СТАТЬИ

УДК 621.791:620.17

**СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
СОЕДИНЕНИЯ ПЛАСТИН ИЗ СТАЛИ 45, ПОЛУЧЕННОГО
АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКОЙ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА ПОРОШКОВОЙ
ПРОВОЛОКОЙ С АЛЮМОТЕРМИТНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ****Абашкин Е.Е., Жилин С.Г., Комаров О.Н., Предеин В.В.***ФГБУН «Институт машиноведения и металлургии» Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Комсомольск-на-Амуре, e-mail: zhilin@imim.ru*

Процесс создания прочного сварного соединения пластин из стали с высоким углеродным эквивалентом в промышленных условиях вызывает затруднения ввиду необходимости соблюдения целого ряда технологических параметров. Технологическими условиями получения соединений элементов из стали 45 регламентируется применение дуговой или контактной точечной сварки, с непременным подогревом и последующей термообработкой. Кроме того, в полной мере использование прочностных характеристик этой стали затрудняется склонностью к образованию пор и трещин в зоне термического влияния сварных соединений, что определяет их использование лишь для слабонагруженных конструкций. Посредством внесения изменений в технологическую последовательность получения сварных соединений возможно расширение диапазона использования стали 45 с одновременным повышением прочностных характеристик. Реализация таких изменений заключается в использовании в качестве наполнителя порошковой проволоки, применяемой для автоматической дуговой сварки под слоем флюса, алюмотермитной смеси, что позволяет создать условия для дополнительного внесения тепла в стыковую зону, образующегося за счет экзотермической реакции, а также улучшить ее теплоизоляцию за счет шлака, формирующегося в результате алюмотермической реакции. Применение отмеченного процесса позволяет снизить трудоемкость операций получения сварного соединения из стали 45 за счет упразднения разделки кромок.

Ключевые слова: сталь 45, автоматическая дуговая сварка под слоем флюса, порошковая проволока, алюмотермитный наполнитель, зона термического влияния, механическая прочность, разделка кромок

**STRUCTURAL FEATURES AND MECHANICAL PROPERTIES OF JOINING
PLATES FROM STEEL 45, OBTAINED BY AUTOMATIC WELDING UNDER
A FLUID LAYER OF A POWDER WIRE WITH ALUMINOTHERMIC FILLER****Abashkin E.E., Zhilin S.G., Komarov O.N., Predein V.V.***Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Machinery and Metallurgy of Far Eastern
Branch Russian Academy of Sciences, Komsomolsk-on-Amur, e-mail: zhilin@imim.ru*

The process of creating a durable welded joint of steel plates with high carbon equivalents in industrial conditions is difficult due to the need to comply with a number of technological parameters. The technological conditions for the production of elements compounds from steel 45 are regulated by the use of arc or contact spot welding, with indispensable heating and subsequent heat treatment. In addition, the full use of the strength characteristics this steel is hindered by the tendency to form pores and cracks in the heat affected zone of welded joints, which determines their use only for lightly loaded structures. By making changes to the technological sequence of obtaining welded joints, it is possible to expand the range of use steel 45 with a simultaneous increase in strength characteristics. The implementation of such changes consists in the use a flux-cored wire applied for automatic arc welding under a flux layer, an aluminothermic mixture, which creates the conditions for additional heat introduction into the butt zone formed due to an exothermic reaction, and also improves its thermal insulation due to slag formed as a result of aluminothermic reaction. The use of this process allows to reduce the complexity of operations for obtaining a welded joint from steel 45 due to the elimination of cutting edges.

Keywords: steel 45, automatic submerged arc welding, cored wire, aluminothermic filler, heat-affected zone, mechanical strength, edge cutting

Потребительский спрос на стальные конструкции преимущественно определяют металлоемкое машиностроительное производство и предприятия гражданского строительства. Получение таких узлов неразъемных стальных конструкций, как крупных газовых турбин, насосных агрегатов, трансформаторов, металлургических печей, энергоблоков и транспорта, осуществляется, как правило, сваркой. Для указанных отраслей

сварочные процессы являются безальтернативными [1]. Повышение конкурентоспособности таких производств возможно за счет использования ресурсо- и энергоэффективных технологий и оборудования, предполагающих достижение экономии за счет возврата вторичных материалов в технологический цикл. Основой этих материалов, представляющих собой отходы машиностроительных и металлургических

предприятий (ОММП), являются железная окалина, стружка черных и цветных металлов и сплавов. Расширение диапазона применяемых материалов, а также разработка технологий, направленных на экономически целесообразное использование ОММП для формирования прочного качественного сварного соединения, представляется востребованным и актуальным.

