

УДК 620.163.3

Костин А. М.¹, Мартыненко В. А.¹, Квасницкий В. В.²

¹ Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова. Украина, г. Николаев

² Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт». Украина, г. Киев

ОЦЕНКА СВАРИВАЕМОСТИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ СТАЛИ КАТЕГОРИИ E

В работе, на основе анализа результатов комплексных механических испытаний контрольных сварных соединений листового проката толщиной 50 мм, выполненных в соответствии требованиями Правил Классификационных Обществ (BV, LR, DNV, GL, ABS и др.), рассмотрена возможность использования аналитических методов оценки свойств высокотемпературных участков зоны термического влияния применительно к стали категории E. Показано, что расчет прочностных характеристик (R_m , ReH , A_5 , Z , HV) по химическому составу, с учетом скорости охлаждения сварных соединений, обеспечивает достаточную для практического применения степень достоверности. Работа удара (KV), особенно при низких температурах, аналитической оценке не подлежат.

Ключевые слова: сталь категории E; оценка свариваемости; аналитические методы расчета; механические характеристики; ударная вязкость; твердость.

Введение

Современное производство корпусов судов, стационарных нефтяных платформ, ветровых электростанций и других металлоконструкций морского исполнения широко использует листовую прокат большой толщины. В этой связи, возникает необходимость оценки свариваемости сталей определенного химического состава, с целью выбора оптимального способа и технологических параметров режима сварки для изготовления конкретной металлоконструкции. Наиболее достоверным способом оценки свариваемости листового проката являются комплексные испытания контрольных сварных соединений в соответствии с требованиями Правил Квалификационных Обществ (LR, BV, DNV, GL, ABS, PC, PCU и др.). Однако, такие испытания являются достаточно дорогостоящими и не дают возможности оптимизации свойств при изменении способа сварки, параметров режима, сварочных материалов и других основополагающих факторов при формировании соединений. Аттестация технологических процессов сварочного производства основывается на международных стандартах серии ISO 15609 – ISO 15614, применение которых является обязательным, если не оговариваются иные условия при заключении контракта на выполнение работ.

Основной материал

На практике, с целью оптимизации свойств сварных соединений, разработка определенной сварочной технологии часто сопровождается заваркой серии контрольных образцов, на которых варьируются основные параметры режима сварки. С целью прогнозирования свойств сварных соединений и уменьшения материальных затрат при таких работах в ИЭС им. Патона, на основе анализа литературных данных и исследовании около 150 диаграмм термокинетического распада аустенита, разработаны математические модели (см. формулы 1–6), которые позволяют с достаточной степенью точности прогнозировать фазовый состав и механические свойства высокотемпературных участков зоны термического влияния (ЗТВ) в зависимости от химического состава и длительности охлаждения металла, нагреваемого до максимальной температуры 1350 °С, в диапазоне температур 850–500 °С [1]. Они могут быть использованы для сталей, содержащих, не более (% масс.): 0,4 C; 2 Mn; 0,8 Si; 2 Cr; 1 Mo; 1,5 Ni; 0,3 V; 0,06 Ti; 0,06 Al; 0,1 Nb; 0,5 W; 0,5 Cu, при термических циклах, обеспечивающих время охлаждения t в указанном интервале температур от 5 до 200с. Аналогичным образом можно определить также свойства наплавленного металла.

Твердость по Виккерсу (с коэффициентом корреляции $R = 0,95$)

$$HV = M(309 + 494C + 622C^2 + 17,7Mn) + B(234 + 122C) + [\Phi + \Pi](98 + 275C + 15,4Mn); \quad (1)$$

- где Φ , Π и B – количество феррита, перлита и бейнита [1]

Временное сопротивление (с коэффициентом корреляции $R = 0,91$)

$$\sigma_B (\text{МПа}) = M(798 + 3215C) + B(590 + 960C + 39,7Mn + 200V) + [\Phi + \Pi](297 + 1360C + 60Mn + 140V); \quad (2)$$

Предел текучести (с коэффициентом корреляции $R = 0,90$)

$$\sigma_{0,2} (\text{МПа}) = M(662 + 1610C) + B(500 + 460C - 120C^2 + 150V) + [\Phi + \Pi](187 + 925C + 47Mn + 90V); \quad (3)$$

