



## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ ТИПА 35Л, ВЫПОЛНЕННЫХ МНОГОСЛОЙНОЙ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКОЙ

С. М. КОЗУЛИН<sup>1</sup>, И. И. ЛЫЧКО<sup>1</sup>, Г. С. ПОДЫМА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup> НТУУ «Киевский политехнический институт». 03056, г. Киев, ул. Дашавская, 6/2. E-mail: meganom8@ukr.net

При многослойной электрошлаковой сварке тепло, выделяющееся в процессе выполнения каждого последующего слоя, воздействует на ранее заваренные участки разделки, производя их частичную термообработку и улучшая механические свойства. Цель работы — изучение влияния термического цикла на структуру и механические свойства сварного соединения при многослойной электрошлаковой сварке плавящимся мундштуком. Выполнены замеры термических циклов металла зоны термического влияния. Для изучения влияния эффекта автотермообработки на структуру и свойства сварных соединений проведены исследования, включающие макро- и микроанализ слоев сварных швов и их зоны термического влияния, а также механические испытания характерных участков сварных соединений. Установлено, что в зоне перегрева основного металла, не подвергавшегося повторному нагреву, величина зерна достигает  $N^2$  и  $N^1$  по ГОСТ 5639–82, а в зонах повторного нагрева (автотермообработки) —  $N^7$  и  $N^8$ . Твердость металла слоев и участков зоны термического влияния, подвергавшихся повторному нагреву, в среднем на 20 % ниже, чем участков зоны термического влияния с основным металлом, не подвергавшихся повторному нагреву. Показано, что при многослойной электрошлаковой сварке последовательно от одного края стыка к другому объем автотермообработки слоев многослойного электрошлакового шва достигает 38,4 %. При многослойной электрошлаковой сварке с наложением слоев от середины стыка к его краям, объем автотермообработки первого (центрального) слоя достигает 87 %, а остальных (за исключением наружных слоев) — 30...43 %. Установлено, что ширина зоны термического влияния мало зависит от удельной погонной энергии в исследуемом диапазоне ее значений. Библиогр. 19, рис. 10.

*Ключевые слова:* многослойная электрошлаковая сварка, термический цикл, автотермообработка, зона термического влияния, механические свойства, ударная вязкость

Качество сварного соединения в значительной мере зависит от структуры и свойств металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ), которые определяются термическим циклом [1]. Помимо плавления и кристаллизации металла шва изменение температуры приводит к структурным превращениям, объемным изменениям, упруго-пластическим деформациям материала изделия, что при неблагоприятном термическом цикле в ЗТВ для углеродистой и легированной сталей вызывает появление хрупких закалочных структур, обуславливающих повышенную склонность металла этой зоны к трещинам и хрупкому разрушению сварного соединения в целом [2]. Поэтому при сварке углеродистых конструкционных сталей ставится задача получения равнопрочного сварного соединения.

Для термического цикла ЗТВ при электрошлаковой сварке (ЭШС) характерным является замедленный нагрев этой зоны, длительная выдержка ее при температурах перегрева и медленное последующее охлаждение в области температур перлитного, промежуточного и мартенситного превращений [2]. При многослойной электрош-

лаковой сварке (МЭШС) тепло, выделяющееся в процессе выполнения каждого последующего слоя, воздействует на ранее заваренные участки разделки, производя их частичную термообработку и улучшая механические свойства [3–5]. Это же тепло создает предварительный подогрев основного металла в незаваренной части разделки и снижает скорость охлаждения заваренной части стыка, что, как известно, создает благоприятные условия для ЭШС сталей с повышенным содержанием углерода. Исследования показали [5], что термические циклы металла ЗТВ при МЭШС имеют сложный характер и напоминают термический цикл металла при многослойной ручной сварке [1].

ЭШС, в отличие от известных способов сварки плавлением, характеризуется наиболее высокими погонными тепловложениями на единицу толщины свариваемого стыка [3], что приводит к резкому увеличению ширины ЗТВ и росту зерна в ней, зоны остаточных напряжений, а также большим деформациям. Это значительно влияет на точность геометрических размеров изделия после его восстановления. С увеличением толщины свариваемого металла сложнее уменьшать негативное воздействие указанных явлений на качество сварного соединения из-за увеличения объема



жидкой шлаковой и металлической ванн. Поэтому применение МЭШС можно считать более предпочтительным процессом для обеспечения качества сварного соединения, особенно при ремонте дорогостоящих крупногабаритных изделий, где важно сохранить их конструктивные размеры [4, 6–8].

