

УДК 621.791.763.2

А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, В. П. Куликов

ОСОБЕННОСТИ ДУГОВОЙ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ С ДВУХСТРУЙНОЙ КОАКСИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ КОМПОНЕНТОВ ЗАЩИТНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

UDC 621.791.763.2

A. O. Koroteyev, E. A. Fetisova, V. P. Kulikov

FEATURES OF ARC WELDING OF HIGH-STRENGTH LOW-ALLOYED STEELS WITH DOUBLE-JET COAXIAL SUPPLY OF PROTECTIVE GAS MIXTURE COMPONENTS

Аннотация

Исследованы особенности перехода легирующих элементов через дуговой промежуток при сварке с двухструйной подачей компонентов защитной газовой среды сталей повышенной прочности со сложными системами легирования. На основании металлографических исследований и механических испытаний определены преимущества предлагаемой технологии для сварки сталей типа S700.

Ключевые слова:

перенос электродного металла, высокопрочные низколегированные стали, двухструйная газовая защита, коаксиальная подача газов в зону сварки, газовые смеси.

Abstract

The transition of alloying elements through the arc gap has been investigated while welding high-strength steels having complex alloying systems with a double-jet supply of components of a protective gas medium. Based on metallographic studies and mechanical tests, the advantages of the proposed technology for welding S700 type steels have been determined.

Keywords:

electrode metal transfer, high-strength low-alloy steels, double-jet gas shielding, coaxial gas supply to the welding zone, gas mixtures.

Дуговая сварка в защитных газах является на сегодняшний день наиболее производительным и динамично развивающимся способом получения неразъемных соединений. Объем её применения составляет около 80 % от всех используемых способов и постоянно растет. Это обусловлено высокой производительностью способа и широкой номенклатурой сварочных материалов, позволяющими выполнять сварку сталей и сплавов различных структурных классов в любых пространственных положениях [1].

Отличительная особенность спо-

соба – защита зоны сварки от атмосферного воздуха газом или газовой смесью, выполняющей, как правило, две основные функции: вытеснение воздуха из зоны горения дуги и сварочной ванны и создание необходимых условий для наиболее эффективного протекания физико-металлургических процессов плавления присадочной проволоки и переноса электродного металла через дуговой промежуток [1].

В настоящее время наиболее перспективной защитной газовой средой для сварки конструкционных низкоуглеродистых и низколегированных



сталей является смесь на основе аргона ($\text{Ar} + \text{CO}_2$). Появление новых материалов вызывает необходимость отказа от чистых активных газов, таких как CO_2 , в пользу смесей, где основную долю занимает инертный газ. Среди таких материалов наибольший интерес представляют низколегированные стали повышенной прочности (S690QL, S700), преимущественно зарубежного производства (SAAB, RUUKKI), активно применяемые в последнее время при изготовлении тяжело нагруженных элементов металлоконструкций. Особенностью новых материалов является уникальная система легирования, позволяющая в процессе высокотемпературной прокатки с контролируемой температурой охлаждения получить наиболее эффективную с точки зрения прочности и пластичности материала микроструктуру. В связи со сложностью химического состава присадочных материалов сварка таких сталей производится исключительно в смесях $\text{Ar} + \text{CO}_2$ и чистом аргоном. В качестве присадочного материала используются преимущественно дорогостоящие порошковые проволоки.

Ранее авторами была предложена схема создания защитной газовой смеси $\text{Ar} + \text{CO}_2$ непосредственно в зоне горения дуги с помощью специального сопла с концентричными отверстиями для независимой подачи аргона и углекислого газа [2–6]. Сущность технологии заключается в реализации управляемого механизма взаимодействия двух газов, имеющих различные газодинамические свойства, за счет их взаимной инжекции с образованием смеси компонентов требуемого состава. При этом удается больше чем в 2 раза снизить расход аргона как более дорогостоящего компонента [2–6]. Такая схема имеет две ключевые особенности: смесь формируется по средствам взаимодействия потоков и её состав является управляемым; защитная газовая атмосфера имеет градиент концентрации компонентов по верти-

кальной и радиальной оси, обусловливаемый разнесенными в пространстве областями их ввода в зону сварки.

Несмотря на кажущуюся очевидность реализации такой концепции с точки зрения защиты периферийных областей чистым углекислым газом, а центральной области, в которой происходят важные физико-металлургические процессы плавления присадочной проволоки и переноса электродного металла в сварочную ванну, определяющие технологические характеристики способа, – аргоном, проведенные до настоящего времени результаты исследований по взаимодействию потоков не позволяют сформировать целостную картину формирования защитной атмосферы и влияния компонентов на процессы, происходящие в зоне горения дуги. Важнейшим в этом случае является характер переноса электродного металла. Капля, будучи сильно перегретой в области дугового промежутка, активно взаимодействует через поверхность с омывающим её потоком защитной среды и растворяет в себе газы. Размеры капли при этом определяют эффективную площадь контакта с газовой средой и интенсивность протекания таких реакций. Принято считать, что уменьшение размеров капель благоприятно сказывается на стабильности процесса и снижении разбрызгивания электродного металла. В то же время активная поверхность того же объема переносимого металла оказывается большей, чем в случае переноса крупными каплями, что сказывается на эффективности протекания металлургических реакций.