Относительное удлинение (с коэффициентом корреляции $R = 0,91$)

$$\delta(\%) = M(12,2 - 67C^2 - 1,5Mn + 0,76 \ln t) + B(21,3 - 35,6C - 4Mn - 5V + 1,84 \ln t) + [\Phi + \Pi](36,5 - 127C + 153C^2 - 1,16Mn + 8V + 0,66 \ln t); \quad (4)$$

Относительное сужение (с коэффициентом корреляции $R = 0,86$)

$$\psi(\%) = M(48,5 - 158C + 116C^2 + 0,98 \ln t) + B(53,3 - 132C + 103C^2 - 5,1Mn - 10V + 3,4 \ln t) + [\Phi + \Pi](65,4 - 88C - 82C^2 - 6,7Mn + 18V + 0,6 \ln t); \quad (5)$$

Ударная вязкость образцов с полукруглым надрезом (с коэффициентом корреляции $R = 0,75$)

$$KCU_{+20} (\text{Дж/см}^2) = M(1,06 - 2,8C + 1,3C^2 - 0,081Mn + 0,054 \ln t) + B(1,3 - 1,6C - 0,08Mn) + [\Phi + \Pi](1,47 - 1,8C + 0,8C^2 - 0,076Mn - 0,045 \ln t). \quad (6)$$

В этой связи нами была поставлена задача оценки достоверности предлагаемой методики с целью оптимизации объемов работ при исследовании свариваемости стали категории Е большой толщины, применительно к наиболее слабой Т-ориентации листового проката. Регламентированные требования классификационных обществ к свойствам стали категории Е толщиной 50 мм находятся на следующем уровне (Т-ориентация): временное сопротивление $R_m = 400-520$ МПа, предел текуче-

сти $R_{eH} \geq 235$ МПа, относительное удлинение $A \geq 22\%$, работа удара $KV_{T-40} \geq 20$ Дж, твердость $HV \leq 350$ ед.

В качестве основного металла для испытаний были отобраны заготовки из листового проката толщиной 50 мм следующего химического состава (% масс.): 0,1 С; 0,85 Мп; 0,19 Si; 0,003 S; 0,011 P; < 0,005 As; 0,05 Cr; 0,17 Ni; 0,03 Cu; < 0,005 Ti; 0,032 Al; 0,021 Nb; 0,008 N; < 0,005 V; < 0,05 Mo; < 0,005 B; 0,017 Sn; < 0,001 Sb.

Аналитическая оценка свойств металла ЗТВ (R_m , R_{eH} , A_5 , Z , KCU_{+20} , HV) в зависимости от заданного химического состава и длительности охлаждения металла, нагреваемого до максимальной температуры 1350 °С, в диапазоне температур 850–500 °С, выполнялась по указанным зависимостям. Результаты расчетов представлены в виде графиков, показанных на рис. 1. При этом, расчетная температура подогрева сварного соединения, для толщины проката 50 мм, составляла 150 °С.

Для реальной оценки свойств ЗТВ стали данного химического состава, были заварены опытные контрольные образцы. Размер свариваемых пластин: толщина – 50 мм; ширина – 200 мм; длина – 2000 мм. Тип сварного соединения: с К-образной разделкой – С15 по ГОСТ 8713-79, 2.5.5 по ISO 9692-2 (рис. 2). Расположение сварного шва: параллельно направлению прокатки листа. При этом расположение образцов для испытаний на растяжение и ударный изгиб – в поперечном направлении (Т-ориентация).

Сварка образцов выполнялась автоматическим способом под флюсом, проволокой сплошного сечения (код сварки 121) на расчетной погонной энергии $q_{II} \approx 2,5$ кДж/мм ($I_{св} = 550$ А; $U_d = 32$ В; $V_{св} = 6,67$ мм/сек; $\eta = 0,95$) и $q_{II} \approx 4,2$ кДж/мм ($I_{св} = 800$ А; $U_d = 36$ В; $V_{св} = 6,57$ мм/сек; $\eta = 0,95$), с использованием сварочной проволоки ОК Autrod 12.20 (S), Ø 4 мм и флюса ОК Flux 10.71, SA AB 1 67 AC H5 (EN 760). Температура предварительного подогрева в обоих случаях составляла 150 °С. Межваликовая температура не превышала 200 °С. При выполнении каждого следующего прохода направление сварки менялось на противоположное. Порядок выполнения проходов в опытных сварных соединениях в зависимости от расчетной погонной энергии приведен на рис. 3. Макроструктура сварных соединений показана на рис. 4. Металлографический анализ показал качественное формирование сварного соединения в обоих случаях с плавным сопряжением сварного шва с основным металлом. Макродефектов типа непровар, трещины, шлаковые включения и им подобные обнаружено не было. Геометрические размеры сварного шва находились в соответствии с требованиями сварочной процедуры и рис. 3.