Известно, что перекристаллизация структуры металла при нагреве выше критических точек приводит к измельчению зерна на участках перегрева ЗТВ и шва, а также снижению концентрации легирующих элементов и примесей на границах зерен [9]. В металле каждого предыдущего слоя наблюдается ЗТВ от наложения последующего слоя. В процессе выполнения каждого последующего слоя тепло, выделяющееся в зоне сварки, термообработывает металл предыдущего слоя и ЗТВ [4, 10]. Сведения о характере такой термообработки, ее влиянии на структуру и свойства сварных соединений при ЭШС пробковыми швами круглых несковозных отверстий диаметром 60 мм и глубиной 100 мм изложены в работе [5]. Показано, что ударная вязкость наплавленного металла, подвергавшегося сопутствующей нормализации, повышается в два раза, а участка перегрева ЗТВ, подвергавшегося перекристаллизации, увеличивается в 2,5...3 раза по сравнению с наплавленным металлом и ЗТВ последнего шва, которые не подвергались автотермообработке. На участках зоны перегрева, подвергавшихся нагреву в межкритическом интервале температур  $A_{c_1} - A_{c_3}$ , ударная вязкость повысилась в 1,5 раза.

Учитывая нетрадиционную форму разделки кромок для исследуемого способа МЭШС [11] и наличие не одного, а двух тепловых центров в шлаковой ванне [12], возникла необходимость изучения влияния эффекта автотермообработки на структуру и механические свойства сварных соединений сталей типа 35Л. Проведены исследования, включающие эксперименты с замером термических циклов металла ЗТВ, макро- и микроанализ слоев сварных швов и их ЗТВ, а также механические испытания характерных участков сварных соединений.

Один из образцов размером 290×940×520 мм из стали марки 34Л-ЭШ, которая широко применяется для изготовления электрошлаковым литьем вварных бандажей вращающихся печей [13], был заварен за четыре прохода двухэлектродным плавящимся мундштуком. МЭШС выполняли с удельной энергией  $E_{св} = 110...170$  кДж/см<sup>2</sup>. Заварку отверстий преднамеренно выполняли без предварительного подогрева образца. Замеры термических циклов осуществляли по методике, описанной в работе [3], с помощью шестиканального самопишущего прибора КСП-4 (рис. 1, а). Использовали вольфрамниевые термопары марки ВР 5/20, которые устанавливали по оси прямо-

угольных отверстий разделки кромок под МЭШС на равноудаленном расстоянии от края одной из свариваемой кромок (рис. 1, б). Результаты замеров термических циклов металла ЗТВ приведены на рис. 2. Анализ термических циклов показал, что скорости охлаждения металла ЗТВ каждого слоя в интервале температур 600... 500 °С ( $w_{6/5}$ ) не превышают критических значений для стали 35Л [14], а также уменьшаются по мере наложения слоев  $N$  (рис. 2, б). Согласно диаграмме структурных составляющих металла ЗТВ, приведенной в работе [15], опасность образования мартенсита в этой зоне отсутствует. Однако в начале выполнения первого слоя, т. е. при неустановившемся электрошлаковом процессе, происходит ускоренное охлаждение металла, что в условиях повышенной жесткости закрепления свариваемых кромок может привести к появлению трещин-отколов и трещин-надрывов [10, 16]. Эффективным средством предупреждения таких трещин для сталей, у которых углеродный эквивалент  $S_{эжв} > 0,5$ , является предварительный и сопутствующий подогрев свариваемых кромок до температуры 150...200 °С [10]. При МЭШС сопутствующий подогрев свариваемых кромок можно не

