

# Технологія машинобудування

УДК 621.79:669.15

Гайворонский А.А., Позняков В.Д., Клапатюк А.В., Денисенко А.М., Дураченко В.В., Костин Ю.Н.

## ОБРАЗОВАНИЕ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ БРОНЕВЫХ СТАЛЕЙ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ И ТВЕРДОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**Постановка проблемы.** Одним из главных факторов при выборе броневой стали для изготовления конструкций ЛБТ, наряду с комплексом механических и специальных свойств, является её свариваемость. Под свариваемостью понимают возможность получения качественных бездефектных соединений, которые удовлетворяют требуемым технологическим и эксплуатационным свойствам конструкции. Применительно к броневым сталям проблема получения бездефектных сварных соединений связана, в первую очередь, с предотвращением образования холодных трещин [1-3].

**Анализ последних достижений и публикаций.** Известно, что образование холодных трещин зависит от структурно-фазового состояния металла зоны термического влияния (ЗТВ), содержания диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле и уровня напряжений в сварных соединениях. При этом склонность сварных соединений к образованию трещин увеличивается с повышением содержания углерода в стали. Механизм зарождения и развития холодных трещин в сварных соединениях носит замедленный характер. Обычно для его объяснения используют классическую модель Зинера-Стро, согласно которой зарождение микротрещин в закаленной структуре металла происходит на границах зерен в местах скопления дислокаций. Дальнейшее развитие трещины идет как по границам, так и по телу зерен, в зависимости от состояния структуры металла и уровня напряжений. Водород, которым насыщается металл ЗТВ в процессе сварки, способствует охрупчиванию структуры и процесс разрушения протекает более интенсивно [4-6].

Броневые стали высокой прочности и твердости (табл.1), которые применяются при изготовлении сварных конструкций ЛБТ, по своему классу относятся к высокопрочным среднеуглеродистым легированным сталям.

Таблица 1

Марка броневой стали	Массовая доля элементов, %							P <sub>см</sub> , %
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	B	
71 (ТУУ 27.1-14313056-001-2009)	0,29-0,36	1,20-1,50	0,60-1,0	1,50-2,0	2,0-2,40	0,45-0,55	-	0,52-0,69
ARMSTAL 500	0,32	0,50	1,20	0,90	1,10	0,30	0,003	0,50
ARMOX 500S	0,32	0,40	1,20	1,0	1,80	0,70	0,005	0,57
HB 500 MOD	0,30	0,80	1,60	1,0	1,0	0,50	0,005	0,53
PROTECTION 500	0,30	0,70	1,70	1,50	0,80	0,50	0,004	0,55

Примечания: 1. Для зарубежных сталей приведено максимальное содержание легирующих элементов согласно прайс-листам предприятий-изготовителей.

2. В стали марки 71 содержание V = 0,18-0,25%, в остальных – не регламентировано.

3. В стали марки 71 содержание S ≤ 0,003% и P ≤ 0,012%, ARMSTAL 500 и ARMOX 500S - не регламентировано, HB 500 MOD - соответственно ≤ 0,010 и 0,025%, PROTECTION 500 - соответственно ≤ 0,015 и 0,030%.

© А.А. Гайворонский, 2017

Уровень легирования броневых сталей, при содержании углерода более 0,29%, обуславливает повышенную склонность сварных соединений к образованию холодных трещин в металле ЗТВ. Свариваемость сталей можно предварительно оценить расчетным методом по показателю  $R_{CM}$ . Согласно рекомендациям Международного института сварки (документ DOC IIW IX-1157-80) при  $R_{CM} \geq 0,30\%$  сталь является трудно свариваемой, и при сварке соединений необходимо применять предварительный подогрев до температур 100°C и выше [7].

Как видно, для всех броневых сталей показатель  $R_{CM} \geq 50\%$ , и вероятность образования холодных трещин в металле ЗТВ соединений очень высока. Решению этой проблемы может способствовать предварительный подогрев соединений или другие технологические методы, обеспечивающие получение бездефектных сварных соединений.