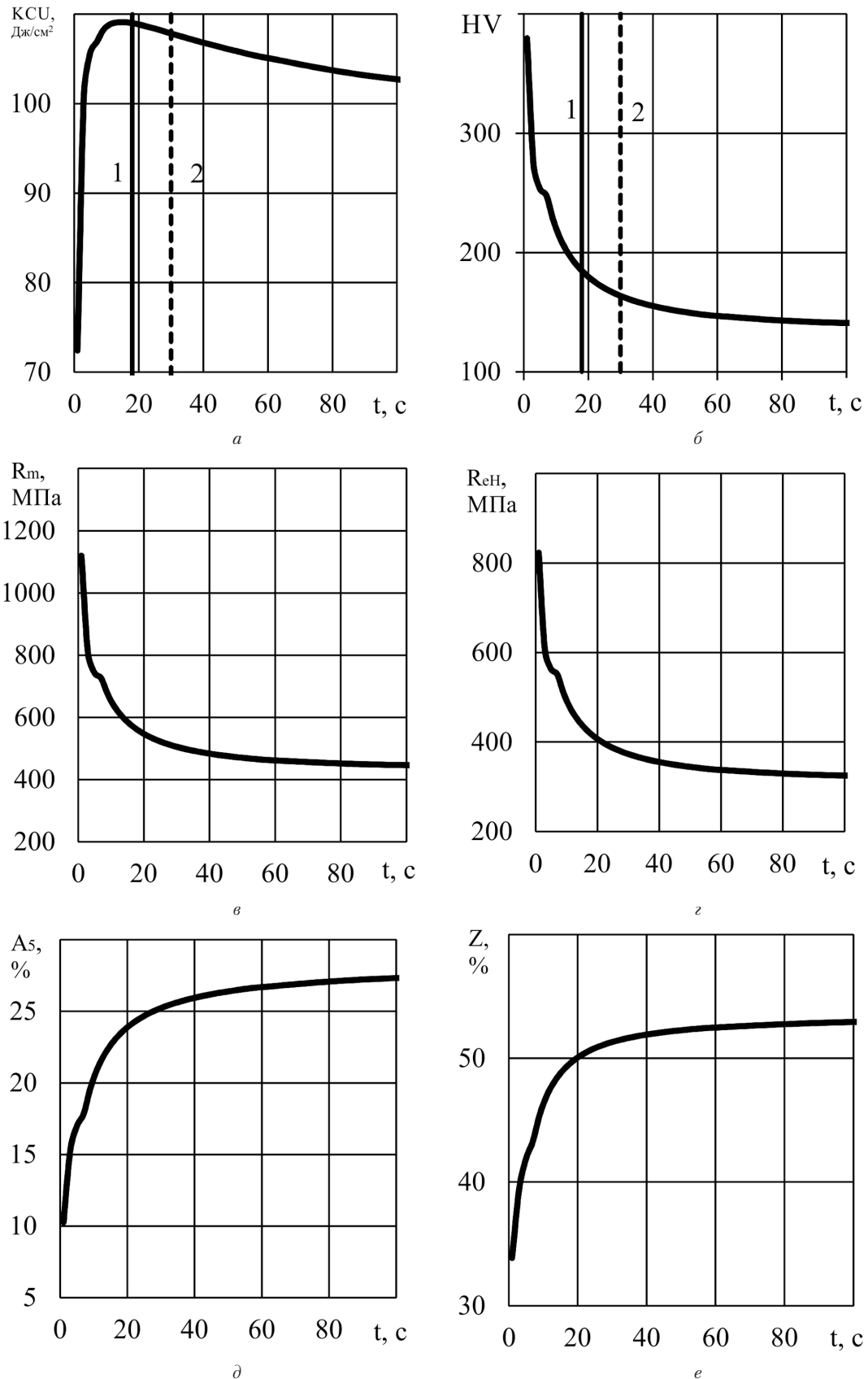


Рис. 1. Зависимость свойств металла ЗТВ опытной стали от времени охлаждения, с, в диапазоне 850...500 °С (1 – $q_{п1} \approx 2,5$ кДж/мм²; 2 – $q_{п2} \approx 4,2$ кДж/мм²):