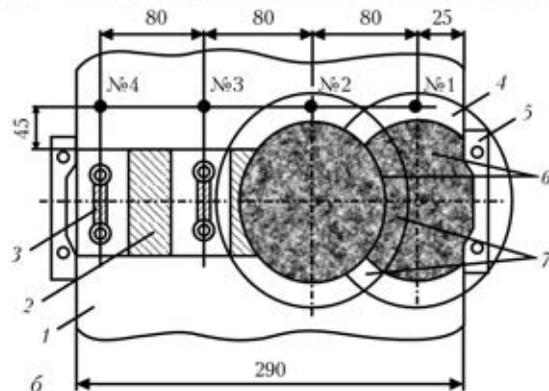
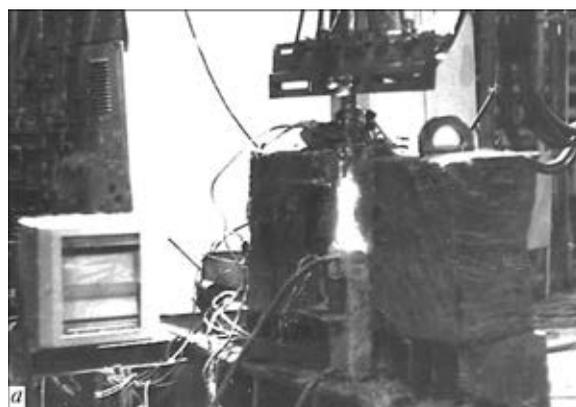


Рис. 1. Фрагмент измерения термических циклов металла ЗТВ (а) и схема размещения термопар в образце из стали 34Л-ЭШ (б): 1 — свариваемая кромка; 2 — формирующая пластина; 3 — плавящийся мундштук; 4 — ЗТВ; 5 — водоохлаждаемая накладка; 6 — слои многослойного электрошлакового шва; 7 — зоны повторного нагрева (автотермообработки); № 1 ... 4 — порядковые номера точек установки термопар

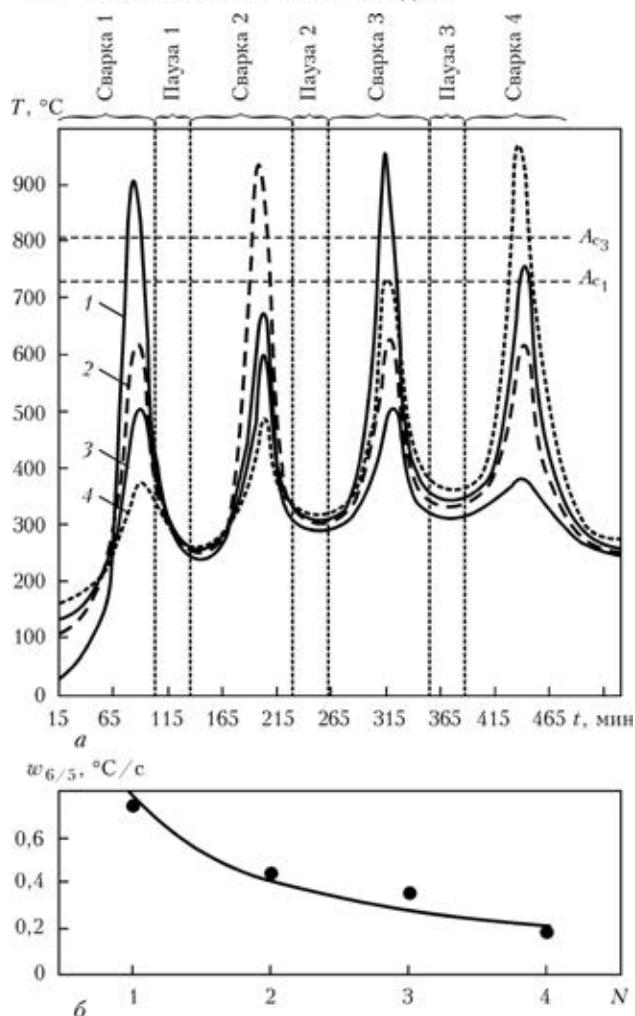


Рис. 2. Термические циклы металла ЗТВ при выполнении МЭШС плавящимся мунштуком (а) и зависимость скорости охлаждения металла ЗТВ от количества выполненных слоев шва (б): 1–4 — термические циклы металла ЗТВ, соответствующие номерам термопар;  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  — температуры критических точек

делать, так как в процессе сварки периодический подогрев свариваемого изделия происходит за счет тепла, выделяющегося при выполнении предыдущих слоев (рис. 2, а).