В связи с этим важным, особенно при сварке присадочными материалами с комплексными системами легирования, является влияние способа газовой защиты и параметров режима на коэффициент перехода легирующих элементов в наплавленный металл шва.

Цель проводимых исследований – определение зависимости и анализ характера изменения концентрации элементов-



раскислителей (Mn, Si) в наплавленном металле от значений основных параметров режима сварки (силы сварочного тока и напряжения на дуге) и способа газовой защиты.

Методика проведения экспериментов основана на наплавке валиков на пластины в специально подготовленные канавки и измерениях массовой доли содержания в них химических элементов. Канавки необходимы для имитации условий, определяющих при сварке долю основного и присадочного металла в шве. В процессе проведения экспериментов изменялись значения силы тока в диапазоне значений от 150 до 250 А и напряжения на дуге. Каждому значению силы тока соответствовали несколько значений напряжения в диапазоне стабильного горения сварочной дуги.

Наплавка осуществлялась с использованием двухструйной подачи газов в зону горения дуги и по традиционной технологии газовой защиты

струйным потоком смеси 82 % Ar + 18 % CO₂ в автоматическом режиме.

Геометрические параметры выходных отверстий сопла и расходы газов приведены на рис. 1 и 2, в табл. 1 и 2. Экспериментальная модель сопла изготовлена на базе горелки Fronius MTW 3500 S. В качестве сварочного оборудования использовался сварочный полуавтомат Fronius Trans Steel 3500 с отключенными функциями синергетического управления процессом сварки. Значения параметров режима задавались вручную через скорость подачи проволоки и напряжения на дуге. Сила тока фиксировалась при помощи осциллографа в реальном времени с цифровой записью параметров режима. Расход газов, независимо подаваемых в зону сварки, контролировался с помощью ротаметров поплавкового типа РМ-1,6Г-ГОСТ 13045-81 (для углекислого газа) и РМ-0,63Г-ГОСТ 13045-81 (для аргона) с игольчатыми поплавками.

Табл. 1. Геометрические параметры сопла с двухструйной коаксиальной подачей газов

Параметр	Значение
Наружный диаметр кольцевого отверстия D, мм	22
Внутренний диаметр кольцевого отверстия d, мм	18
Внутренний диаметр центрального канала (диаметр токоподводящего наконечника) d _в , мм	7
Ширина кольцевого канала b, мм	2
Ширина внутреннего канала b _в , мм	2,5

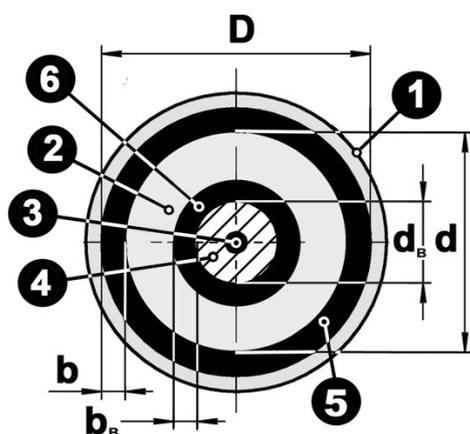


Рис 1. Геометрические характеристики сопла сварочной горелки: 1 – наружное сопло; 2 – газораспределительная втулка; 3 – сварочная проволока; 4 – токоподводящий наконечник; 5 – канал для подачи CO₂; 6 – канал для подачи аргона



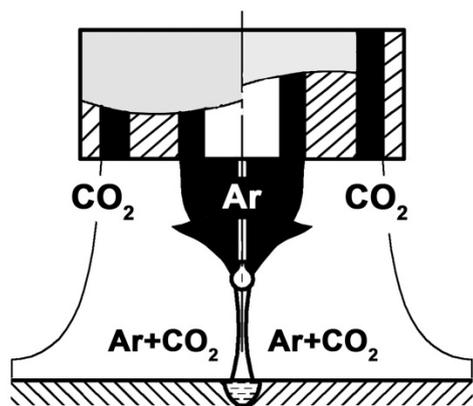


Рис 2. Строение защитной газовой атмосферы при использовании сопла с двухструйной подачей газов

Табл. 2. Расходы защитных газов и параметры режима наплавки

Параметр	Значение
Расход аргона, подаваемого по центральному каналу сопла, л/мин	3,5...4
Расход углекислого газа, подаваемого по кольцевому каналу сопла, л/мин	9...9,5
Вылет электродной проволоки L_3 , мм	14
Скорость наплавки (сварки), м/ч	10...15
Угол между осью горелки и плоскостью детали	80...90

Для измерения массовой доли химических элементов использовался оптико-эмиссионный спектрометр Solaris GNR-SCP. Измерение проводилось с поверхности наплавки. Для этого выпуклости валков сфрезеровывались до основного металла с целью создания необходимых плоских площадок для проведения спектрального анализа.