а) твердости HV; б) ударной вязкости КСУ, Дж/см²; в) временного сопротивления, МПа; г) предела текучести, МПа; д) относительного удлинения, %; е) относительного сужения, %

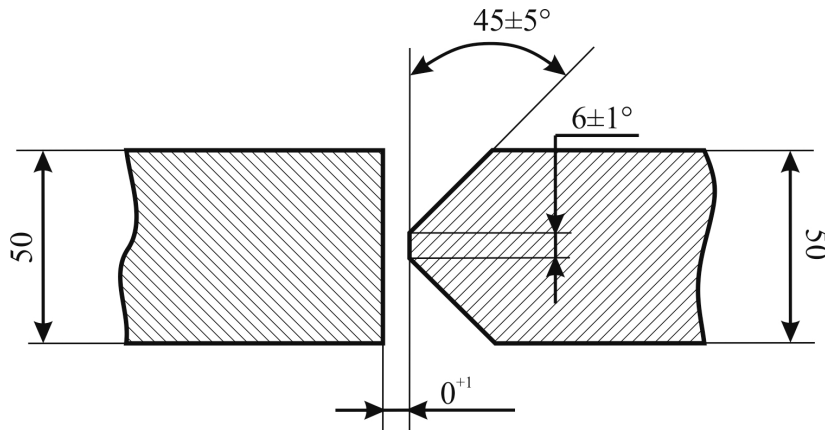


Рис. 2. Тип разделки кромок опытных сварных соединений ($t = 50\text{мм}$)

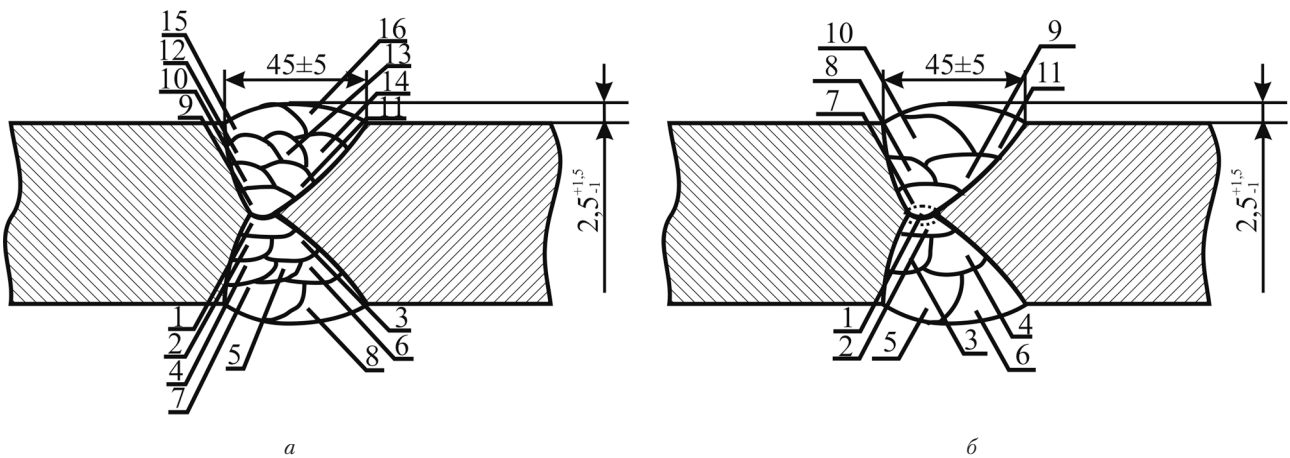


Рис. 3. Эскизы опытных сварных соединений с указанием порядка проходов:
 а) $q_{н} \approx 2,5 \text{ кДж/мм}$; б) $q_{н} \approx 4,2 \text{ кДж/мм}$ ($t = 50 \text{ мм}$)