**Цель настоящей работы** является в сравнительной оценке склонности соединений броневых сталей высокой прочности и твердости к образованию холодных трещин, и разработке технологических рекомендаций по дуговой сварке, обеспечивающие получение высококачественных соединений при изготовлении ЛБТ.

**Материал и методика исследования.** В качестве материала для исследований использовали броневые стали высокой прочности и твердости, химический состав которых приведен в табл.2.

*Таблица 2*

Марка броневой стали	Массовая доля элементов, %							$R_{CM}$ , %
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	B	
71	0,31	1,16	0,74	1,66	2,26	0,30	-	0,55
ARMSTAL 500	0,29	0,24	0,89	0,74	1,03	0,23	0,002	0,43
HB 500 MOD	0,26	0,21	0,78	0,42	0,74	0,27	0,001	0,36
PROTECTION 500	0,28	0,49	0,96	0,58	0,37	0,25	0,002	0,41

Примечания: 1. В стали марки 71 содержание V = 0,20%, S = 0,010%, P = 0,016%.

2. В стали зарубежных сталей - V ≤ 0,06%, S ≤ 0,010%, P ≤ 0,016%.

Как видно, количественное содержание основных легирующих элементов в зарубежных броневых сталях отличается от отечественной броневой стали марки 71. Содержание кремния, хрома и никеля более чем в 2 раза ниже. Содержание бора, который вводится в сталь для обеспечения ее высокого уровня прочности и твердости, в сталях HB 500 MOD и PROTECTION 500 существенно ниже задекларированного. Отмеченные особенности легирования могут сказаться на изменении структуры и показателях твердости металла ЗТВ соединений данных броневых сталей.

Для оценки стойкости сварных соединений образованию холодных трещин использовали метод дугой сварки жестких проб в соответствии с Приложением 2 ОСТ ВЗ-15.010-85 [8]. Сварку контрольных соединений выполняли механизированным способом в среде защитных газов (82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>) с использованием полуавтомата типа «Патон БП-601» и источника питания постоянного тока типа ВДУ-506. Использовали проволоки марок Св-10ГСМТ и Св-08Х20Н9Г7Т диаметром 1,2 мм, сварку которыми выполняли на режиме: сварочный ток 160-180 А, напряжение на дуге 26-28 В, скорость сварки 12-15 м/ч. В процессе охлаждения сварных соединений применяли метод акустической эмиссии для фиксации момента зарождения и развития холодных трещин [9]. После сварки пробы выдерживали в течении 3-х суток, после чего вырезали шлифы для визуального контроля на наличие трещин в соединениях. В дальнейшем на

шлифах выполняли замеры твердости в сварных соединениях. Для этого применяли твердомер типа ТК, единицы измерения HRC с последующим переводом в HB с использованием переводных таблиц [10].

**Основная часть (анализ результатов исследований).** Обобщенные результаты испытаний технологических проб приведены в табл.3, а на рис.1-3 характерные макрошлифы соединений.

Таблица 3

Наличие холодных трещин (ХТ) в сварных соединениях броневых сталей

Марка броневой стали	Способ сварки					
	Св-10ГСМТ					Св-08Х20Н9Г7Т, T <sub>0</sub> =20°C
	T <sub>0</sub> =20°C	100°C	150°C	200°C	300°C	
71 (δ = 6-20 мм)	ХТ	ХТ	ХТ	ХТ	Нет	Нет
ARMSTAL 500 (10, 12)	ХТ	ХТ	ХТ	Нет	-	Нет
HB 500 MOD (10, 12)	ХТ	Нет	-	-	-	Нет
PROTECTION 500 (10, 12)	ХТ	ХТ	Нет	-	-	Нет

Примечание: T<sub>0</sub> – температура предварительного подогрева при сварке.

