

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.791.92

Ю. А. ЦУМАРЕВ¹, Д. И. ЯКУБОВИЧ¹, Т. С. ЛАТУН¹, В. К. ШЕЛЕГ²

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ, СВАРЕННЫХ НА ВЕСУ

¹Белорусско-Российский университет,

²Белорусский национальный технический университет

(Поступила в редакцию 15.01.2010)

Стыковые соединения широко используются при изготовлении сварных конструкций во всех отраслях промышленности. Они находят применение при сварке металлов любой толщины благодаря своей экономичности и высоким показателям работоспособности. При этом наибольшее распространение получили односторонние сварные швы. Основная проблема сварки односторонних стыковых соединений без применения специальных средств для удержания сварочной ванны связана с провисанием выполняемых швов, уровень которого часто превышает значения, допускаемые стандартом. Это явление является особенно характерным для сварки на весу. Провисание сварного шва приводит к неравномерному распределению объема наплавленного металла и эксцентриситету его расположения относительно продольной оси сварного соединения.

Основными факторами, способствующими образованию провисания при выполнении швов на весу, являются сила давления дуги, зависящая от ее длины и силы сварочного тока, а также сила тяжести расплавленного металла [1, 2]. Последняя зависит от размеров сварочной ванны, определяющих объем расплавленного металла, на которые в свою очередь значительно влияет скорость сварки. Противодействуют этим силам в основном только силы поверхностного натяжения жидкого металла, стремящиеся удержать жидкий металл на весу и сохранить состояние равновесия. Опыт сварки стыковых соединений показывает, что с ростом сварочного тока и уменьшением скорости сварки ширина шва как со стороны дуги, так и со стороны корня шва увеличивается. Удлинение дуги и рост ее напряжения также делают шов более широким. Одновременно происходит изменение условий теплоотвода и распределения тепловой энергии по толщине свариваемых кромок. При этом часть шва, прилежащая к его корню, проявляет большую чувствительность к изменению параметров режима сварки по сравнению с областью, которая прилежит к лицевой части шва. Это обстоятельство также усиливает тенденцию к асимметричности сварного соединения.

Основными технологическими приемами снижения величины провисания выполняемых швов являются использование двусторонней сварки, различного рода подкладок с обратной стороны сварного шва, оптимизация режимов сварки и применение магнитных полей.

Однако применение двусторонней сварки невозможно при малых толщинах основного металла и сопряжено с увеличением трудоемкости процесса сварки. Кроме того, встречаются трудности с обеспечением двустороннего доступа, защиты обратной стороны стыка от воздействия атмосферного воздуха. Вспомогательные и основные операции по подготовке кромок к сварке повторяются дважды, требуется кантовка изделия.

Сварка стыковых соединений на подкладных устройствах позволяет проплавливать металл на всю толщину и предотвращать вытекание расплавленного металла сварочной ванны с обеспе-

чением качественного формирования корня шва. Для реализации этого приема необходим свободный доступ к корню шва. Кроме того, применение остающихся подкладок также делает сварное соединение несимметричным, так как центр тяжести сечения шва вместе с подкладкой смещается к его корню.

Оптимизация режимов сварки не позволяет радикальным образом решить рассматриваемую проблему, поскольку процессы, протекающие при формировании сварного соединения, сложные и зависят от многих факторов.

Использование магнитного поля основано на возможности эффективного управления глубиной проплавления [3] и позволяет в ряде случаев полностью исключить провисание шва. Однако применение электромагнитов приводит к усложнению технологического процесса сварки, дестабилизирует дуговой разряд, а в ряде случаев практическая реализация такого подхода невозможна.

Наиболее технологичным и экономически эффективным является стыковой шов, выполненный на весу за один проход с полным проплавлением изделия. При этом способе сварки полностью избежать провисания шва практически невозможно. Следовательно, большинство изделий эксплуатируется с нарушением равномерности сечения сварного соединения. Работоспособность таких соединений и последствия, к которым могут привести искажения сечения сварного соединения, изучены недостаточно.