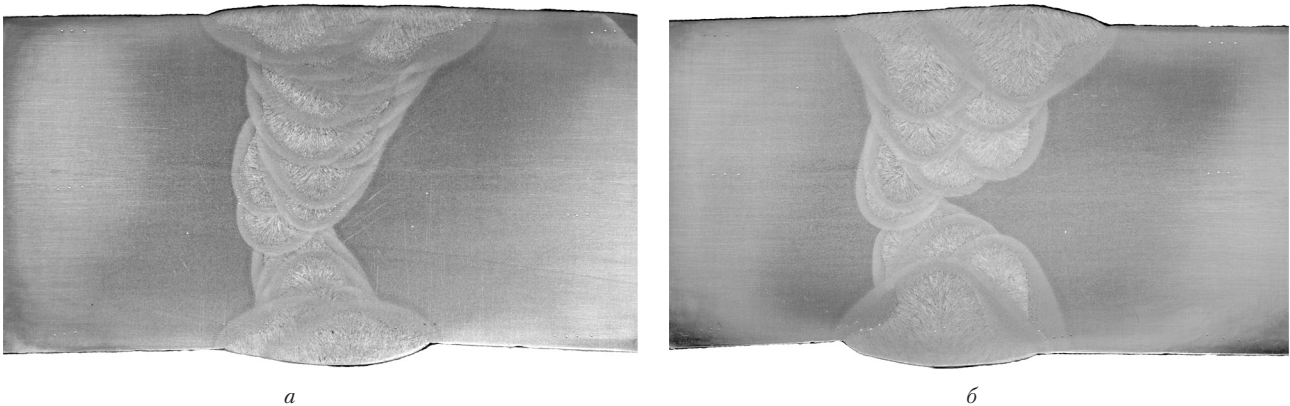


Рис. 4. Макроструктура опытных сварных соединений:
 а) $q_{н} \approx 2,5 \text{ кДж/мм}$; б) $q_{н} \approx 4,2 \text{ кДж/мм}$ ($\times 1,5$)

После сварки сварные соединения испытывали на растяжение и ударный изгиб. Испытания на растяжение выполняли на цилиндрических образцах диаметром 14 мм с линейной базой, равной пяти диаметрам. Результаты исследований представлены в табл. 1. Учитывая тот факт, что цилиндрические образцы на

растяжение включали в себя участки металла с различными свойствами (ЗТВ, основной металл, металл шва), достоверным значением является только временное сопротивление основного металла, поскольку именно по нему произошло разрушение во всех случаях. Анализ полученных результатов показал, что

Таблица. 1

Результаты испытаний сварных соединений на растяжение ($d_{обр.} = 14$ мм)

Категория стали (погонная энергия)	Номер образца	Максимальная нагрузка при разрыве, P_{max} , N	Временное сопротивление, R_m , МПа	Нагрузка предела текучести, P_{eH} , N	Предел текучести, R_{eH} , МПа	Относительное удлинение, A_5 , %	Относительное сужение, Z , %
$E (q_{II} \approx 2,5$ кДж/мм)	1-1	67237	437	43638	284	22,7	72,8
	1-2	67390	438	38228	248	25,1	72,0
$E (q_{II} \approx 4,2$ кДж/мм)	2-1	67237	437	42608	277	23,6	70,5
	2-2	66775	434	45700	297	разрушился на керне	73,5

Примечание: все образцы разрушились по основному металлу.

свойства сварных соединений соответствуют квалификационным требованиям к свойствам стали категории E (Т-ориентация).

Для более детального изучения свойств различных зон сварных соединений нами были проведены замеры

твердости по методу Виккерса (HV_5). Схема расположения точек замеров твердости показана на рис. 5. Результаты замеров твердости показаны на рис. 6.