При проведении анализа обнаружена многослойная макроструктура шва, для которой характерна столбчатая кристаллизация с преимущественным развитием осевых кристаллов. В первом слое шва обнаружены тонкие кристаллы, малого сечения, а также встречаются равноосные кристаллы. Во втором слое кристаллы вытянутые, у зоны сплавления укрупненные. В третьем слое обнаружены более крупные кристаллы, ветвистые. В четвертом слое наблюдаются самые крупные ветви кристаллов. Такое строение кристаллов характерно для электрошлаковых процессов. В исследуемом случае изменение формы кристаллов в последовательности выполнения слоев многослойного шва вызвано постепенным теплонасыщением образца и соответственным уменьшением

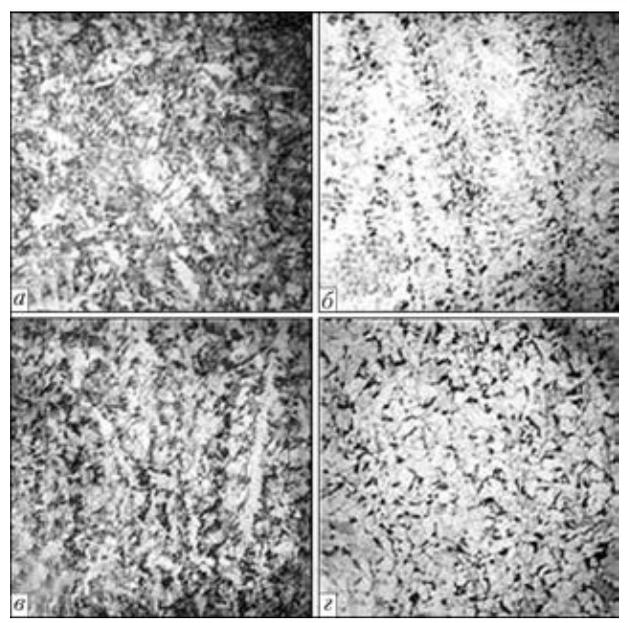


Рис. 3. Микроструктуры ( $\times 100$ ) границ раздела ЗТВ и наплавленного металла (сталь 34Л-ЭШ): а–в — 1–3-го слоев; г — металл 2-го, подвергавшийся повторному нагреву выше температуры точки  $A_{c3}$  при выполнении 3-го

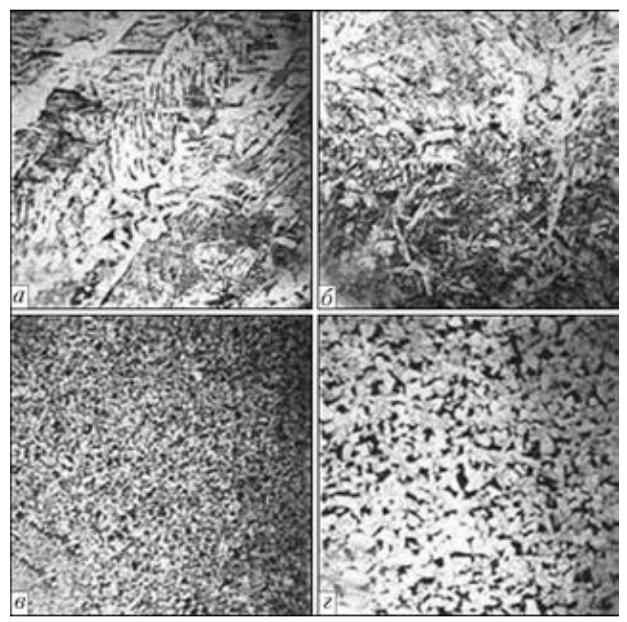


Рис. 4. Микроструктуры ( $\times 100$ ) основного и наплавленного металла слоев многослойного шва, выполненного МЭШС (сталь 35Л): а — наплавленный металл; б — зона сплавления; в — наплавленный металл слоя, подвергавшийся повторному нагреву выше температуры точки  $A_{c3}$ ; г — основной металл

скорости охлаждения кристаллизующегося металла слоев.

Исследование микроструктуры металла слоев многослойных электрошлаковых швов показало, что в зоне перегрева основного металла, не подвергавшегося повторному нагреву, величина зерна достигает  $N^2$  и  $N^1$  по ГОСТ 5639–82 (рис. 3, а–в). В зонах повторного нагрева (автотермообработки) величина зерна соответствует  $N^7$  и  $N^8$  (рис. 3, г, рис. 4, в).