Конструкционными сталями, традиционно пригодными для получения качественных сварных соединений, являются низкоуглеродистые стали. Для сварки элементов конструкций из средне- и высокоуглеродистых сталей, обладающих сравнительно лучшими механическими характеристиками, как правило, используют специальные технологические приемы и оборудование. Для предупреждения трещин при сварке такой материал предварительно подогревают, а после сварки проводят высокотемпературный отпуск для восстановления пластичности сварного соединения и снятия внутренних напряжений.

Одним из основных процессов для получения неразъемных соединений из таких сталей является дуговая сварка, использование которой направлено на повышение эксплуатационных свойств: износостойкости, жаропрочности и т.д. [2]. В условиях производства дуговой сваркой получают конструкции из перлитных сталей 17ГС и 45 без предварительного подогрева и последующей термической обработки с применением сварочной проволоки Св-08ХЗГ2СМ в смеси защитных газов [3]. Для формирования прочного шва при дуговой сварке необходим учет энергетических параметров процесса, определяющих условия тепломассопереноса [4].

В практике использования углеродистых легированных сталей, используемых в качестве основы сварных конструкций, наибольшее распространение получило применение электродов в виде порошковых проволок с наполнителями различного состава [5]. Применение порошковых проволок направлено на повышение производительности и качества сварочных работ, но, по причине отсутствия универсальных методов расчета режимов такой сварки, затраты на экспериментальные исследования остаются высокими [6].

Важным условием образования требуемой структуры металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) представляется скорость охлаждения материала наплавки, регуляция которой в известной мере определяется свойствами защитного шлакового слоя, объем и свойства которого зависят от состава наполнителя порошковой проволо-

ки [7]. В этой связи перспективным представляется использование комбинированного теплового воздействия на зону стыка деталей, энергия которого определяется одновременным участием в расплавлении металла электродугового и алюмотермитного процессов [8]. Для осуществления наплавки металла на кромку стальной детали, используют электрод в виде порошковой проволоки, заполненной алюмотермитным наполнителем, представляющим собой смесь порошков алюминия, окислы и наполнителей. Значительная доля этих компонентов являются ОММП. Локальный нагрев, необходимый для наплавки металла на поверхность стальной детали, в этом процессе обеспечивается подводом тепла, возникающего в результате одновременного электродугового и алюмотермитного воздействий. Шлак, образующийся в результате такого воздействия, предназначается для замедления скорости отвода тепла от стыка. Таким образом, исследование возможностей использования порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем на агрегатах дуговой сварки для формирования прочного соединения из сталей с высоким углеродным эквивалентом актуальны.

Цель исследования: определение возможности формирования сварного прочного соединения протяженных пластин из стали с высоким углеродным эквивалентом на агрегате автоматической сварки под слоем флюса порошковой проволокой с алюмотермитным наполнителем. Задачи: изготовление и использование протяженного электрода с алюмотермитным наполнителем для формирования неразъемного сварного соединения пластин из стали 45 на автомате сварки под флюсом; определение роли совмещенного электродугового и алюмотермитного теплового воздействий при формировании структуры ЗТВ; определение механических характеристик полученного сварного соединения.

Материалы и методы исследования

Формирование шва осуществлялось автоматической сваркой под слоем флюса АН-348 порошковой проволокой [9] с сердечником из алюмотермитной шихты, содержащей оксид железа, восстановитель, наполнитель, легирующие и раскисляющие компоненты. Фракция алюмотермитной порошковой смеси получена рассевом на ситах модели 026, выполненных по ГОСТ 29234.3-91, составила 0,1–0,315 мм. Для приготовления порошка смеси использовались компоненты: алюминий ПА-2 (ГОСТ 6058-73); железная окалина (с химическим составом: C = 0,150%; Mn = 1,188%; Si = 2,960%; S = 0,030%; P = 0,030%; Fe = 71,500%; Al = 0,697%; Ni = 0,188%; Cr = 0,173%; Cu = 0,444%; O₂ = 22,639%); ферро-

марганец ФМн-78(А) (ГОСТ 4755-91); ферросилиций ФС50 (ГОСТ 1415-93); графит ЭГ15 по ТУ 14-139-177-2003. Для выравнивания компонентов по фракции алюмотермитная смесь обрабатывалась в шаровой мельнице периодического действия типа МШП-700 в течение 10 мин, после чего упаковывалась в проволоку на агрегате НИИМОНТАЖ типа МТР1201УХЛ4 с использованием ленты марки 08кп-ОМ-2-1х100 по ГОСТ 503-81. Диаметр электрода составил $\varnothing = 2,8$ мм с коэффициентом заполнения $K_z = 0,37$. Стальные пластины разделаны по типу С21 (ГОСТ 8713-79) толщиной $S = 12$ мм, шириной 150 мм и длиной 500 мм (рис. 1). Материал – конструкционная углеродистая качественная сталь 45 (ГОСТ 1050-2013).