Анализ результатов замеров твердости показал, что в ЗТВ сварных соединений происходит упрочне-

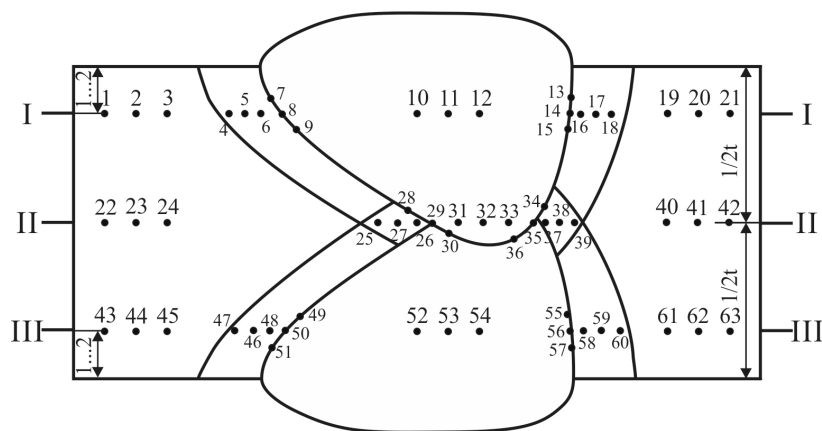


Рис. 5. Схема расположения точек замеров твердости в сварных соединениях по Виккерсу HV_5

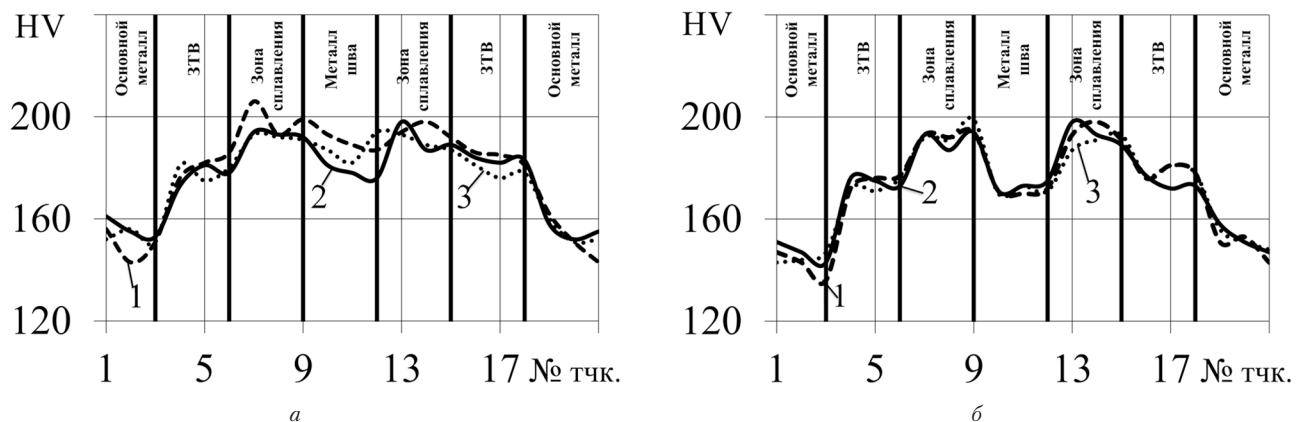


Рис. 6. Распределение твердости в сварных соединениях: а) $q_{II} \approx 2,5$ кДж/мм; б) $q_{II} \approx 4,2$ кДж/мм (1 – сечение I; 2 – сечение II; 3 – сечение III)

ние основного металла и, при этом, наблюдается хорошая корреляция твердости по толщине проката. Увеличение погонной энергии сварки с 2,5 кДж/мм до 4,2 кДж/мм оказывает не значительное влияние. Сравнение расчетной и действительной твердости ЗТВ показывает, что наблюдается высокая степень совпадения. Например, для погонной энергии сварки 2,5 кДж/мм расчетная твердость металла ЗТВ составляет 184 HV (см. рис. 1, а), а средняя действительная твердость находится на уровне 180 HV (см. рис. 6, а). В данном случае, погрешность расчета составляет +2,2%. Для погонной энергии сварки 4,2 кДж/мм расчетная твердость металла ЗТВ составляет 164 HV (см. рис. 1, а), а средняя действительная твердость находится на уровне 175 HV (см. рис. 6, б). В этом случае, погрешность расчета составляет – 6,7%. Таким образом, наблюдается высокая степень корреляции расчетных и действительных результатов замеров твердости металла ЗТВ сварных соединений стали категории Е.