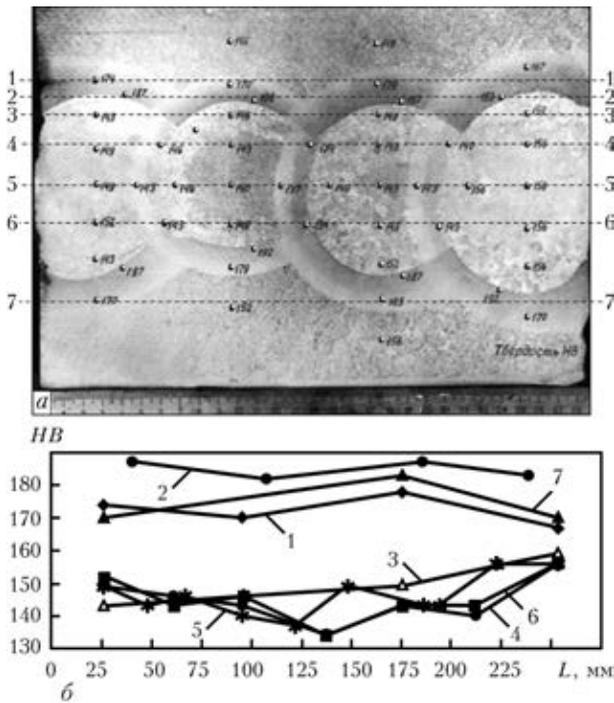


Рис. 5. Макроструктура поперечного сечения многослойного электрошлакового шва на глубине 120 мм от поверхности образца из стали 34Л-ЭШ (а) и характер изменения твердости по его зонам (б): 1, 2 и 7 — линии замеров твердости по зонам перегрева слоев шва; 3 — то же в периферийных частях слоев, 4–6 — то же по центру многослойного шва

Анализ микро- и макроструктур показал, что аналогично данным, приведенным в работе [5], одни части предыдущих слоев и их ЗТВ при выполнении последующих нагревались выше температуры, соответствующей точке  $A_c$ , т. е. проходили термообработку в виде нормализации, а другие проходили термообработку в межкритическом интервале температур  $A_c - A_{c_3}$ .

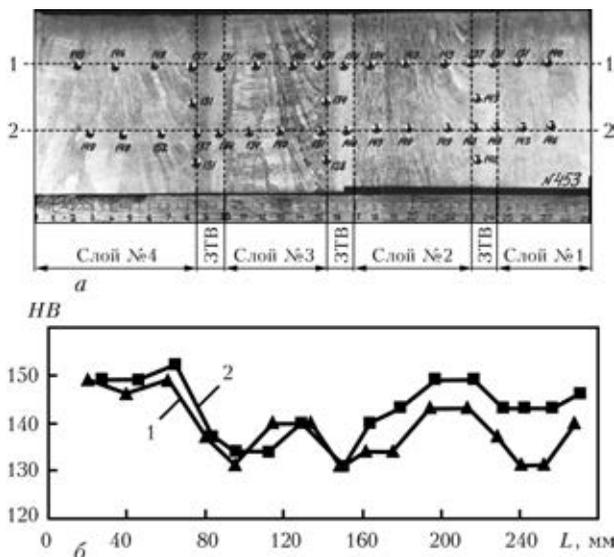


Рис. 6. Макроструктура центральной части продольного сечения многослойного электрошлакового шва на образце из стали 34Л-ЭШ (а) и характер изменения твердости по его зонам (б): 1 и 2 — линии замеров твердости; №1...4 — последовательность выполнения слоев шва

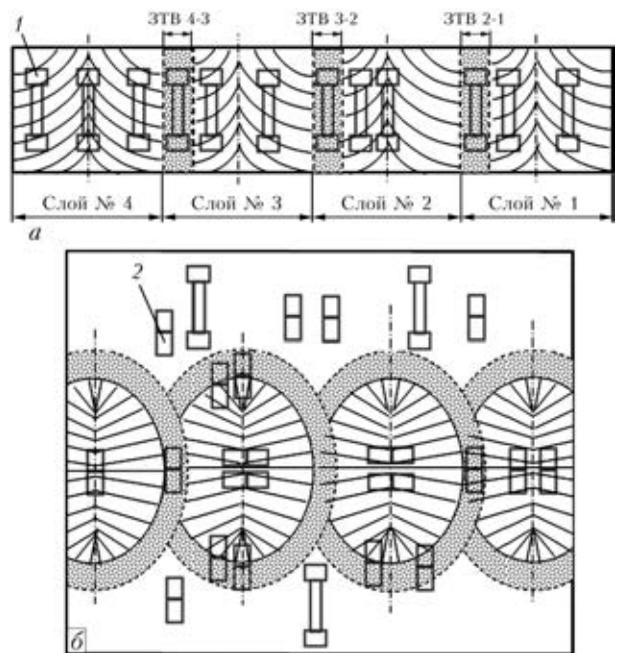


Рис. 7. Схема вырезки образцов для проведения механических испытаний сварных соединений, выполненных МЭШС: а — продольный; б — поперечный темплет многослойного электрошлакового шва; 1, 2 — образцы для испытаний на статическое растяжение («гагаринские») и ударный изгиб («менаже») соответственно