По результатам экспериментальных исследований построены графические зависимости для способов сварки с традиционной газовой защитой и двухструйной подачей компонентов защитной газовой смеси в зону горения дуги, представленные на рис. 3.

Результаты проведенных исследований показали, что наиболее существенное влияние на переход марганца и кремния из сварочной проволоки в наплавленный металл шва оказывает напряжение на дуге (изменение значения напряжения на 5 В в среднем изменяет количество марганца в шве на 15...20 %). Вероятно, это происходит вследствие изменения длины дуги.

Ранее авторами описывалась особенность процесса сварки с двухструй-

ной подачей компонентов, заключающаяся в изменении условий плавления проволоки при увеличении длины дуги, оказывающая влияние на процесс переноса электродного металла [5, 6].

Как видно из полученных зависимостей, при использовании двухструйной подачи газов в зону сварки изменение напряжения на дуге оказывает меньшее влияние на изменение содержания элементов раскислителей в наплавленном металле. Графики зависимостей имеют меньший угол наклона к горизонтальной оси, что особенно хорошо прослеживается при больших значениях напряжения (см. рис. 3, кривые 2 и 3). Это объясняется снижением окислительного потенциала защитной газовой атмосферы с ростом длины столба дуги, что частично компенсирует потерю элементов из-за снижения количества растворенного в жидком металле кислорода.

В то же время сила сварочного тока при постоянном напряжении почти не оказывает влияния на переход элементов в сварной шов. Вероятно, это происходит вследствие большей инерт-



ности атмосферы дуги при сварке в смеси 82 % Ar + 18 % CO₂ в отличие от сварки в CO₂, где повышение силы сва-

рочного тока влияет на теплофизические процессы и степень диссоциации углекислого газа.