Для исследования напряженного состояния нами было взято сварное соединение, имеющее выпуклую и вогнутую часть сварного шва, полученное и показанное авторами работы [2] в качестве примера, подтверждающего техническую эффективность специальной аппаратуры для сварки на весу (рис. 1). В [2] рассматриваются только особенности формирования сварного шва. Влияние формы сварного соединения на напряженное состояние не исследовалось. Полученная ими форма сварного соединения характерна для сварки на весу и обуславливает несимметричность растягивающей продольной нагрузки σ по отношению к сечению AB . В результате продольная растягивающая сила оказывается приложенной с эксцентриситетом $e = (C_1 + C_2) / 2$ относительно центра тяжести этого сечения, а рабочие напряжения σ дополняются напряжениями от изгиба, максимальная величина которых определится по формуле [4]

$$\sigma_{и} = M_{и} / W , \quad (1)$$

где $M_{и} = Pe = \sigma b \delta e = \sigma b \delta \frac{C_1 + C_2}{2}$ – изгибающий момент в сечении AB ; b – длина шва, равная ширине соединяемых пластин, δ, C_1, C_2 – размеры сварного шва, указанные на рис. 1; $W = b \frac{AB^2}{6}$ – момент сопротивления сечения AB .

При этом размер AB легко определится по данным рис. 1:

$$AB = \delta + C_2 - C_1 . \quad (2)$$

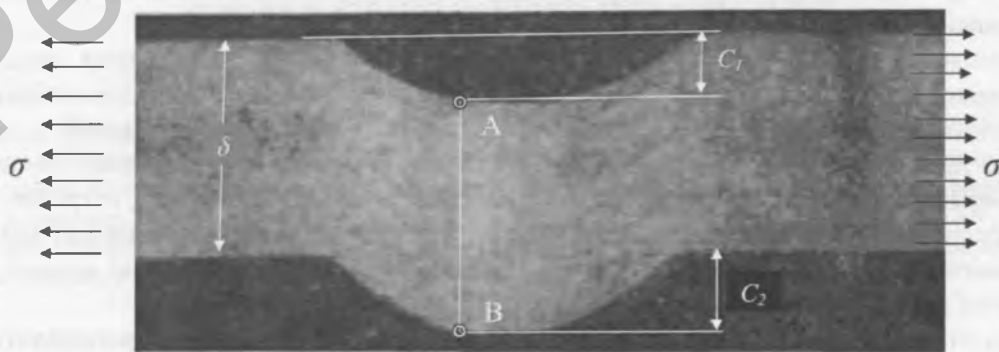


Рис. 1. Макроструктура стыкового соединения, сваренного встык без применения подкладок [2]

Максимальное значение суммарных напряжений от совместного действия приложенной растягивающей нагрузки σ и нормальных напряжений изгиба $\sigma_{\text{н}}$ будет иметь место в точке A и определится по формуле

$$\sigma_{\text{max}} = \sigma_A = \sigma_p + \frac{M_{\text{н}}}{W} = \sigma \frac{\delta}{AB} + \frac{\sigma b \delta (C_1 + C_2)}{2} \frac{6}{b(\delta + C_2 - C_1)^2}, \quad (3)$$

где σ_p – напряжения от приложенной растягивающей нагрузки.

После преобразования получим следующее выражение, позволяющее оценить влияние размеров провисания на величину максимальных напряжений:

$$\sigma_A = \sigma \left[\frac{\delta}{\delta + C_2 - C_1} + \frac{3\delta(C_1 + C_2)}{(\delta + C_2 - C_1)^2} \right] = \alpha \sigma, \quad (4)$$

где $\alpha = \frac{\delta}{\delta + C_2 - C_1} + \frac{3\delta(C_1 + C_2)}{(\delta + C_2 - C_1)^2}$ – безразмерный коэффициент, который показывает, во сколько

раз суммарные напряжения в точке A превышают уровень приложенных растягивающих напряжений σ .

Подставляя в формулу (4) геометрические размеры для сварного соединения, полученного в [2] по рекомендуемой авторами этой работы технологии, находим $\alpha = 2,82$. Таким образом, изгиб стыкового сварного соединения, обусловленный его несимметричностью, приводит к значительной перегрузке вогнутой части шва, а следовательно, в 2,82 раза снижает несущую способность соединения в целом.

