

УДК 621.79:669.15

Позняков В.Д., Бабич А.А., Гайворонский А.А., Демченко Ю.В., Денисенко А.М., Ящук В.А., Дураченко В.В.

ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТПУСКА И УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ МАРОК 71 И НВ 500 MOD ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЛБТ

Постановка проблемы. При изготовлении легкобронированной техники (ЛБТ) низкотемпературный отпуск есть обязательной технологической операцией [1, 2]. Он способствует повышению трещиностойкости сварных соединений, что подтверждено практикой изготовления и эксплуатации конструкций ЛБТ из сталей средней и высокой твердости марок 2П, 54П, 43ПСМ и других, при сварке которых применялась низколегированная проволока Св-10ГСМТ. Отпуск сварных конструкций выполняют при температуре 230°C не позднее 24 часов после их сварки. Первый отпуск выполняют после сварки остова корпуса или башни на протяжении не менее 1-го часа. И второй раз, после завершения сварки конструкции, приварки кронштейнов и дополнительных элементов, на протяжении не меньше 3-х часов. При этом в отдельном случае, если после изготовления корпуса и его отпуска были обнаружены дефекты, ремонтную сварку допускается выполнять высоколегированной проволокой марки Св-08Х20Н9Г7Т с проковкой шва без последующего низкотемпературного отпуска конструкции.

Современные ЛБТ в Украине изготавливают из стали высокой прочности и твердости марки 71 и ее зарубежных аналогов, сварку которых выполняют исключительно проволокой Св-08Х20Н9Г7Т. Как показали предыдущие исследования, при таком способе сварки соединения броневых сталей изначально имеют повышенную стойкость против образования холодных трещин, и применять для этого низкотемпературный отпуск не надо. Следует также отметить, что сегодня нет научного и практического подтверждения о необходимости применения отпуска данных конструкций при изготовлении ЛБТ с целью повышения их трещиностойкости при последующей эксплуатации.

Анализ последних достижений и публикаций. Известно, что при термическом отпуске в металле протекают диффузионные процессы, в результате которых происходит его дегазация и релаксация напряжений, что способствует повышению пластических свойств закаленного металла и его сопротивляемости образованию и развитию трещин. Аналогичные положительные изменения протекают при отпуске и в сварных соединениях [3-5]. Но необходимость выполнения отпуска соединений, при сварке которых были применены высоколегированные материалы, сегодня остается дискуссионным вопросом.

Во-первых, высоколегированный шов имеет высокую способность к растворению водорода в расплавленном металле и скорость его диффузии из шва в металл зоны термического влияния (ЗТВ) на порядок ниже, чем в соединениях с низколегированным швом [6, 7]. Во-вторых, уже при сварке соединений в закаленном металле ЗТВ, вследствие действия физико-металлургических процессов, формируется менее напряженная и более пластичная структура [8, 9]. В-третьих, термическая обработка может привести к охрупчиванию сварных соединений с высоколегированным швом вследствие диффузии углерода и образования хрупких прослоек в зоне сплавления [3-5]. И в-четвертых, для низкотемпературного отпуска конструкций ЛБТ необходимо наличие специализированного оборудования, а технология его выполнения связана с большими затратами

© В.Д. Позняков, 2017

энергии, что повышает стоимость изделий до 40%. В тоже время, сегодня известен ряд энергосберегающих технологий, позволяющих добиться повышения трещиностойкости сварных соединений и их долговечности без применения термического отпуска [10, 11]. К таким технологиям относятся: механическая проковка наплавленного металла в процессе сварки или послесварочная ультразвуковая проковка поверхности шва и ЗТВ соединений, дробеструйная обработка сварных соединений, вибрационная обработка конструкций и другие способы.

Целью настоящей работы является в сравнительной оценке влияния низкотемпературного отпуска и ударных способов обработки на сопротивляемость усталостному разрушению сварных соединений броневых сталей высокой прочности и твердости, и выборе технологий, обеспечивающих повышение долговечности сварных соединений.

Материал и методика исследования. Броневые стали высокой прочности и твердости, которые использовали при выполнении исследований, приведены в табл.1.

Таблица 1

Марка броневой стали	Массовая доля элементов, %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	B
71, $\delta=20$ мм	0,31	1,16	0,74	1,66	2,26	0,30	-
НВ 500 MOD, 10 мм	0,26	0,21	0,78	0,42	0,74	0,27	0,001

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

2. В стали марки НВ 500 MOD - V \leq 0,06%, S \leq 0,010%, P \leq 0,016%.