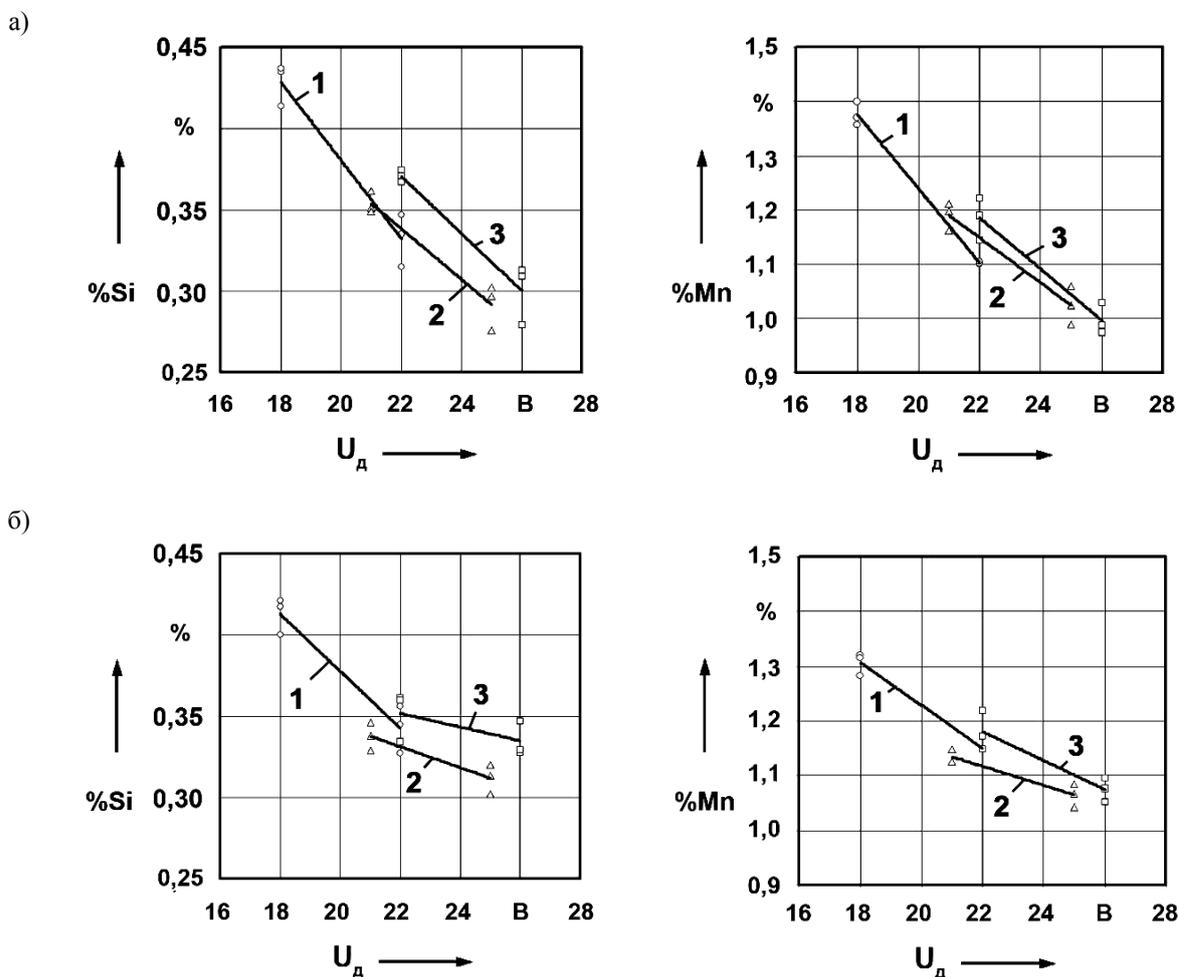


Рис. 3. Содержание кремния Si и марганца Mn в наплавленном металле в зависимости от напряжения на дуге: а – традиционная технологии газовой защиты; б – двухструйная подача защитных газов в зону горения дуги; 1 – I_{св} = 150 А; 2 – I_{св} = 200 А; 3 – I_{св} = 250 А

Для анализа эффективности применения разработанной технологии применительно к сварке рассматриваемых сталей повышенной прочности (S700) [7–9] были проведены эксперименты по исследованию микроструктуры и механических свойств сварных соединений.

Сварка образцов в виде пластин толщиной 20 мм осуществлялась по трем технологиям:

1) сварка порошковой проволокой OERLIKON Fluxofil M42 в од-

нородном потоке газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO₂;

2) сварка проволокой сплошного сечения ESAB OK Aristorod 69 в однородном потоке газовой смеси 82 % Ar + 18 % CO₂;

3) сварка с использованием разработанной технологии двухструйной подачи защитных газов в зону горения дуги проволокой сплошного сечения ESAB OK Aristorod 69 с расходами газов, соответствующими образованию в зоне сварочной ванны сме-



си 82 % Ar + 18 % CO₂.

Химический состав используемых проволок представлен в табл. 3 и 4.

Для исследования микроструктуры использовался растровый сканирующий электронный микроскоп Tescan VEGA. Из сварных соединений изготавливались образцы в виде поперечных шлифов. В качестве реактива для травления применялся спиртовой раствор HNO₃ (3 %). Для размещения в камере микроскопа из макрошлифов сварных соединений изго-

тавливались цилиндрические образцы небольшого размера. Схема вырезки представлена на рис. 4. Исследования проводились при различном увеличении с целью оценки как крупных образований в виде отдельных зерен металла, так и при большем увеличении (до 5000х) с целью обнаружения субмикроскопических выделений и морфологий структуры в пределах зерна.

Результаты приведены на рис. 5–7.

Табл. 3. Химический состав сварочной проволоки OERLIKON Fluxofil M42

Элемент	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cr
Содержание элемента, %	0,05	0,5	1,6	< 0,015	< 0,015	1,9	0,4	0,45

Табл. 4. Химический состав сварочной проволоки ESAB OK Aristorod 69

Элемент	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cr
Содержание элемента, %	< 0,10	0,40...0,70	1,50...1,80	< 0,015	< 0,015	1,20...1,60	0,20...0,30	0,20...0,40

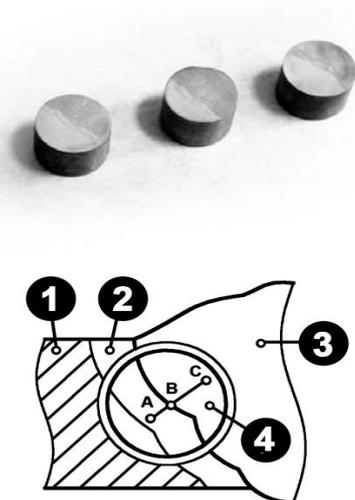


Рис. 4. Внешний вид и схема вырезки образцов для исследования микроструктуры: 1 – основной металл сварного соединения; 2 – зона термического влияния (ЗТВ); 3 – наплавленный металл шва; 4 – положение вырезки цилиндрического образца с характерными зонами (А, В и С)