Для оценки влияния эффекта автотермообработки на изменение твердости металла сварного соединения производили ее замеры по участкам перегрева ЗТВ между основным и наплавленным металлом, а также по центру наплавленного металла. Анализ полученных результатов показал, что характер изменения твердости металла многослойных электрошлаковых швов имеет общую закономерность. На рис. 5 и 6 показано изменение твердости в характерных зонах поперечного и продольного сечений многослойного электрошлакового шва. Видно, что твердость на участке перегрева каждого слоя, не подвергавшегося повторному нагреву, достигает максимальной величины соответствующей твердости зоны перегрева последнего слоя (рис. 5, линии замеров 1, 2 и 7). Участки, подвергавшиеся автотермообработке и расположенные в центральной части многослойного шва, имеют наименьшие значения твердости, которые фактически соответствуют твердости основного металла (рис. 5, линии замеров

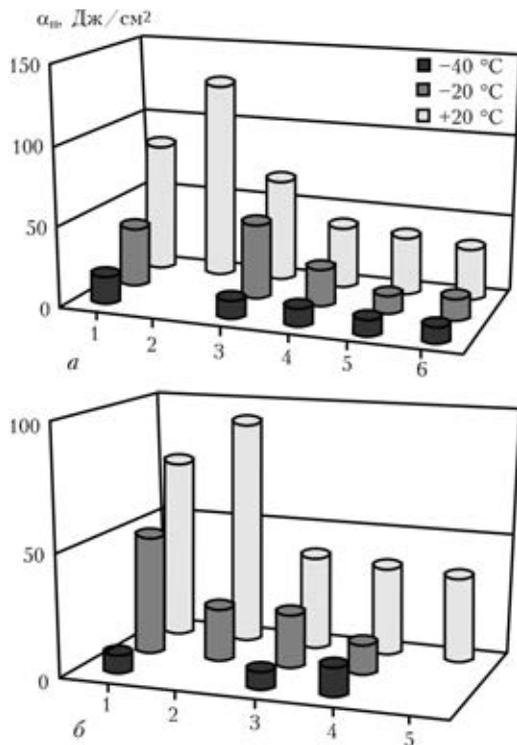


Рис. 8. Ударная вязкость сварных соединений и основного металла: а — сталь 35Л (1 — наплавленный металл; 2 — ЗТВ в наплавленном металле; 3 — зона перегрева на расстоянии 0,75... 3,0 мм от линии сплавления; 4 — зона нормализации на расстоянии 10...15 мм от линии сплавления; 5 — основной металл; 6 — ГОСТ 977-88); б — сталь 34Л-ЭШ (1 — наплавленный металл; 2 — ЗТВ в наплавленном металле; 3 — зона нормализации на расстоянии 8...12 мм от линии сплавления; 4 — основной металл; 5 — ТУ 22102-61-81)

3–6). Разница между значениями твердости на участке перегрева и центральной части наплавленного металла составляет в среднем  $HВ$  20...30. Твердость наплавленного металла в слоях многослойного шва, подвергавшихся повторному нагреву, изменяется с одинаковой разницей значений ( $HВ$  5...10) и имеет меньшую величину по сравнению с твердостью металла последних выполненных слоев, не подвергавшихся повторному нагреву (рис. 6). Установлено, что твердость металла слоев и участков ЗТВ, подвергавшихся повторному нагреву в среднем на 20 % ниже, чем участков ЗТВ с основным металлом, не подвергавшихся повторному нагреву.