Известно, что твердость является показателем прочности металла. В этой связи, зная реальные показатели твердости можно, пользуясь общепринятыми зависимостями предела прочности металла от его твердости [2], определить свойства различных участков сварного соединения. При этом достигается удовлетворительная погрешность. Так, например, минимальное значение твердости основного металла для погонной энергии сварки 2,5 кДж/мм равно 143 HV (см. рис. 6, а), что соответствует пределу прочности 480 МПа [2]. Фактическое значение 437 МПа (см. табл. 1). В данном случае, расчетная погрешность не превышает 9,8%. Для погонной энергии сварки 4,2 кДж/мм минимальное значение твердости основного металла равно 136 HV (см. рис. 6, б), что соответствует пределу прочности 465 МПа [2]. Фактическое значение 434 МПа (см. табл. 1). В этом случае, погрешность определения предела прочности металла по его твердости не превышает 7,1%. Таким образом, можно с достаточной степенью точности

определить прочность различных участков металла сварного соединения по его реальной минимальной твердости. При этом, как правило, твердость участков ЗТВ практически всегда выше твердости основного металла, поскольку скорости охлаждения при сварке выше, чем при прокатке и это обеспечивает более высокие прочностные характеристики металла ЗТВ относительно основного металла. Таким образом, зная точный химический состав стали, можно, пользуясь приведенными зависимостями, с достаточно высокой степенью точности выполнить первичную оценку свойств ЗТВ стали (R_m , R_{eH} , A_5 , Z , HV) в зависимости от условий охлаждения сварного соединения в процессе сварки.

Пластичность металла ЗТВ и особенно его ударная вязкость, зависит не только от условий охлаждения в процессе сварки, температуры испытаний, формы надреза, количества и морфологии неметаллических включений, концентрации растворенных газов, примесей, структурного состояния металла, величины зерна, чистоты границ зерен, но и других множественных факторов. В этой связи, многочисленные известные математические модели не позволяют с высокой степенью достоверности определять работу удара (ударную вязкость) металла ЗТВ [3].

Для определения показателей ударной вязкости ЗТВ были проведены комплексные испытания на ударный изгиб различных зон сварного соединения (Т-ориентация). Для каждого сварного соединения испытывали по пять комплектов стандартных образцов (состоящих из 3 образцов с V-образным надрезом для испытания на ударный изгиб по Шарпи). При этом, надрез располагался по металлу шва, на линии сплавления и на расстоянии 2, 5 и 20 мм от линии сплавления. Образцы вырезались со стороны прямолинейной кромки сварного соединения (см. рис. 4). Испытания проводили при температуре –40 °С. Распределение средней работы удара в различных зонах опытных сварных соединений показано на рис. 7.

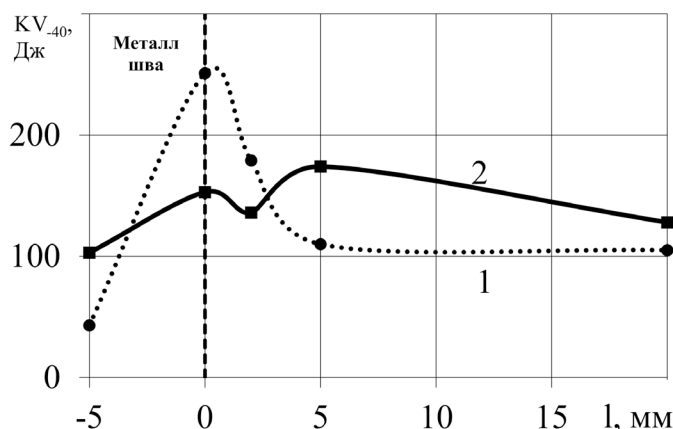


Рис. 7. Средняя работа удара различных зон сварных соединений (Т-ориентация):

1 – $q_{II} \approx 2,5$ кДж/мм; 2 – $q_{II} \approx 4,2$ кДж/мм

Анализ полученных результатов показал, что минимальные значения во всех случаях превосходят регламентированный показатель работы удара для стали категории E – $KV_{T-40} \geq 20$ Дж. Однако, наблюдается существенная анизотропия свойств различных участков ЗТВ. Кроме того, в каждой зоне сварного соединения диапазон действительных значений имеет отклонение в пределах $30 \pm 500\%$, что катастрофически снижает коэффициент корреляции получаемых данных и делает невозможным точное прогнозирование значений работы удара металла ЗТВ. Таким образом, результаты испытаний подтвердили низкую стабильность значений работы удара металла ЗТВ сварных соединений проката большой толщины из стали категории E (T-ориентация). При этом, наибольший разброс значений характерен для участка металла на расстоянии 2–5 мм от линии сплавления, что, вероятно, объясняется формированием в этой области наиболее нестабильной структуры с максимальным отрицательным влиянием растворенных в металле газов и примесей.