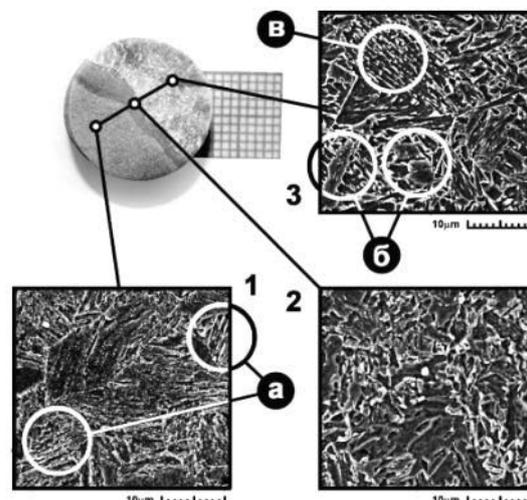


Рис. 5. Микроструктура образца, сваренного в струйном потоке смеси 82 % Ar + 18 % CO₂ порошковой проволокой OERLIKON Fluxofil M42: а – участки структуры бейнита в основном металле; б – выделения мартенситно-аустенитных комплексов; в – участки структуры бейнита в сварном шве

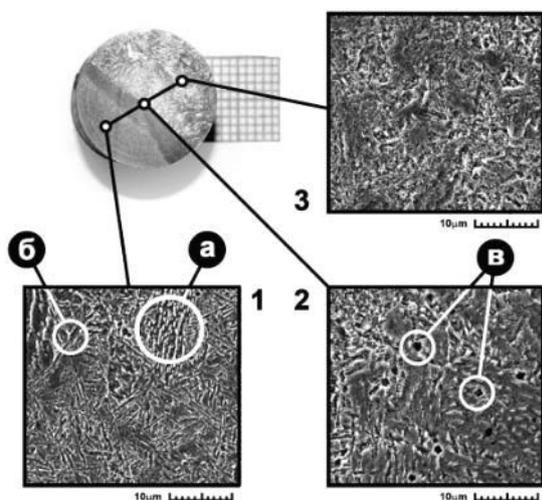


Рис. 6. Микроструктура образца, сваренного в струйном потоке смеси 82 % Ar + 18 % CO₂ проволокой ESAB OK Aristorod 69: а – участки структуры бейнита в основном металле; б – грубые неразориентированные выделения феррита; в – дисперсные выделения вторичной фазы в виде карбидов и нитридов (Me-C, Me-N)

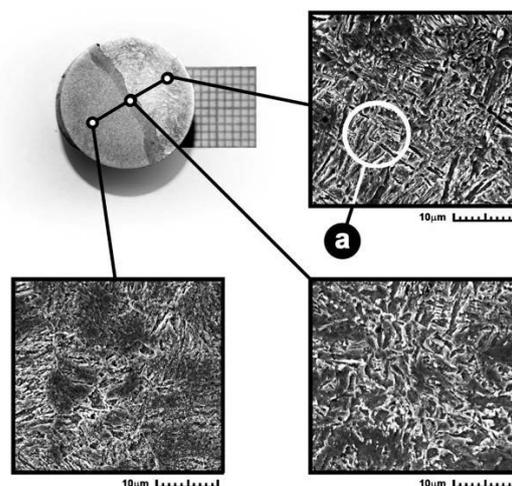


Рис. 7. Микроструктура образца, сваренного с использованием двухструйной подачи защитных газов в зону горения дуги проволокой ESAB OK Aristorod 69: а – характерная разориентированная структура игольчатого феррита в наплавленном металле шва

Микроструктура рассматриваемой стали в состоянии поставки сформирована, как правило, из бейнита и игольчатого феррита. Особенностью формирования такой микроструктуры является горячая прокатка с контролируемой температурой охлаждения. При этом за счет регулирования термического цикла и деформационной нагрузки удается получить достаточно прочную (в рассматриваемой стали $\sigma_b = 790 \dots 865$ МПа), но при этом пластичную структуру игольчатого феррита.

Сварка порошковыми проволоками, как известно, характеризуется меньшим тепловложением в основной металл. Это обусловлено главным образом характером горения дуги и переносом электродного металла. Благодаря активному плавлению оболочки проволоки и большому вследствие этого скоростям её подачи создаются благоприятные условия для струйного переноса электродного металла в сварочную ванну. При этом большая часть металла переносится не отдельными каплями,

а в виде металлического пара, создавая повышенное давление плазмы в активном катодном пятне нагрева. Это приводит к повышенному проплавлению по оси валика шва. Газы, выделяющиеся при термическом разложении порошкового наполнителя проволоки, образуют дополнительную атмосферу, а также косвенно препятствуют окислению элементов микролегирования, необходимых для формирования требуемой конечной микроструктуры сварного соединения и обеспечения комплекса его необходимых механических свойств.