Соединение получали за два прохода при постоянных значениях вольтамперных характеристик и скорости. Характеристики режимов формирования металла, наплавляемого от электрода на кромки стальных пластин, следующие: сила тока $I = 300$ А; напряжение $U = 35$ В; скорость перемещения электрода $V = 20$ м/ч; эффективная тепловая мощность дуги для традиционной проволоки сплошного сечения марки Св-08А составляет $q_r = 2,49$ ккал/с; для экспериментальной проволоки с алюмотермитным наполнителем $q_r = 2,27$ ккал/с.

Химический состав образцов определяли согласно ГОСТ 18895-97 при помощи приставки для элементного анализа OXFORD Xmax к электронному растровому сканирующему микроскопу ZEISS EVO LS10, а также экспресс-анализатора для определения углерода АН7529. Макроструктуру ЗТВ после обработки 5%-ной азотной кислотой определяли по ГОСТ 4461-77. Содержание элементов структуры стали (перлита, мартенсита, нитридов и карбидов) определяли по шкалам, регламентированным ГОСТ 8233-56. Изменение видов структур ЗТВ определяли по схеме строения сварного шва [10, с. 289].

Для исследования физико-механических свойств сварного шва определяли прочность на разрыв, ударную вязкость, твердость ЗТВ; трехточечный изгиб. Механические испытания сварных соединений проводили согласно ГОСТ 6996-66. Образцы изготавливали с учетом ГОСТ 1497-84. Напряжение, предел текучести и относительное удлинение при растяжении образцов определяли на универсальной испытательной машине AG-X plus SHIMADZU при постоянной скорости перемещения захватов

0,05 мм/с. Испытания на ударный изгиб проводили в соответствии с ГОСТ 9454-78. Форма и размеры образцов для испытания соответствовали концентратору вида U с радиусом $R = 1 \pm 0,07$ мм, регламентированным ГОСТ 9454-78. Ударную вязкость определяли маятниковым копром типа МК, выполненным по ГОСТ 10708-82. Твердость образцов измеряли по методу Роквелла. Измерения производились по 10 точкам в направлении от центра шва к периферии. Поверхность образцов для определения твердости подготавливали согласно ГОСТ 9013-59. По полученным результатам выведены средние значения твердости шва и на протяжении ЗТВ. Способность материалов экспериментальных соединений выдерживать пластическую деформацию при изгибе определяли на тестовой машине AG-X plus SHIMADZU, снабженной устройством, отвечающим ГОСТ 28840-90.

Изображение макроструктур в месте разрыва получали в виде фрактограмм на растровом электронном микроскопе S-3400N HITACHI при $\times 100$. При определении микроструктуры и фазового состава металла отливок (с диапазоном увеличения $\times 200 \div 500$) использованы: микроскоп оптический AXIO VERT A1 с цифровой камерой AxioCam ERc5s.

Величину зерна определяли по ГОСТ 5639-82 в ходе сравнения зерен (в местах с типичной структурой) с эталонами шкал, приведенных в ГОСТ 5639-82.

Результаты исследования и их обсуждение

Компоненты алюмотермитного наполнителя и режим комбинированного теплового воздействия определяют химический состав и структуру ЗТВ сварного соединения из стали 45. Химический состав зоны локального нагрева экспериментальных образцов следующий: C = 0,32 %; Si = 0,20 %; Mn = 0,7 %; Ni = 0,25 %; Cr = 0,25 %; S = 0,031 %; P = 0,030 %. Видно, что содержание углерода ниже значений, регламентированных ГОСТ 1050-2013 для стали 45. Содержание остальных элементов соответствует химическому составу стали 45. На рис. 2 представлено сравнение размеров ЗТВ традиционных и экспериментальных образцов.