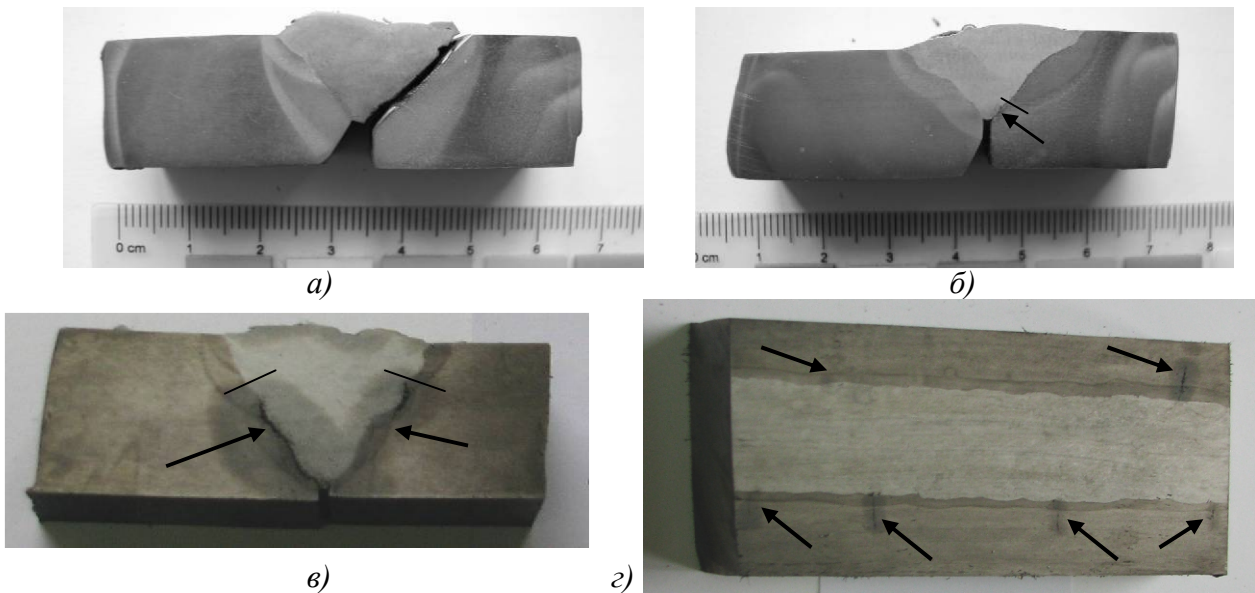


Рис.1. Продольные (а-в) и поперечные (г) холодные трещины в сварных соединениях стали марки 71 при сварке проволокой Св-10ГСМТ: а) толщина металла δ = 12 мм, сварка без предварительного подогрева (T<sub>0</sub> = 20°C); б) 12 мм, T<sub>0</sub> = 150°C; в) и г) 20 мм, T<sub>0</sub> = 20°C

Установлено, при сварке проволокой Св-10ГСМТ в соединениях стали марки 71 ХТ образуются практически в процессе сварки, когда она выполняется без предварительного подогрева, или в течении 0,5 часа при сварке с предварительным подогревом при T<sub>0</sub> = 150°C. При сварке соединений толщиной δ = 6-12 мм трещины, как правило, сквозные, а при 16-20 мм – поражают до 80% сечения не выходя на поверхность металла. При этом образуются как продольные (рис.1, а-в), так и поперечные ХТ (рис.1, б). Избежать образования ХТ при данном варианте сварки соединений стали марки 71 возможно лишь при применении предварительного подогрева до температур 280-300°C. Но при таких условиях нагрева, как показали предыдущие исследования, существенно снижается скорость охлаждения сварного соединения и резко падают показате-

тели прочности и твердости металла в ЗТВ. При этом также надо учитывать, что для того чтобы выполнить предварительный подогрев, необходимо прогреть металл на расстоянии до 100 мм на сторону от сварного соединения, а это негативно повлияет на изменение служебных свойств бронезащиты не только в металле ЗТВ, но уже и на значительном расстоянии от него.

Другим, более технологичным способом, позволяющим избежать образования ХТ в сварных соединениях броневой стали марки 71, есть применение высоколегированной сварочной проволоки марки Св-08Х20Н9Г7Т. При этом сварка соединений выполняется без предварительного подогрева (табл.3).