В то же время, несмотря на указанные очевидные преимущества, пониженное тепловложение вызывает повышение по сравнению со сваркой проволокой сплошного сечения скорости охлаждения, что особенно сильно проявляется при сварке деталей больших толщин (более 10 мм), склонных к термическому циклу, т. к. в этом случае теплоотвод в изделие является существенным. Это приводит к тому, что на участках основного металла, примыка-

ющих к линии сплавления (см. рис. 5, а), а также на участках повторного нагрева отдельных валиков наплавленного металла шва (см. рис. 5, в) наблюдается присутствие структуры бейнита с речной морфологией феррита и выделениями Fe_3C . Такая структура является менее пластичной по сравнению с игольчатым ферритом. Зерна металла имеют достаточно большие размеры 15...20 мкм (см. рис. 5) и ярко выраженные границы. Помимо того, анализ микроструктуры выявил наличие в наплавленном металле шва островков выделения мартенситно-аустенитных комплексов в виде отдельной фазы (рис. 5, б).

Микроструктура сварного соединения, полученного сваркой однородным потоком смеси $Ar + CO_2$ проволокой сплошного сечения ESAB OK Aristogod 69, имеет более мелкодисперсную структуру (рис. 6). Наплавленный металл шва состоит преимущественно из ферритобейнитной смеси «хлопьевидной» формы (см. рис. 6). В зонах основного металла, подвергшихся воздействию термического цикла сварки, также присутствуют выделения бейнита с речной морфологией феррита и выделениями Fe_3C . Однако их количество невелико. Это, вероятно, объясняется меньшей скоростью охлаждения наплавленного металла.

Вместе с тем, в металле шва вблизи линии сплавления наблюдается большое количество неметаллических включений и оксидных частиц (просматриваются на рис. 6 в виде мельчайших черных точек). Эти частицы, являясь центрами роста ферритных зерен, способствуют измельчению структуры, но вследствие потери части элементов комплексного легирования из-за окисления затрудняют формирование комплекса прочностных свойств. Окисление элементов в этом случае, вероятно, происходит из-за отсутствия дополнительной газовой защиты за счет разложения сердечника проволоки и взаимодействия расплавленного металла капли

с кислородом, являющимся продуктом диссоциации CO_2 . Кроме того, в зоне линии сплавления наблюдается выделение достаточно крупных включений вторичной фазы в виде карбидов и нитридов (см. рис. 6, в), что в некоторых случаях может повысить прочность, ослабив этот участок с точки зрения вероятности развития трещин и других видов разрушений. Указанные особенности кристаллического строения могут служить концентратором сегрегации диффузионно-подвижного водорода, усиливая тем самым его отрицательное влияние на сопротивляемость сварного соединения образованию холодных трещин по механизму хладноломкости.

При сварке по предлагаемой технологии с двухструйной подачей защитных газов в зону горения дуги на всех трех участках сварного соединения (металл шва, линия сплавления и зона термического влияния) наблюдается благоприятная с точки зрения обеспечения комплекса механических свойств структура игольчатого феррита (рис. 8). Характер её распределения достаточно равномерный, мелкодисперсный и ориентированный, особенно в наплавленном металле шва (рис. 7, а), что обеспечивает высокую прочность при сохранении пластичности и вязкости сварного соединения. Такая микроструктура, вероятно, обусловлена оптимальной скоростью охлаждения и достаточно инертной защитной газовой атмосферой в области плавления сварочной проволоки, что исключает появление крупных неметаллических включений по линии сплавления.

Для оценки влияния условий формирования микроструктуры на комплекс механических свойств сварных соединений были проведены измерения твердости на различных участках, а также испытания на ударный изгиб.

Измерение твердости производилось по шкале HV 10 с использованием универсального твердомера AFFRI-URBV-VRS.