Чтобы оценить влияние размеров шва на несущую способность стыкового соединения, сваренного на весу, упростим результат (4), полагая $C_1 = C_2 = C = k\delta$. Здесь k – безразмерный параметр, который позволяет выразить величину провисания в долях от толщины δ основного металла. Тогда выражение для расчета коэффициента α , характеризующего уровень максимальных напряжений в сварном шве, примет следующий вид:

$$\alpha = 1 + \frac{6\delta C}{\delta^2} = 1 + \frac{6C}{\delta} = 1 + 6k. \quad (5)$$

Формула (5) показывает, что концентрация напряжений, обусловленная провисанием одностороннего стыкового сварного шва, неограниченно возрастает с ростом относительной величины провисания k . Это указывает на большую опасность провисания и значительное отрицательное влияние его на работоспособность готовой конструкции.

С целью проверки приведенных результатов дополнительно был проведен расчет этого же соединения методом конечных элементов с привлечением пакета прикладных программ «COSMOS». Данные расчета показаны на рис. 2 в виде распределения нормальных напряжений, направленных параллельно растягивающей нагрузке σ , по поперечному сечению соединения.

Как и ожидалось, полученная картина распределения нормальных напряжений показала значительную концентрацию напряжений в центре вогнутой части сварного шва, испытывающей максимальное воздействие изгиба, обусловленного асимметричной формой сварного шва. При этом уровень максимальных напряжений составил 256,5 МПа, что в 3,2 раза превышает уровень приложенных растягивающих напряжений σ . Таким образом, расчет по методу конечных элементов выявил несколько большую концентрацию напряжений у наружной вогнутой поверхности сварного шва по сравнению с расчетом, основанным на формуле внецентренного растяжения. Это можно объяснить, основываясь на результатах работы [5], где было установлено, что выпуклая часть сварного шва, не имеющего провисания, загружена растягивающими напряжениями в меньшей степени, чем основной металл. Поэтому растягивающая нагрузка σ_p распределена неравномерно по сечению AB и большая ее часть также сосредоточена в окрестности точки A , что приводит к дополнительной перегрузке материала шва в этой опасной зоне.

Характерной особенностью распределения рабочих напряжений по сечению провисающего шва является отсутствие концентрации напряжений в местах перехода от выпуклой и вогнутой