Испытаниям подвергали образцы стыковых сварных соединений размером 480×120×10 (20) мм с V-образной формой разделки, выполненные с полным проваром (подварка корня шва с обратной стороны соединения). Сварку соединений выполняли механизированным способом в среде защитных газов (82% Ar+18% CO₂) полуавтоматом типа «Патон БП-601» с использованием источника питания постоянного тока типа ВДУ-506. При сварке применяли серийную проволоку марки Св-08Х20Н9Г7Т диаметром 1,2 мм. Параметры режима сварки были следующие: сварочный ток 160-180 А, напряжение на дуге 26-28 В, скорость сварки 12-15 м/ч.

При подготовке образцов применяли различные технологии сварки и послесварочной обработки, а именно:

- технология сварки без низкотемпературного отпуска образцов и ударной обработки шва (базовый вариант, №1);
- с низкотемпературным отпуском образцов, который выполняли сразу после сварки (№2) и после их вылеживания в течение 15-20 часов (№3);
- с механической проковкой слоев наплавленного металла в процессе сварки без послесварочного отпуска образцов (№4);
- с ультразвуковой проковкой поверхностей шва и ЗТВ с лицевой и обратной стороны соединений через 4-ро суток после сварки без отпуска образцов (№5);
- без отпуска с дробеструйной обработкой образцов с лицевой и обратной стороны через 4-ро суток после сварки - по обычной технологии подготовки корпусов ЛБТ (№6) и при дополнительной обработке шва в течении 1 мин. (№7).

В случае применения, отпуск сварных образцов выполняли в муфельной печи типа СНОЛ 15/100 при температуре 230°С на протяжении 3-х часов. Для механической проковки слоев наплавленного металла использовали обычный электроинструмент. Проковку выполняли с частотой до 10 Гц до изменения характера рисунка поверхности наплавленного металла на 70-90%. При этом время выполнения проковки шва, длина

которого в соединении была 120 мм, составляла 1-2 минуты. Корневой и завершающий слои шва не проковывали. Для послесварочной ультразвуковой проковки поверхности шва и ЗТВ соединений использовали специализированный инструмент и технологию, разработанные в ИЭС им. Е.О.Патона [12]. Дробеструйную обработку сварных соединений выполняли в условиях ГП «ЖБТЗ» с использованием оборудования и технологии, которые применяются в серийном производстве при изготовлении ЛБТ. При этом диаметр дроби, изготовленной из высокопрочной стали, составлял 2-3 мм.

Образцы, подготовленные по различным технологиям, нагружали при циклическом изгибе в соответствии с общепринятыми методами испытаний на долговечность сварных соединений [13, 14]. Для этого использовали специализированную усталостную машину типа УМП-1, напряжения цикла составляло 60 МПа при частоте нагружения 14 Гц. Критерием оценки было количество циклов нагружения (N), при которых в сварном соединении образовывалась трещина усталости длиной 2-3 мм.

Основная часть (анализ результатов исследований). Результаты сравнительных испытаний сварных соединений, при подготовке которых применяли различные технологии сварки и послесварочной обработки, обобщены на рис.1 (нумерация технологий соответствует вышеприведенной). Характерный макрошлиф соединения с трещиной усталости показан на рис.2.