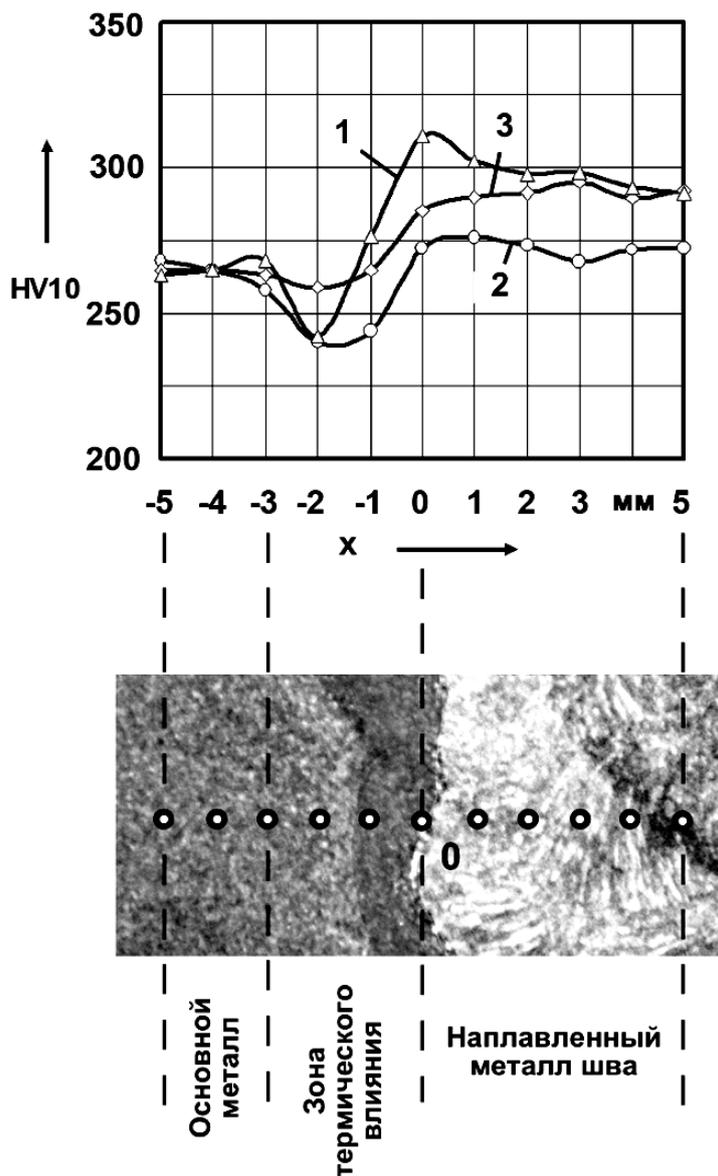


Рис. 8. Результаты измерения твердости сварных соединений: 1 – сварка порошковой проволокой Fluxofil M42 в смеси 82 % Ar + 18 % CO₂; 2 – сварка проволокой ESAB OK Aristorod 69 в смеси 82 % Ar + 18 % CO₂; 3 – сварка проволокой ESAB OK Aristorod 69 с двухструйной подачей защитных газов в зону горения дуги

Результаты измерений представлены на рис. 8. Твердость основного металла рассматриваемой стали в состоянии поставки составляла 260...270 HV.

Наплавленный металл сварного шва при использовании проволок сплошного сечения ESAB OK Aristorod 69 обладает большей твердостью (290...295 HV), чем наплавленный металл, выполненный порошковой проволокой OERLIKON Fluxofil M42

(270...275 HV). Это, вероятно, объясняется химическим составом проволоки и особенностями её плавления.

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что имеются два участка:

1) участок пониженной твердости (240...245 HV) на расстоянии около 2 мм от линии сплавления в основном металле, находящийся на границе зоны термического влияния;

2) участок повышенной твердости (300...315 HV) на линии сплавления, характерный для сварки проволокой сплошного сечения по традиционной технологии газовой защиты однородным потоком смеси.

Наиболее вероятной причиной резкого скачка твердости по линии сплавления являются обнаруженные при исследовании микроструктуры (см. рис. 6, в) скопления включений Me-C, Me-N.

Сварка с использованием предлагаемой технологии газовой защиты позволяет несколько снизить неравномерность значений твердости за счет устранения участка выделения карбидов и нитридов на линии сплавления, а также минимизации

зоны разупрочнения. Это, вероятно, является следствием более рационального ввода тепла в зону сварки.

Испытания на ударный изгиб проводились с применением маятникового копра ИО 5003 при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Целью испытаний было сравнение значений ударной вязкости металла шва сварного соединения, полученного сваркой с использованием разработанной технологии двухструйной подачи защитных газов в зону горения дуги, со значениями ударной вязкости образцов, полученных по двум рассматриваемым в статье традиционным технологиям. Результаты испытаний представлены на рис. 9.

