to brittle failure has been estimated. The conducted complex of studies showed that for high-strength Quardian 500 steel with a carbon content of 0.26 %, cooling in the V_{ox} range from 20 to 30 °C/c leads to the formation in the over-heating zone of a predominantly martensitic structure and an increase in hardness from 4850 to 4890 MPa, which provides an increase in static strength. At that time, as for steel Armstal 500 with a heavier carbon content 0.29 %, cooling in the V_{ox} range from 7 to 30 °C/c leads to the formation in the over-heating zone of a predominantly martensitic structure and an increase in hardness from 5160 to 5390 MPa.