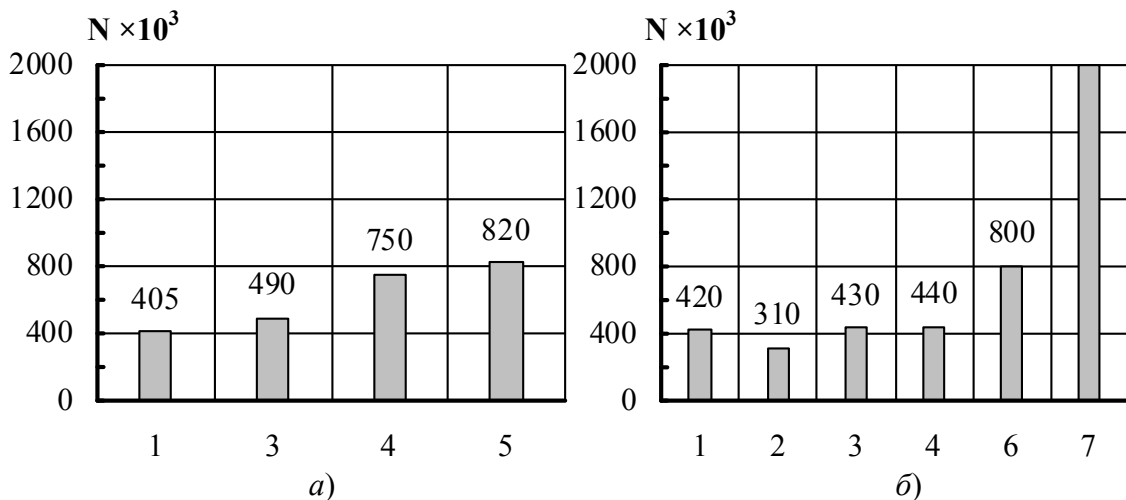


Рис.1. Долговечность сварных соединений броневых сталей марок 71 (а) и НВ 500 MOD (б).

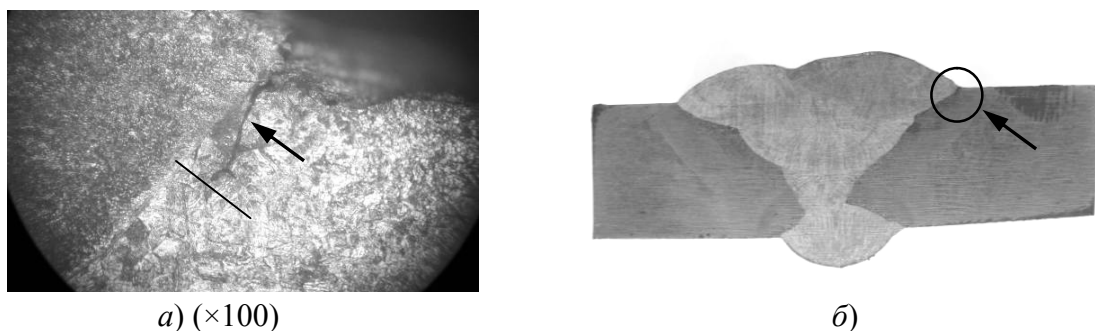


Рис.2. Трещина усталости (а) в соединении (б), образовавшаяся в результате циклического нагружения (сталь марки НВ 500 MOD, вариант №1)

Как видно из приведенных данных (рис.1, а, б), низкий отпуск соединений с высоколегированным швом, который выполняется после вылежки образцов в течение 15-20 часов (технология №3), мало влияет на повышение их долговечности независимо

от марки и состава броневой стали. Повышение показателей долговечности для соединений стали марки 71 составляет примерно 21% (соответственно 405 и 490 тыс. циклов), а стали HB 500 MOD до 5% (420 и 430 тыс. циклов). А вот при его выполнении сразу после сварки (№2) показатели падают до 26% (для стали HB 500 MOD – 420 и 310 тыс. циклов). Это, по нашему мнению, происходит в следствии охрупчивания зоны сплавления высоколегированного шва, когда их помещают в печь сразу после сварки еще не полностью остывшими. При этом, более интенсивно развиваются процессы диффузии углерода и в зоне сплавления формируются хрупкие прослойки, которые незначительны по размеру, но их наличие уже достаточно для снижения сопротивляемости металла образованию и развитию трещин под действием внешнего нагружения. Трещины усталости при всех рассмотренных вариантах технологий зарождаются, как правило, на участке зоны сплавления соединений, где находится естественный концентратор напряжений при переходе шва к основному металлу, и в дальнейшем развиваются по металлу ЗТВ (рис.2). Полученные результаты указывают на то, что при сварке конструкций ЛБТ с использованием высоколегированных материалов низкий отпуск не только не способствует повышению трещиностойкости соединений, а наоборот, может привести к снижению их долговечности.

Следует отметить, что при выполнении работ были также проведены сравнительные испытания соединений исследуемых сталей, которые были сварены проволокой Св-10ГСМТ (технологии №1, 2, 3). С целью исключения образования холодных трещин в соединениях при сварке образцов применяли предварительный подогрев. Учитывая результаты ранее выполненных исследований, температура предварительного подогрева для соединений стали марки 71 составляла 250°C, а стали HB 500 MOD – 100°C. На рис.1 эти данные не приведены, но они следующие. Без низкого отпуска количество циклов нагружения до момента образования трещины усталости в соединениях было на уровне, как и при сварке по базовой технологии с применением высоколегированной проволоки (390-430 тыс. циклов). После низкого отпуска, который выполняли сразу после сварки (№2), долговечность соединений повысилась на 70-80% (до 680-750 тыс. циклов). При отпуске, который выполняли после выдержки образцов в течение 15-20 часов (№3), количество циклов до появления трещины усталости было несколько ниже и составляло порядка 660-680 тыс. (повышение долговечности примерно на 50%).