Рис. 1. Схема сварки пластин из стали 45: 1 – пластина; 2 – флюс; 3 – электрод; 4 – сварной шов; 5 – зона определения отклонений

Рис. 2. Структура металла традиционных (а) и экспериментальных (б) сварных соединений ($\times 100$): 1 – металл шва; 2 – зона сплавления и участок перегрева; 3 – участок перекристаллизации и рекристаллизации; 4 – основной металл

а)

б)

Рис. 3. Микроструктура металла традиционных (а) и экспериментальных (б) сварных соединений ($\times 200$): слева – в центре шва; в центре – в зоне сплавления и перегрева; справа – в зоне перекристаллизации и рекристаллизации

Из рис. 2 видно, что протяженность участков ЗТВ сварных соединений различна. Участок перекристаллизации и рекристаллизации экспериментальных образцов (рис. 2, а) имеет большую протяженность, чем у традиционных образцов, полученных автоматической сваркой с проволокой сплошного сечения (рис. 2, б). Протяженность ЗТВ экспериментальных образцов выше, чем традиционных, и составляет 19 мм.

Выявленные расхождения в структурах ЗТВ, обнаруженные при малом увеличении, определяют целесообразность исследований микроуровня, что позволит установить причины различий в значениях прочностных характеристик наплавляемого металла.

На рис. 3 представлены микроструктуры характерных участков металла (в центре шва, в зоне сплавления, в зоне перекристаллизации), полученного автоматической сваркой под слоем флюса с использованием традиционного электрода в виде проволоки сплошного сечения (рис. 3, а) и экспериментального электрода в виде проволоки с алюмотермитным наполнителем (рис. 3, б), при увеличении $\times 200$.

Анализом данных, представленных на рис. 3 (слева), установлена преимущественно феррито-перлитная структура зоны сплавления с характерными группированными зонами перлита. Участки перегрева, представленные в центральной части рис. 3,

имеют перлитно-ферритную структуру с преобладанием перлита. Видно, что на этом участке размеры зерен образцов, полученных при использовании традиционного электрода (рис. 3, а) и электрода в виде порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем (рис. 3, б), различны. Структура зон перекристаллизации и рекристаллизации, представленная в правой части рис. 3, для обоих случаев перлитно-ферритная. Таким образом, следует отметить, что в целом структуры образцов, полученных при вариантах, представленных на рис. 3, а, и рис. 3, б, сопоставимы, но имеют отличия в размерах зерен.

На рис. 4 представлено сравнение размеров зерен зон сплавления, перегрева, перекристаллизации и основного металла получаемых образцов. Анализ данных, представленных на рис. 4, показывает, что размер зерна металла в зоне наплавления, полученный при использовании экспериментального электрода в виде порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем, на 17% меньше, чем при использовании традиционного процесса автоматической сварки с проволокой сплошного сечения. Зерно экспериментального образца, характерное для зоны сплавления и перегрева, на 25% меньше, чем в сопоставимой зоне образца, полученного традиционным электродом. Размеры зерен зон перекристаллизации (нормализации) и основного металла сопоставимы и различаются не более чем на 4%.

Сравнительной оценкой прочностных характеристик традиционных и экспериментальных образцов установлено предпочтительное использование комбиниро-

ванного теплового воздействия на зону стыка, осуществляемое электродом, выполненным в виде порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем. Традиционные образцы имеют следующие характеристики: $\sigma_b = 571$ МПа; $\sigma_t = 319$ МПа; $\delta = 8,3\%$; $HR^A = 47$; $KCU = 98,8$ кДж/см². Данные значения, с учетом понижающего коэффициента 0,9, соответствуют регламентированным ГОСТом 1050-2013. Механические характеристики экспериментальных образцов сопоставимы с таковыми значениями, присущими основному металлу: $\sigma_b = 598$ МПа; $\sigma_t = 417$ МПа. $KCU = 116,2$ кДж/см²; $\delta = 7,8\%$.

В ходе эксперимента установлено, что при равных вольтамперных характеристиках процесса автоматической дуговой сварки значение амплитуд максимальных отклонений геометрии сварной конструкции, полученной с применением алюмотермитной порошковой проволоки, на 6% меньше, чем в случае получения соединения проволокой сплошного сечения.

При определении твердости зон шва и термического влияния установлено, что: твердость всех образцов в зоне наплавки меньше, чем у основного металла, что связано, по-видимому, со спецификой получения сварного соединения элементов из стали 45, а именно со снижением содержания углерода в зоне соединения; от центра шва в направлении основного металла твердость возрастает и достигает значений, соответствующих материалу основы $HB = 180$. Испытаниями экспериментальных соединений на трехточечный изгиб при достижении угла в 140° образования и разрастания трещин не выявлено.