Расчетный показатель работы удара для образцов с полукруглым надрезом для погонной энергии сварки 2,5 кДж/мм составляет $KU_{+20} = KCU_{+20} \times S_{обр.} = 109$ (Дж/см²) \times 0,8 (см²) \approx 87 Дж, а для погонной энергии сварки 4,2 кДж/мм – $KU_{+20} = KCU_{+20} \times S_{обр.} = 108$ (Дж/см²) \times 0,8 (см²) \approx 86 Дж (см. рис. 1, б), что существенно отличается от реальных показателей (см. рис. 7). В этой связи, аналитические методы оценки работы удара ЗТВ по химическому составу, с учетом условий охлаждения сварного соединения, не обеспечивают удовлетворительную корреляцию расчетных и действитель-

ных данных и не могут быть рекомендованы для оценки свойств металла ЗТВ сварных соединений листового проката большой толщины из стали категории E.

Выводы

1. Аналитические методы расчета механических характеристик высокотемпературных участков ЗТВ (R_m , R_{eH} , A_5 , Z и HV) по химическому составу, с учетом скорости охлаждения сварных соединений, обеспечивают достаточную степень достоверности и могут быть использованы для первичной оценки свойств металла ЗТВ сварных соединений листового проката большой толщины стали категории E.

2. Методы аналитической оценки ударной вязкости металла ЗТВ, особенно при низких температурах, не могут быть использованы для достоверной оценки свойств сварных соединений листового проката большой толщины стали категории E.

Литература

- [1] Основы технологии сварки низколегированных высокопрочных сталей / Г.В. Егоров, Г.В. Ермолаев, В.Ф. Квасницкий, В.В. Квасницкий, В.А. Мартыненко, Л.П. Кравченко. – Николаев: НУК, 2014. – 113 с.
- [2] Лебедев Б.Д. Расчетные методы в сварке плавлением: Учебн. пособие / Б.Д. Лебедев, В.В. Перемитько. – Днепропетровск: Изд-во ДГТУ, 1998. – 258 с.
- [3] ISO 18265:2013. Metallic materials – Conversion of hardness values. Publ., 2014-02. 96 p.

Kostin A. M.¹, Martynenko V. A.¹, Kvasnytskyi V. V.²

¹ National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov. Ukraine, Mykolayiv

² National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute». Ukraine, Kiev

EVALUATION OF WELDABILITY FOR HEAVY THICKNESS STEEL FLAT OF CATEGORY E

In this study, based on the analyses of the results of complex mechanical tests for welded joints of 50 mm steel flat carried out in compliance with the requirements of the Rules of Classification Societies (BV, LR, DNV, GL, ABS etc.), we examined the possibility of application to steel of category E of analytical methods for estimating qualities of high temperature sections of heat affected zone. It is shown that estimation of strength properties (R_m , R_{eH} , A_5 , Z , HV) based on chemical composition with account for speed of cooling down ensures sufficient level of accuracy for practical use. Impact work (KV) is not subject to evaluation, especially at low temperatures.

Keywords: steel of category E; evaluation of weldability; analytical methods for estimating; mechanical properties; impact resistance; hardness.

References

- [1] Osnovy tekhnologii svarki nizkolegirovannykh vysokoprochnykh staley / G.V. Yegorov, G.V. Yermolaev, V.F. Kvasnytskyi, V.V. Kvasnytskyi, V.A. Martynenko, L.P. Kravchenko. — Nikolaev: NUK, 2014. — 113 p.
- [2] Lebedev B.D. Raschetnye metody v svarke plavleniem: Uchebn. posobie / B.D. Lebedev, V.V. Peremitko. — Dneprodzerzhinsk: Izd-vo DGTU, 1998. — 258 p.
- [3] ISO 18265:2013. Metallic materials — Conversion of hardness values. Publ., 2014-02. 96 p.