Если сварку соединений броневых сталей проволокой Св-10ГСМТ выполняли без предварительного подогрева, то независимо от того, был или нет низкий отпуск после сварки, долговечность соединений не превышала 50 тыс. циклов нагружения. Разрушение образцов проходило смешано по ЗТВ и шву соединений, что указывало на наличие холодных трещин, которые образовались еще в процессе сварки. В результате внешнего нагружения они ускоренно развивались, что и приводило к быстрому разрушению сварных образцов. Полученные результаты подтверждают необходимость обязательного применения предварительного подогрева металла перед сваркой и послесварочного низкотемпературного отпуска конструкций при изготовлении ЛБТ в случае использования низколегированных сварочных материалов.

Существенному повышению долговечности соединений броневых сталей с высоколегированным швом, приблизительно в 2 раза и более, способствует применение ударной обработки в процессе или после сварки (технологии №4-7). При этом, механическая послойная проковка наплавленного металла (№4) более эффективна при сварке соединений, толщина которых превышает 10 мм. В этом случае обработке подвергается больше 3-х слоев шва (первый и последний слой не проковываются), что способствует снижению сварочных напряжений в соединении до 2-х раз. Поэтому долговечность со-

единений стали марки 71, швы которых были наплавлены в 7 слоев (толщина металла 20 мм), повысилась на 85% (рис.1, а). Соединения стали марки HB 500 MOD толщиной 10 мм имели 3 слоя наплавленного металла. Долговечность при механической проковке таких соединений повысилась всего на 5% (рис.1, б). При выборе данного способа обработки также следует учитывать, что проковка шва способствует снижению деформаций в соединениях. Поэтому, с целью обеспечения геометрических размеров конструкции, ее также необходимо применять и при сварке тонкомерных соединений.

Ультразвуковая проковка швов по специальной технологии ИЭС (№5) и дробеструйная обработка поверхностей металла после сварки по обычной технологии подготовки ЛБТ (№6), примерно в одинаковой степени способствуют повышению долговечности соединений независимо от толщины металла (в 2 раза). Физика процессов их влияния на формирование свойств металла при обоих способах примерно одинаково. В результате обработки происходит наклеп металла шва и ЗТВ, и в приповерхностном слое соединений формируются сжимающие напряжения. Разница состоит в том, что при дробеструйной обработке толщина поверхностного слоя, который претерпевает изменения, несколько больше и может составлять, в зависимости от параметров (давление струю, расстояние от поверхности, тип дроби, продолжительность обработки) до 1,2 мм. При ультразвуковой проковке металл обрабатывается на глубину до 0,8 мм.

Из рассмотренных выше технологий, наиболее эффективной является технология №7, при которой сварные соединения с высоколегированным швом подвергаются дополнительной дробеструйной обработке. Долговечность соединений повышается до 5 раз и более (рис.1, б). Указанное 2 млн. количество циклов не является окончательно установленной величиной. Оно принято условно, т.к. при нагружения первого образца, подготовленного по данной технологии, даже после 3 млн. циклов трещины усталости в сварных соединениях не образовались. Поэтому испытания последующих 2-х образцов, которые проходили в течение 20 дней на один образец, прекращали при 2 млн. циклов нагружения, а за показатель долговечности сварных соединений принимали это условное количество циклов. Данные результаты получены при испытании сварных соединений стали марки HB 500 MOD. Но по нашему мнению, аналогичный эффект был бы получен, и при испытаниях соединений стали марки 71. При необходимости специалисты Института готовы выполнить аналогичные испытания сварных соединений стали марки 71, обработанные дробеструйной обработкой по предлагаемым технологиям.

Следует также отметить, что в процессе дополнительной дробеструйной обработки также происходит упрочнение поверхностных слоев высоколегированного шва и металла бронезащиты на участке отпуска в ЗТВ, что также будет способствовать повышению служебных свойств соединений. При этом, дробеструйная обработка является принятой технологической операцией при изготовлении ЛБТ, это есть энергосберегающая технология, которая не требует дополнительных затрат предприятий. В комплексе, применение технологий механической проковки наплавленного металла в процессе сварки и послесварочной дробеструйной обработки, позволит существенно повысить качество изготовления и служебные свойства изделий ЛБТ. При этом низкий отпуск бронеконструкций, при сварке которых применялись высоколегированные материалы типа Св-08Х20Н9Г7Т, является лишней технологической операцией, который практически не влияет по повышению трещиностойкости сварных соединений.