Аналогичные результаты были получены и при сварке технологических проб проволокой Св-10ГСМТ, контрольные соединения которых были изготовлены из зарубежных броневых сталей высокой прочности и твердости (табл.3, рис.2). Отличие состоит в величине температуры предварительного подогрева, которая позволила получить сварные соединения без ХТ. Самая низкая температура предварительного подогрева, на уровне 100°C, характерна для сварных соединений стали марки НВ 500 MOD, для соединений стали PROTECTION 500 она выше и составляет 150°C, стали ARMSTAL 500 - 200°C.

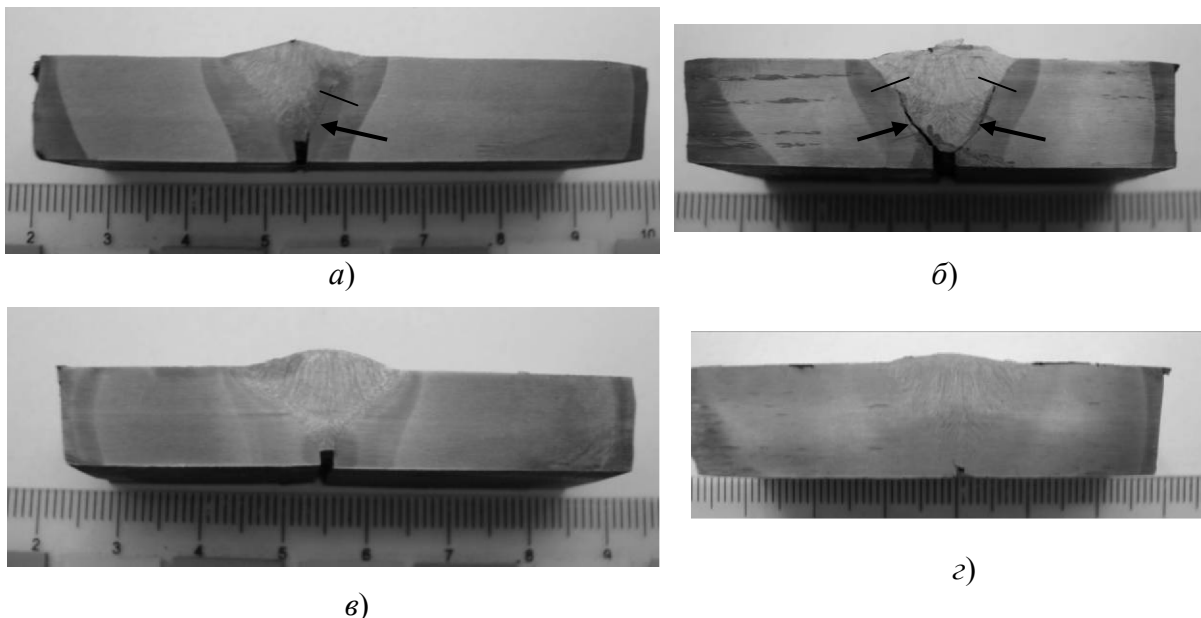


Рис.2. Холодные трещины в сварных соединениях зарубежных броневых сталей толщиной 12 мм при сварке проволокой Св-10ГСМТ: а) и в) сталь марки НВ 500 MOD, соотв.  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$  и  $100^{\circ}\text{C}$ ; б) ARMSTAL 500,  $20^{\circ}\text{C}$ ; г) PROTECTION 500,  $150^{\circ}\text{C}$

Отличительной особенностью, по сравнению с броневой сталью марки 71, было также то, это были только продольные ХТ и на поверхность соединения они не выходили. Поэтому визуально проконтролировать их появления непосредственно после сварки было нельзя. При этом трещины в соединениях развивались не так интенсивно, за исключением соединений стали марки ARMSTAL 500. По характеру образования и развития ХТ в соединениях эта сталь наиболее близка к отечественной стали марки 71. Установленные особенности образования ХТ очевидно связаны со структурным состоянием закаленного металла ЗТВ в различных марках броневых сталей.