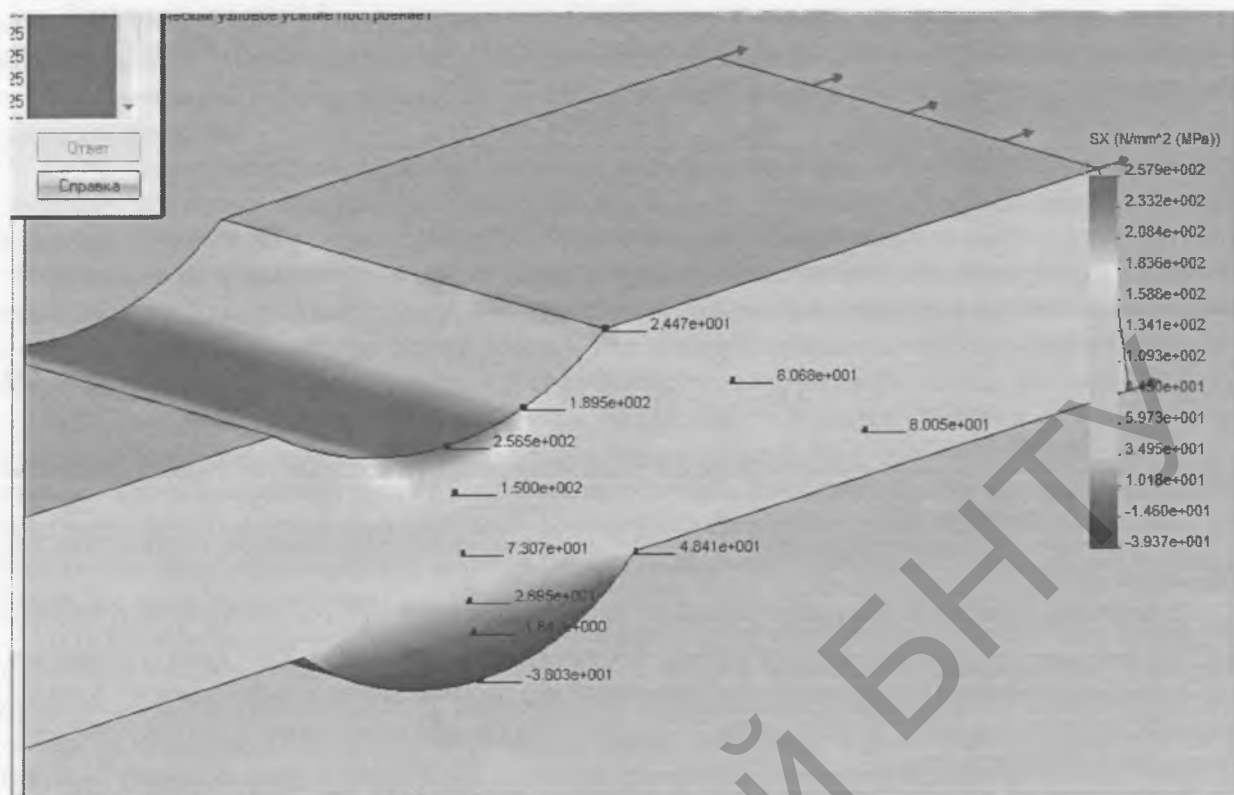


Рис. 2. Распределение нормальных рабочих напряжений в стыковом соединении, сваренном на весу

поверхностей к основному металлу соединяемых пластин. Уровень напряжений в соответствующих точках ниже уровня приложенных напряжений. При этом выпуклая часть шва находится в состоянии сжатия. Таким образом, в соединениях с провисанием сварных швов опасной является только концентрация напряжений, обусловленная асимметрией сварного соединения.

Одним из перспективных способов снижения, а в ряде случаев и полного устранения вогнутости сварного шва является применение поперечных колебаний плавящегося электрода относительно оси сварного шва. Вид и траектория этих колебаний зависят от соотношения их частоты и скорости сварки. При нулевой или малой амплитуде колебаний выделение тепла происходит вдоль оси шва с максимумом в его центре. При увеличении амплитуды и частоты колебаний происходит неравномерное выделение тепла в плоскости, перпендикулярной к оси шва.

Для исследования влияния колебаний были проведены эксперименты с использованием пластин толщиной 1 мм, на которые наплавлялись сварные швы без колебаний (участок *A*) и с колебаниями электрода (участок *B*) при амплитуде 2 мм и частоте 3 Гц. Параметры колебаний для всех толщин металла выбирались экспериментальным путем. Было установлено, что амплитуда колебаний до 1 мм не вносит существенных изменений в процесс образования сварного соединения. Перемещения электрода, соответствующие ей, не приводят к существенному изменению тепловложения в изделие и распределение температур. При большей амплитуде колебаний порядка 1,5–2 мм область соединения, нагреваемая дугой, будет увеличиваться и дуге при той же мощности придется нагревать большее количество металла. В результате уменьшится тепловложение на единицу площади и объема. Одновременно возрастает и теплопередача в металл, окружающий сварочную ванну. При увеличении амплитуды до значений 2,5–3 мм происходит ухудшение формирования сварного шва. Его форма получается с изменяющейся вдоль шва высотой выпуклости, а также с неровными краями.

Было также установлено, что оптимальной является частота колебаний электрода порядка 3–4 Гц. Меньшая частота порядка 1–2 Гц не оказывает заметного воздействия на устранение провисания, а увеличение частоты до 5–6 Гц приводит к дестабилизации дугового разряда и потере устойчивости горения дуги на режимах, характерных для сварки тонколистового металла.

На рис. 3 представлены лицевая и обратная сторона швов, сваренных на весу. На участке шва *A* видны дефекты в виде прожогов и больших (до 2 мм) провисаний шва. На участке *B*, где сварка проводилась с поперечными колебаниями электрода, прожоги отсутствуют, а провисание шва с обратной стороны незначительно или устранено полностью.

При сравнении показано, что вторая часть шва, выполненная с колебаниями, имеет более высокое качество, а ее размеры соответствуют действующим стандартам, в частности ГОСТ 14771–76. Следовательно, применение поперечных колебаний положительно повлияло на его формирование за счет перераспределения теплового и силового воздействия дуги на расплавленный металл в центральной части сварного шва.

Использование данной технологии позволяет получить сварные швы, не имеющие вогнутой поверхности даже при наличии смещения кромок. Размеры выпуклой части шва в этих условиях соответствуют действующим стандартам (рис. 4).