Выводы. 1. При дуговой сварке конструкций ЛБТ с использованием низколегированных сварочных материалов типа Св-10ГСМТ применение предварительного по-

догрева металла перед сваркой и послесварочного низкотемпературного отпуска конструкций обязательно, что позволяет до 1,8 раз повысить долговечность соединений.

2. При дуговой сварке конструкций ЛБТ с использованием высоколегированных материалов типа Св-08Х20Н9Г7Т низкий отпуск не только не способствует повышению, а наоборот, может привести к снижению долговечности в результате образования хрупких прослоек в зоне сплавления соединений.

3. Применение технологий механической проковки наплавленного металла в процессе сварки и послесварочной дробеструйной обработки позволит существенно, до 5 раз и более, повысить долговечность соединений с высоколегированным швом. При этом, дробеструйная обработка является принятой технологической операцией при изготовлении ЛБТ, которая не требует дополнительных затрат.

Литература: 1. ОСТ В3 4301-89 Сборочные единицы броневые стальные противоположные для военных гусеничных и колесных машин. Общие требования к сварным соединениям. 2. Технология изготовления корпусов и башен легких и промежуточных категорий / Л.А. Кирель, Л.Г. Попов, В.А. Вейс, Е.П. Агафонов и др. // М.: ЦНИИ информации, 1981. – 132с. 3. Грабин В.Ф., Денисенко А.В. Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей. – К.: Наукова думка, 1978. – 272с. 4. Єфіменко М.Г., Радзівілова Н.О. Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань. – Харків: НТУ ХПІ, 2003. – 488с. 5. Анохов А.Е., Корольков П.М. Сварка и термическая обработка в энергетике. – К.: Экотехнологія, 2006. – 320с. 6. Козлов Р.А. Водород при сварке корпусных сталей. – Л.: Судостроение, 1969. – 176с. 7. Взаимодействие водорода с металлами / Под ред. Захарова А.П. – М.: Наука, 1987. – 296с. 8. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с. 9. Влияние типа металла шва на структуру, свойства и сопротивляемость соединений высокопрочных закаливающихся сталей образованию холодных трещин / В.Г. Гордонный, А.А. Гайворонский, В.А. Саржевский, Ю.М. Лебедев // Автоматическая сварка. – 1992. - №11-12. – С.13-16. 10. Патон Б.Е. Современные направления повышения прочности и ресурса сварных конструкций // Автоматическая сварка. – 2000. - №9-10. – С.3-9. 11. Лащенко Г.И., Демченко Ю.В. Энергосберегающие технологии послесварочной обработки металлоконструкций. – К.: Экотехнологія, 2008. – 168с. 12. Кныш В.В., Кузьменко А.З. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Сварщик. – 2005. - №2. – С.19-21. 13. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В.И. Труфякова. – Киев: Наукова думка, 1990. – 255с. 14. Дронов В.С., Головин С.А. Ограниченная долговечность и трещиностойкость сталей высокой и средней прочности // Металловедение. 2004 – № 12. – С.41-47.

Bibliography (transliterated): 1. OST V3 4301-89 Sborochnye edinicy bronevye stal'nye protivopul'nye dlya voennyh guse-nichnyh i kolesnyh mashin. Obshchie trebovaniya k svarnym soedineniyam. 2. Tekhnologiya izgotovleniya korpusov i bashen legkih i promezhutochnykh kategorij / L.A. Kirel', L.G. Popov, V.A. Vejs, E.P. Agafonov i dr. // M.: CNII informacii, 1981. – 132s. 3. Grabin V.F., Denisenko A.V. Metallovedenie svarki nizko- i srednelegirovannykh stalej. – K.: Naukova dumka, 1978. – 272s. 4. Єфіменко М.Г., Радзівілова Н.О. Металознавство і термічна обробка зварних з'єднань. – Харків: НТУ ХПІ, 2003. – 488с. 5. Anohov A.E., Korol'kov P.M. Svarka i termiche-skaya obrabotka v ehnergetike. – K.: EHkotehnologiya, 2006. – 320s. 6. Kozlov R.A. Vodorod pri svarke korpusnykh stalej. – L.: Sudostroenie, 1969. – 176s. 7. Vzaimodejstvie vodoroda s metallami / Pod red. Zaharova A.P. – M.: Nauka, 1987. – 296s. 8. Makarov E.H.L. Holodnye treshchini pri svarke legirovannykh stalej. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 247 s. 9. Vliyanie tipa metalla shva na strukturu, svoystva i soprotivlyaemost' soedinenij vysokoprochnnykh zakali-vayushchihsya stalej obrazovaniyu holodnykh treshchin / V.G. Gordonnyj, A.A. Gajvoronskij, V.A. Sarzhevskij, YU.M. Lebedev // Avtomaticheskaya svarka. – 1992. - №11-12. – S.13-16. 10. Paton B.E. Sovremennye napravleniya povysheniya prochnosti i resursa svarnykh konstrukcij // Avtomaticheskaya svarka. – 2000. - №9-10. – S.3-9. 11. Lashchenko G.I., Demchenko YU.V. EHnergosberegayushchie tekhnologii poslesvarochnoj