При сварке соединений зарубежных сталей без предварительного подогрева проволокой марки Св-08Х20Н9Г7Т, как и при сварке броневой стали марки 71, ХТ в соединениях не образуются (табл.3, рис.3).

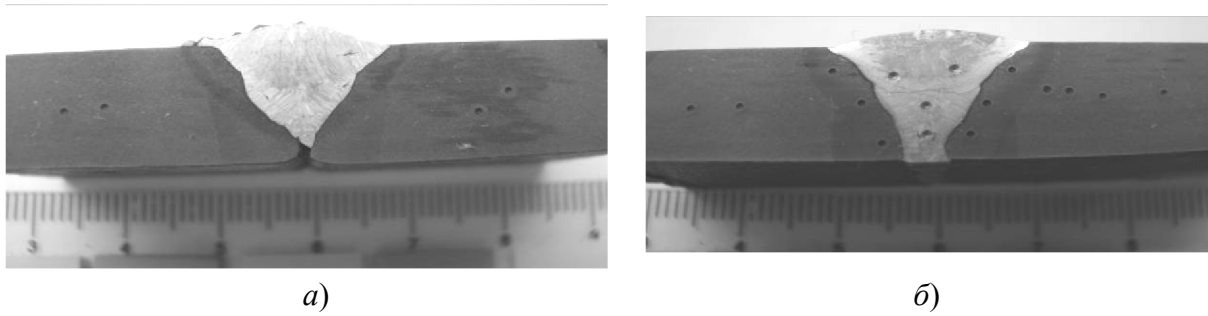


Рис.3. Макрошлифы сварных соединений сталей марок PROTECTION 500 (а) и ARMSTAL 500 (б) при сварке проволокой Св-08Х20Н9Г7Т ( $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ )

В последующем, на макрошлифах, вырезанных из технологических проб, измеряли твердость в характерных зонах сварных соединений, как показано на рис.4. Обобщенные результаты этих исследований, применительно к способу сварки броневых сталей толщиной 12 мм проволокой Св-08Х20Н9Г7Т, приведены в табл.4.

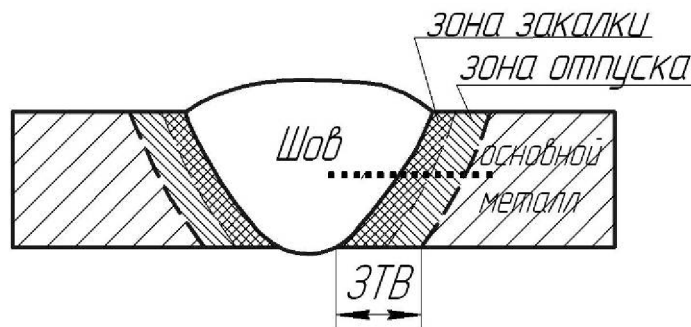


Рис.4. Схема замеров твердости в сварных соединениях броневых сталей

Таблица 4

Распределение твердости в сварных соединениях

Марка броневой стали	Зона сварного соединения				
	Основной металл HB, МПа	Зона закалки в ЗТВ		Зона отпуска в ЗТВ	
		HB, МПа	глубина, мм	HB, МПа	глубина, мм
71	4900	5100-5200	2-2,5	4500-4600	3-3,5
ARMSTAL 500	4700	4500-4600		3600-4100	
HB 500 MOD	4200	3600-3700		3100-3300	
PROTECTION 500	4600	4900		3400-3700	

Как видно, при дуговой сварке соединений в ЗТВ формируются два характерных участка – зона закалки и зона отпуска. Глубина этих участков достигает соответственно 2,5 и 3,5 мм. В зависимости от типа стали изменяется величина твердости металла в этих зонах. В зоне закалки твердость металла повышается (стали марки 71 и PROTECTION 500), остается примерно на том же уровне, что и основной металл (сталь марки ARMSTAL 500), или снижается до 15%, как в соединениях стали марки HB 500 MOD. В зоне отпуска, как правило, твердость металла падает. В соединениях стали марки 71 снижение твердости в зоне отпуска составляет до 8% по сравнению с основным металлом, ARMSTAL 500 – до 19%, PROTECTION 500 – до 18%,

НВ 500 MOD – до 25%. Очевидно, что изменение твердости в зоне отпуска ЗТВ связано с уровнем легирования броневой стали и особенностями протекания термического цикла сварки. С этой точки зрения броневая сталь марки 71 является наиболее технологичной для применения ЛБТ.