Рис. 4. Средний размер зерен шва и участков зоны его термического влияния

Выводы

В ходе проведенных экспериментов установлена возможность получения неразъемных соединений из стали с высоким углеродным эквивалентом в автоматическом процессе под флюсом электродом в виде порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем, обеспечивающим соответствие химического состава экспериментальных образцов ГОСТ 380-2005. В этой связи технология представляет практический интерес для предприятий машиностроения.

Установлено формирование зоны термического влияния соединения стальных пластин за счет тепла электродугового и алюмотермитного воздействий.

Экспериментально определено, что значения амплитуд максимальных отклонений геометрии неразъемного соединения из стали 45 на 6% меньше, чем при использовании проволоки сплошного сечения при значениях тепловой мощности дуги $q = 2,27$ ккал/с и скорости перемещения электрода $V = 20$ м/ч.

Значение твердости зоны термического влияния, протяженность которой составляет 19 мм, для экспериментальных образцов сварных соединений, по мере удаления от центра шва к ее периферии, повышается с HRA = 47 до HRA = 56 ед. Установлен вязкий характер разрушения образцов экспериментального соединения, имеющего преимущественно феррито-перлитную структуру с размером зерна на 4–17% меньшим, чем у образцов, полученных с применением проволоки сплошного сечения. Прочностные характеристики материала, наплавляемого электродом в виде проволоки с порошковым термитным наполнителем, сопоставимы по значениям со сталью 45: предел прочности на разрыв составил $\sigma_b = 598$ МПа, предел текучести составил $\sigma_{0.2} = 417$ МПа.

Таким образом, разработан ресурсоэффективный способ получения неразъемного

прочного соединения элементов, выполненных из углеродистых сталей в результате совмещенного алюмотермитного и электродугового теплового воздействий путем использования порошковой проволоки с алюмотермитным наполнителем, обеспечивающим минимальные значения деформаций получаемых конструкций и удовлетворительные прочностные характеристики неразъемного соединения.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-00414-19-00.

Список литературы

1. Вернадский В.Н. Сталь и алюминий – основные конструкционные материалы сварочного производства // Сварочное производство. 2004. № 1. С. 3–18.
2. Лялякин В.П., Мурзаев В.П., Слинко Д.Б., Соловьев Р.Ю. Физико-механические свойства покрытий, полученных электродуговой металлизацией порошковыми проволоками // Сварочное производство. 2016. № 10. С. 34–38.
3. Мусиенко А.М. Технология получения комбинированного сварного соединения из перлитных сталей 17ГС и 45 // Сварочное производство. 2006. № 7. С. 26–28.
4. Сараев Ю.Н., Лунев А.Г., Киселев А.С., Гордынец А.С., Нестерук Д.А., Хайдарова А.А., Чинахов Д.А., Семенчук В.М. Исследование влияния энергетических параметров дуговой сварки покрытыми электродами на стабильность тепломассопереноса // Сварочное производство. 2018. № 2. С. 3–13.
5. Штоколов С.А. Актуальность производства порошковых проволок в России // Сталь. 2017. № 1. С. 50–51.
6. Рыбин В.А., Евдокимов А.А. Методика определения режимов сварки порошковыми проволоками // Сварка и диагностика. 2015. № 4. С. 26–30.
7. Жариков С.В., Гринь А.Г. Исследование шлаков при наплавке экзотермическими порошковыми проволоками // Сварочное производство. 2014. № 5. С. 17–21.
8. Абашкин Е.Е., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Влияние упаковки компонентов термитного наполнителя порошковой проволоки на процессы электродугового переплава // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2018. Т. 1. № 1 (33). С. 96–104.
9. Абашкин Е.Е., Комаров О.Н., Жилин С.Г., Предин В.В., Ткачёва А.В., Панченко Г.Л. Порошковая проволока // Патент РФ № 2675876. Патентообладатель ИМиМ ДВО РАН. 2018. Бюл. № 36.
10. Арзамасов Б.Н., Макарова В.И., Мухин Г.Г., Рыжов Н.М., Силаева В.И. Материаловедение. Учебник для вузов / Под общей ред. Арзамасова Б.Н. 3-е изд., стереотип. М.: Изд-во МГПУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 648 с.