obrabotki metallokonstrukcij. – K.: ENkotekhnologiya, 2008. – 168s. 12. Knysh V.V., Kuz'menko A.Z. Povyshenie soprotivleniya ustalosti svarnyh soedinenij vysokochastostnoj mekhanicheskoy prokovkoj // Svarshchik. – 2005. - №2. – S.19-21. 13. Prochnost' svarnyh soedinenij pri peremennyh nagruzkah / Pod red. V.I. Trufyakova. – Kiev: Naukova dumka, 1990. – 255s. 14. Dronov V.S., Golovin S.A. Ogranichennaya dolgovechnost' i treshchinostjkost' stalej vysokoj i srednej prochnosti // Materialovedenie. 2004 – № 12. – S.41-47.

Позняков В.Д., Бабич А.А., Гайворонский А.А., Демченко Ю.В., Денисенко А.М., Ящук В.А., Дураченко В.В.

**ВЛИЯНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОТПУСКА И УДАРНОЙ
ОБРАБОТКИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ МАРОК
71 И HB 500 MOD ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЛБТ**

Установлено влияние низкотемпературного отпуска и ударных способов обработки на долговечность сварных соединений броневых сталей высокой прочности и твердости. Показано, что отпуск соединений конструкций легкобронированной техники (ЛБТ), при сварке которых были применены высоколегированные материалы типа Св-08Х20Н9Г7Т, не способствует повышению долговечности, а наоборот, может привести к ее снижению. Наиболее эффективной технологией повышения долговечности, более чем в 5 раз, является комплексное применение механической проковки наплавленного металла в процессе сварки и послесварочной дробеструйной обработки соединений.

Позняков В.Д., Бабіч А.А., Гайворонський А.А., Демченко Ю.В., Денісенко А.М., Ящук В.А., Дураченко В.В.

**ВПЛИВ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВІДПУСКУ І УДАРНОЇ ОБРОБКИ
НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛЕЙ МАРОК 71 І
HB 500 MOD ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ЛБТ**

Встановлено вплив низкотемпературного відпуску і ударних способів обробки на довговічність зварних з'єднань броньових сталей високої міцності і твердості. Показано, що відпуск з'єднань конструкцій легкоброньованої техніки (ЛБТ), при зварюванні яких були застосовані високолеговані матеріали типу Св-08Х20Н9Г7Т, не сприяє підвищенню довговічності, а навпаки, може призвести до її зниження. Найефективнішою технологією підвищення довговічності, більш ніж в 5 разів, є комплексне застосування механічного проковування наплавленого металу в процесі зварювання і після зварювальної дрібострумної обробки з'єднань.

Poznyakov V.D., Babich A.A., Gayvoronsky A.A., Demchenko Yu.V., Denisenko A.M., Yashchuk V.A., Durachenko V.V.

**INFLUENCE OF LOW-TEMPERATURE VACATION AND IMPACT
TREATMENT ON THE DURABILITY OF WELDED STEELS OF STEELS GRADE 71
AND HB 500 MOD AT THE MANUFACTURE OF LAV**

The effect of low temperature tempering and impact treatment methods on the durability of welded joints of armor steels of high strength and hardness is established. It is shown that the release of joints of lightly armored vehicles (LAV) structures, when welding highly doped materials such as Sv-08Cr20N9G7T, does not contribute to increasing durability, but, on the contrary, can lead to its decrease. The most effective technology of increasing the durability, more than 5 times, is the integrated use of mechanical forging of weld metal during welding and after welding shot blasting of joints.