Следует также отметить, что эти данные получены, когда сварку выполняли без предварительного подогрева. С применением предварительного подогрева ширина зоны отпуска резко увеличивается. Так, например, при температуре  $T_0 = 100^\circ\text{C}$ , глубина зоны отпуска увеличивается в 2 раза, что приведет к снижению служебных свойства бронезащиты на данном участке сварного соединения при изготовлении ЛБТ из зарубежных сталей.

**Выводы.** 1. При дуговой сварке проволокой Св-10ГСМТ сварные соединения броневых сталей высокой прочности и твердости обладают повышенной склонностью к образованию холодных трещин. Избежать образования холодных трещин возможно лишь при применении предварительного подогрева до температур  $280-300^\circ\text{C}$  для стали марки 71,  $200^\circ\text{C}$  – стали ARMSTAL 500,  $150^\circ\text{C}$  – стали PROTECTION 500,  $100^\circ\text{C}$  – стали НВ 500 MOD. При этом следует учесть, что применение предварительного подогрева при сварке может привести к снижению твердости и служебных свойств бронезащиты изделий не только в ЗТВ, но прилегающего металла.

2. В сварных соединениях соединения броневых сталей высокой прочности и твердости, выполненных дуговой сваркой проволокой Св-08Х20Н9Г7Т, холодные трещины не образуются. При данном варианте сварки нет необходимости в применении предварительного подогрева, изменения твердости бронезащиты в ЗТВ минимально, поэтому он является наиболее технологичным для применения в производстве ЛБТ.

**Литература:** 1. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 247с. 2. Ющенко К.А., Дерломенко В.В. Анализ современных представлений о свариваемости // Автомат. сварка. – 2005. – № 1. – С. 9-13. 3. Грабин В.Ф., Денисенко А.В. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей. – К.: Наукова думка, 1978. – 272с. 4. Походня И.К., Швачко И.В. Физическая природа обусловленных водородом холодных трещин в сварных соединениях конструкционных сталей // Автомат. сварка. – 1997. – №5. – С.3-12. 5. Скульский В.Ю. Особенности кинетики замедленного разрушения сварных соединений закаливаемых сталей // Автомат. сварка. – 2009. – №7. – С.14-20. 6. Гайворонский А.А. Влияние диффузионного водорода на сопротивляемость замедленному разрушению сварных соединений высокоуглеродистой стали // Автомат. сварка. – 2013. – № 5. – С. 15-21. 7. Н. Suzuki. Cold Cracking and its Prevention in Steel Welding (III). DOC IW IX-1157-80. 8. ОСТ В3-15.010-85. Порядок внедрения новых сварочных материалов и технологических процессов дуговой сварки в серийное производство броневых стальных противопульных конструкций для военных гусеничных и колесных машин. 9. Мусияченко В.Ф., Жданов С.Л. Исследование механизма развития холодных трещин методом акустической эмиссии // Трещины в сварных соединениях. – Братислава, 1981. – С.130-136. 10. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1986. – 542с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Makarov E.H.L. Holodnye treshchiny pri svarke legirovannyh stalej. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 247s. 2. YUshchenko K.A., Derlomenko V.V. Analiz sovremennyh predstavlenij o svarivaemosti // Avtomat. svarka. – 2005. – № 1. – S. 9-13. 3. Grabin V.F., Denisenko A.V. Metallovedenie svarki nizko- i srednelegirovannyh stalej. – K.: Naukova dumka, 1978. – 272s. 4. Pohodnya I.K., SHvachko I.V. Fizicheskaya priroda obuslovlennyh vodorodom holodnyh treshchin v svarnykh soedineniyah konstrukcionnyh stalej // Avtomat. svarka. – 1997. – №5. –