Представленные сварные соединения показывают эффективность использования поперечных колебаний электрода для регулирования геометрических размеров сварного шва. Положительный эффект наблюдается в диапазоне изменения величины смещения кромок до величин, сравнимых с толщиной свариваемого металла. Только при больших величинах смещения кромок формирование сварного шва с колебаниями электрода становится неустойчивым. Образуется провисание обратной стороны сварного шва, вплоть до образования прожогов. Выпуклость становится неравномерной за счет перетекания жидкого металла с верхней кромки соединения на нижнюю.

Для шва, полученного с применением колебаний электрода и имеющего выпуклость без провисания обратной стороны, было также рассчитано распределение нормальных напряжений методом конечных элементов с использованием программного комплекса «COSMOS». Результаты расчета приведены на рис. 5. Они показывают, что асимметрия в соединении, не имеющем вогнутой части, оказывает значительно меньшее влияние на уровень напряжений, обусловленных изгибом, и соответственно менее опасна с точки зрения снижения несущей способности. Это обусловлено тем, что с увеличением высоты выпуклости не только возрастает эксцентриситет приложения рабочей нагрузки, но и увеличивается момент сопротивления сечения *AB*. Поэтому уровень максимальных нормальных напряжений, которые имеют место в корневой части шва, составляет 98 МПа. Это в 1,22 раза превышает величину приложенной растягивающей нагрузки $\sigma = 80$ МПа и в 2,6 раза меньше, чем в сварном соединении с провисанием, которое сварено по известной технологии и показано на рис. 1. Полученная форма сварного шва, которая характеризуется значительной высотой выпуклости, способствует сжатию зоны основного металла, прилегающей к выпуклости. Тем самым устраняется концентрация напряжений в местах перехода от шва

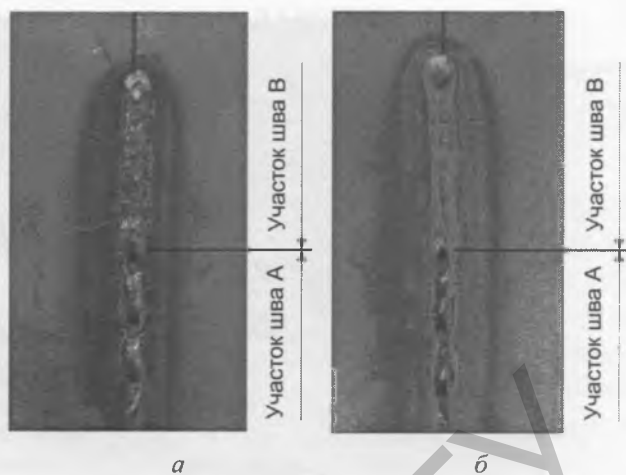


Рис. 3. Стыковой сварной шов, выполненный механизированной сваркой в защитном газе: *a* – лицевая сторона шва; *б* – обратная сторона шва

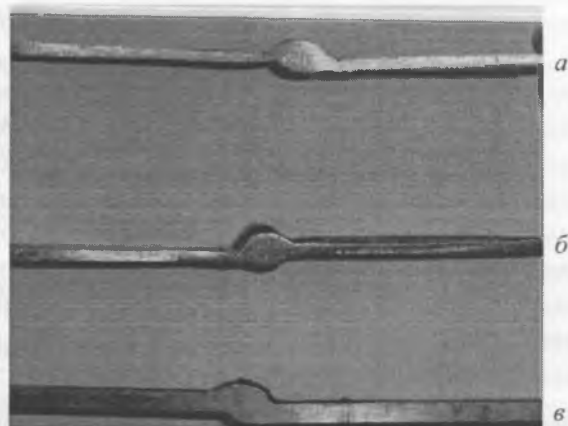


Рис. 4. Сварные соединения, выполненные с поперечными колебаниями плавящегося электрода при наличии смещения кромок (толщина первых двух образцов $\delta = 1$ мм, третьего образца $\delta = 2$ мм): *a* – 0,5 δ ; *б* – 1,0 δ ; *в* – 0,8 δ