Для определения механических свойств многослойных сварных соединений из образцов были вырезаны поперечные и продольные темплеты толщиной 50 мм. Образцы для проведения испытаний характерных участков сварных соединений на растяжение и ударный изгиб (ГОСТ 6996-66) вырезали согласно схемам, показанным на рис. 7. Результаты испытаний показали, что прочностные характеристики сварных соединений сталей 35Л и 34Л-ЭШ, заваренных МЭШС, в целом соответствуют требованиям нормативной документации [19]. Пластичность металла слоев швов

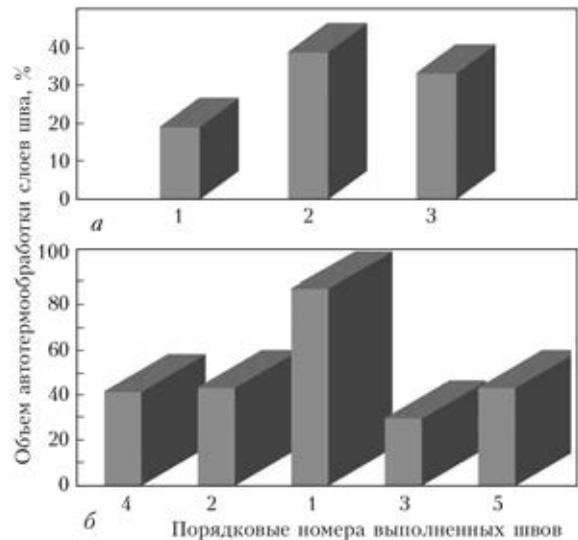


Рис. 9. Зависимость объемов автотермообработки слоев многослойного электрошлакового шва от порядка их выполнения: а — последовательно от одного края стыка к другому; б — то же от середины стыка к краям

имеет повышенные значения, особенно в зонах подвергавшихся сопутствующей автотермообработке. Результаты испытаний сварных соединений на ударный изгиб показали следующее. Ударная вязкость  $\alpha_n$  в зонах наплавленного металла, прошедших сопутствующую автотермообработку, превышает значения результатов испытаний основного металла, а также нормативные требования, в 2...4 раза (рис. 8). Значения  $\alpha_n$  металла в ЗТВ слоев шва на границе сплавления с основным металлом соответствуют результатам испытаний основного металла.

Для количественной оценки действия эффекта автотермообработки на металл и соответствующие ЗТВ выполненных слоев были проведены замеры ширины ЗТВ, а также площадей зон, прошедших повторный нагрев. Измерения осуществляли следующим образом. Сканированные фотографии поперечных макрошлифов помещали на рабочий стол компьютерной программы «КОМПАС-3D V8» с соблюдением масштаба. Затем по визуально наблюдаемым линиям сплавления и границам ЗТВ строили замкнутые кривые Безье, с помощью которых определяли площади исследуемых участков с точностью 0,01 мм<sup>2</sup>. Установлено, что при МЭШС последовательно от одного края стыка к другому объем автотермообработки слоев многослойного электрошлакового шва достигает 38,4 % (рис. 9). При МЭШС с наложением слоев от середины стыка к его краям, объем автотермообработки первого (центрального) слоя достигает 87 %, а остальных (за исключением наружных слоев) — 30...43 %. Следовательно, для повышения качества сварного соединения, полученного с применением МЭШС, наиболее предпочтительным является прием наложения слоев взброс от середины стыка к его краям.

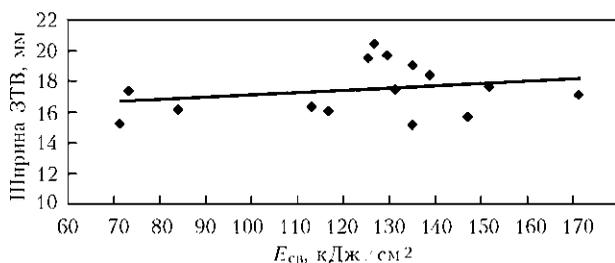


Рис. 10. Зависимость ширины ЗТВ от удельной энергии МЭШС

Проведенные замеры показали, что ширина ЗТВ постепенно увеличивается в направлении от первого слоя к последнему и достигает 14...20 мм. Ширина ЗТВ наружных (последних выполненных) слоев достигает 22,6 мм, что объясняется наличием краевого эффекта [1].

Для оценки влияния удельной энергии МЭШС на ширину ЗТВ построена зависимость (рис. 10), из которой следует, что ширина ЗТВ мало зависит от  $E_{св}$  в исследуемом диапазоне ее значений. Полученную зависимость можно использовать для прогнозирования объемов автотермообработки слоев многослойного шва.

**Выводы**

1. Установлено, что в результате действия эффекта автотермообработки слоев многослойного шва происходит перекристаллизация структуры, способствующая измельчению зерна на участке перегрева ЗТВ и слоев шва.