S.3-12. 5. Skul'skij V.YU. *Osobennosti kinetiki zamedlennogo razrusheniya svarnyh soedinenij zakalivayushchihysya stalej* // *Avtomat. svarka.* – 2009. – №7. – S.14-20. 6. Gajvoronskij A.A. *Vliyanie diffuzionnogo vodoroda na soprotivlyaemost' zamedlennomu razrusheniyu svarnyh soedinenij vysokouglerodistoj stali* // *Avtomat. svarka.* – 2013. – № 5. – S. 15-21. 7. H. Suzuki. *Cold Cracking and its Prevention in Steel Welding (III)*. DOS IIV IX-1157-80. 8. OST V3-15.010-85. *Poryadok vnedreniya novyh svarochnyh materialov i tekhnologicheskikh processov dugovoj svarki v serijnoe proizvodstvo bronevnyh stal'nyh protivopul'nyh konstrukcij dlya voennyh gusenichnyh i kolesnyh mashin.* 9. Musiyachenko V.F., Zhdanov S.L. *Issledovanie mekhanizma razvitiya holodnyh treshchin metodom akusticheskoy ehmissii* // *Treshchiny v svarnyh soedineniyah.* – Bratislava, 1981. – S.130-136. 10. Gulyaev A.P. *Metallovedenie.* – M.: Metallurgiya, 1986. – 542s.

Гайворонский А.А., Позняков В.Д., Клапатюк А.В., Денисенко А.М., Дураченко В.В., Костин Ю.Н.

#### ОБРАЗОВАНИЕ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ БРОНЕВЫХ СТАЛЕЙ ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ И ТВЕРДОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО И ЗАРУБЕЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Установлены особенности образования холодных трещин в сварных соединениях броневых сталей высокой прочности и твердости отечественного и зарубежного производства. Показано, что повышенной стойкостью образованию холодных трещин обладают соединения, выполненные высоколегированной сварочной проволокой марки Св-08Х20Н9Г7Т. При данном варианте сварки нет необходимости в применении предварительного подогрева, изменения твердости в ЗТВ минимально, поэтому он является наиболее технологичным для применения в производстве.

Гайворонський А.А., Позняків В.Д., Клапатюк А.В., Денисенко А.М., Дураченко В.В., Костін Ю.М.

#### УТВОРЕННЯ ХОЛОДНИХ ТРІЩИН У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ БРОНЬОВАНОЇ СТАЛІ ВИСОКОЇ МІЦНОСТІ І ТВЕРДОСТІ ВІТЧИЗНЯНОГО І ЗАКОРДОННОГО ВИРОБНИЦТВА

Встановлено особливості утворення холодних тріщин в зварних з'єднаннях броньових сталей високої міцності і твердості вітчизняного і зарубіжного виробництва. Показано, що підвищену стійкість проти утворення холодних тріщин мають з'єднання, виконані високолегованим зварювальним дротом марки Св-08Х20Н9Г7Т. При цьому варіанті зварювання немає необхідності в застосуванні попереднього підігріву, зміни твердості в ЗТВ мінімально, тому він є найбільш технологічним для застосування у виробництві.

A. Gajvoronskij, V. Poznyakov, A. Klapatyuk, A. Denisenko, V. Durachenko, Yu.Kostin  
FORMATION OF COLD CRACKS IN WELDED CONNECTIONS OF  
BRONCHEEL STEELS OF HIGH STRENGTH AND HARDNESS OF FATHER AND  
FOREIGN MANUFACTURE

The features of the formation of cold cracks in welded joints of armor steels of high strength and hardness of domestic and foreign production are established. It has been shown that compounds made with high alloy welding wire of grade Sv-08X20N9G7T possess increased resistance to the formation of cold cracks. With this welding option, there is no need for preheating, the hardness change in the HAZ is minimal, and so it is the most technologically advanced for use in production.