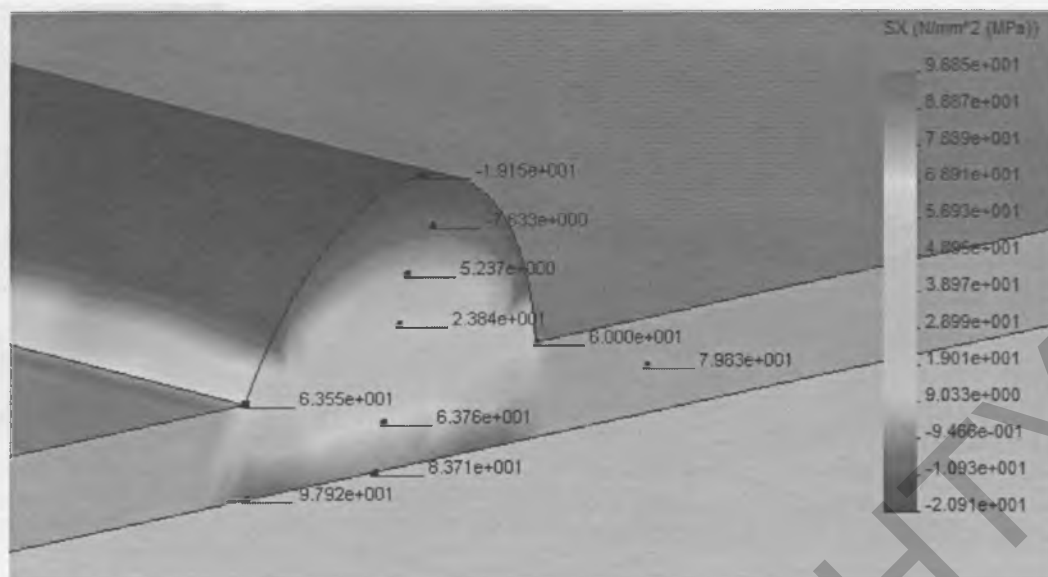


Рис. 5. Распределение рабочих нормальных напряжений в сварном стыковом соединении, сваренном на весу с поперечными колебаниями плавящегося электрода

к основному металлу. Это является дополнительным преимуществом предлагаемой технологии по сравнению с известной.

Выводы

1. Показано, что сварные стыковые соединения, сваренные на весу и характеризующиеся провисанием сварного шва, имеют пониженные характеристики работоспособности из-за перегрузки его вогнутой части в результате несимметричного приложения рабочей нагрузки и обусловленного этим изгибающего момента.

2. Установлено, что для устранения чрезмерного провисания шва необходимо выполнять сварку с поперечными колебаниями плавящегося электрода, которые позволяют эффективно управлять формированием сварного шва, избегая провисания и непровара.

3. Применение процесса сварки плавящимся электродом с его поперечными колебаниями обеспечивает снижение уровня максимальных нормальных напряжений в 2,6 раза по сравнению с соединением, сваренным на весу без поперечных колебаний, и устраняет концентрацию напряжений в местах перехода от выпуклой части шва к основному металлу.

Литература

1. Ищенко Ю. С., Хасьянова Г. Л., Букаров В. А. // Сварочное производство. 1989. № 12. С. 33–34.
2. Стебловский В. А., Будник В. П., Буцько М. Г. и др. // Автоматическая сварка. 1985. № 3. С. 71–72.
3. Болдырев А. М., Биржев В. А., Черных А. В. // Сварочное производство. 1993. № 6. С. 30–31.
4. Тимошенко С. П., Гере Дж. Механика материалов. М., 1976.
5. Кархин В. А. // Автоматическая сварка. 1985. № 9. С. 25–28.

Yu. A. TSUMAREV, D. I. YAKUBOVICH, T. S. LATUN, V. K. SHELEG

WORKING CAPACITY OF BUTT CONNECTIONS, WELDED ON WEIGHT

Summary

Features of formation of butt welded connections are considered at welding on weight. It is shown that their formation is connected with formation of sagging of a welded seam. A consequence of the obtained geometrical form of a seam is a considerable displacement of the enclosed load, the complex tension out of the centre stretching and an overload of a concave part of a seam which the result that maximum normal pressure 3,2 times exceeds level of the enclosed working pressure. It is offered to carry out welding of butt connections with fluctuations fusing electrode of perpendicularly axis of a welded seam. The developed technology has allowed to eliminate sagging of the bottom part of a seam and to lower concentration of pressure 2,6 times.