2. Механические испытания характерных участков сварных соединений, выполненных МЭШС, показали, что в этих зонах произошло улучшение механических свойств. Ударная вязкость  $\alpha_n$  в зонах наплавленного металла, прошедших сопутствующую автотермообработку, превышает значения результатов испытаний основного металла, а также нормативные требования, в 2...4 раза. Значения  $\alpha_n$  металла в ЗТВ слоев шва на границе сплавления с основным металлом соответствуют результатам испытаний основного металла.

Таким образом, в процессе ремонта разрушившихся деталей на месте их эксплуатации с помощью МЭШС можно ограничиться проведением местного высокого отпуска, что наиболее важно при выполнении таких работ в монтажно-полевых условиях.

3. Ширина ЗТВ мало зависит от удельной погонной энергии процесса в исследуемом диапазоне ее значений. Показано, что ширина ЗТВ

увеличивается в направлении от первого слоя к последующим и достигает 14...20 мм.

1. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1954. — 296 с.
2. Макара А. М., Готальский Ю. Н. Исследование термического цикла околошовной зоны при электрошлаковой сварке в связи с задачей сварки закаляющихся сталей // Автомат. сварка. — 1955. — № 5. — С. 25–32.
3. Суцук-Слюсаренко И. И. Компенсация деформаций при электрошлаковой сварке // Там же. — 1964. — № 1. — С. 28–33.
4. Суцук-Слюсаренко И. И. Электрошлаковая сварка и наплавка. — М.: Изд-во ВИНТИ. — Т.9. — 81 с.
5. Фильченков Д. И., Козулин М. Г. Расчет термического цикла для металла околошовной зоны при электрошлаковой сварке пробковыми швами // Свароч. пр-во. — 1979. — № 1. — С. 1–2.
6. Электрошлаковая сварка и наплавка в ремонтных работах / И. И. Суцук-Слюсаренко, И. И. Лычко, М. Г. Козулин, В. М. Семенов. — Киев: Наук. думка, 1989. — 112 с.
7. Суцук-Слюсаренко И. И., Вергела А. Г., Шевченко Н. Т. Электрошлаковая заварка трещин // Автомат. сварка. — 1969. — № 4. — С. 72–73.
8. Козулин С. М., Лычко И. И. Деформации сварных соединений при многослойной электрошлаковой сварке // Там же. — 2011. — № 1. — С. 26–31.
9. Землин В. Н., Шрон Р. З. Термическая обработка и свойства сварных соединений. — Л.: Машиностроение, 1978. — 367 с.
10. Электрошлаковая сварка / Под ред. Б. Е. Патона. — Киев: Машгиз, 1959. — 410 с.
11. Юценко К. А., Козулин С. М. Особенности технологии ремонта дефектов крупных деталей агрегатов машиностроения на месте их эксплуатации электрошлаковой сваркой // Материалы III науч.-техн. конф. «Сварочное производство в машиностроении: перспективы развития», 2–5 окт. 2012 г. / Под общ. ред. Н. А. Макаренко. — Краматорск: ДГМА, 2012. — С. 25–26.
12. Козулин С. М. Выбор формы разделки кромок при ремонте сквозных трещин многослойной электрошлаковой сваркой // Автомат. сварка. — 2011. — № 3. — С. 41–45.
13. Козулин С. М., Лычко И. И., Козулин М. Г. Методы восстановления бандажей вращающихся печей (Обзор) // Там же. — 2007. — № 10. — С. 40–47.
14. Попов А. А., Попова Л. Е. Справочник термиста. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита. — М.: Машгиз, 1961. — 430 с.
15. Шоршоров М. Х., Белов В. В. Фазовые превращения и изменение свойств стали при сварке. — М.: Наука, 1972. — 220 с.
16. Макара А. М., Ковалев Ю. Я., Новиков И. В. Надрывы в околошовной зоне при электрошлаковой сварке конструкционных сталей // Автомат. сварка. — 1972. — № 5. — С. 1–5.
17. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин и др. / Под общ. ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 640 с.
18. Лившиц Л. С. Металловедение для сварщиков. — М.: Машиностроение, 1979. — 253 с.
19. ГОСТ 9770–88. Отливки стальные. Общие технические условия. Межгосударственный стандарт. — Введ. 01.01.90.

Поступила в редакцию 30.05.2013