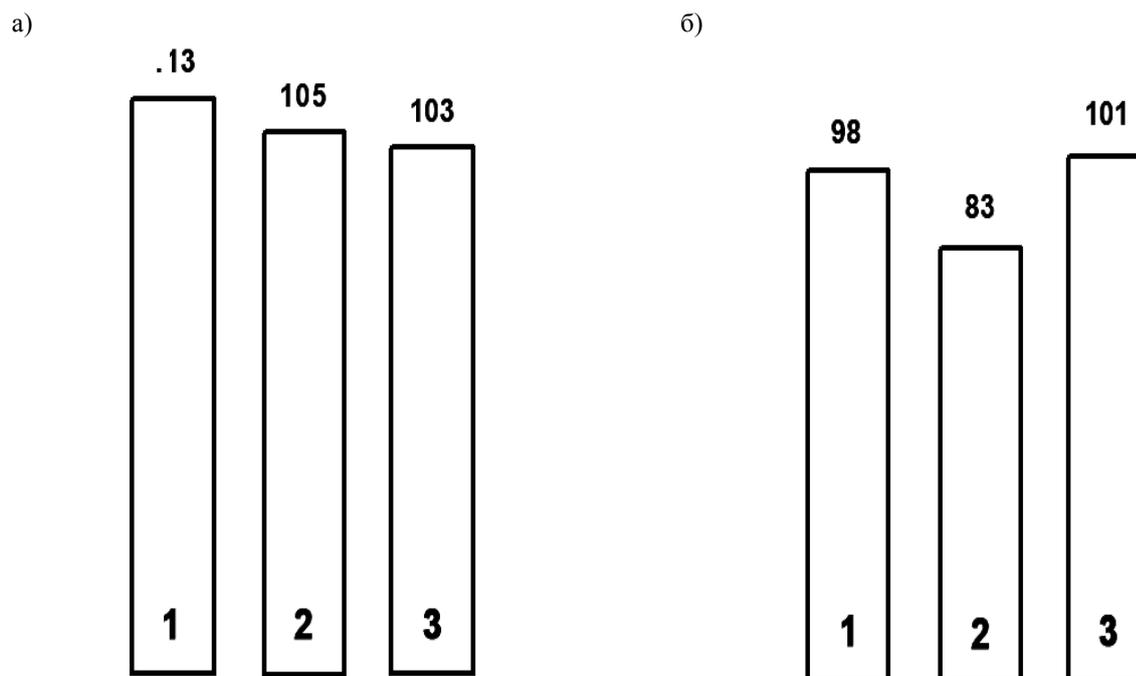


Рис. 9. Результаты испытаний на ударный изгиб: а – ударная вязкость металла шва сварного соединения (VWT); б – ударная вязкость зоны термического влияния по линии сплавления (VHT); 1 – сварка порошковой проволокой Fluxofil M42 в смеси 82 % Ar + 18 % CO₂; 2 – сварка проволокой ESAB OK Aristorod 69 в смеси 82 % Ar + 18 % CO₂; 3 – сварка проволокой ESAB OK Aristorod 69 с двухструйной подачей защитных газов в зону горения дуги

Анализ полученных данных показал, что процесс сварки с двухструйной газовой защитой не уступает традиционным способам с точки зрения обеспе-

чения требуемого комплекса механических свойств. Значение ударной вязкости в зоне термического влияния по линии сплавления превосходит значения,



полученные при испытании образцов, сваренных в однородном потоке газовой смеси проволокой сплошного сечения. При этом удается существенно снизить затраты на защитные газовые смеси и присадочные материалы. Вероятными причинами этого являются более благоприятная микроструктура, состоящая из разориентированных мелкодисперсных зерен игольчатого феррита, и отсутствие неметаллических включений по линии сплавления.

Выводы

1. Наличие градиента концентраций компонентов защитной газовой смеси по вертикальной и радиальной оси при их независимой двухструйной коаксиальной подаче в зону сварки позволяет благодаря снижению окислительного потенциала в области торца плавящейся электродной проволоки при повышении напряжения на дуге компенсировать потерю легирующих элементов присадочного материала в дуго-

вом промежутке. Это особенно актуально при сварке сталей повышенной прочности со сложными системами комплексного легирования.

2. Применение двухструйной газовой защиты при сварке сталей типа S700 позволяет снизить степень неоднородности механических свойств в сварном соединении при устранении участка повышенной на 15 % твердости по линии сплавления, обусловленного выделением крупных неметаллических включений, а также сформировать наиболее эффективную с точки зрения обеспечения требуемого уровня прочности и пластичности сварного соединения микроструктуру игольчатого феррита. Основными преимуществами при этом по сравнению с традиционными технологиями являются создание условий для наиболее эффективного перехода легирующих элементов в металл сварочной ванны и компенсация их потерь из-за окислительных реакций с продуктами диссоциации CO_2 .

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов, В. П. Технология сварки плавлением и термической резки: учебник / В. П. Куликов. – Минск: Новое знание; Москва: ИНФРА-М, 2016. – 463 с.: ил.
2. Коротеев, А. О. Особенности реализации кольцевого способа подачи защитного газа в зону горения дуги при сварке / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, М. А. Кадров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 1. – С. 23–31.
3. Коротеев, А. О. О потерях электродного металла при дуговой сварке в условиях комбинированной газовой защиты / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, М. А. Кадров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 3. – С. 25–34.
4. Коротеев, А. О. Моделирование газодинамических процессов в защитной атмосфере дуги при сварке в смеси коаксиально подаваемых газов / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, В. П. Долячко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 3. – С. 54–64.
5. Коротеев, А. О. Особенности выбора сварочных проволок при дуговой сварке в среде $\text{Ar} + \text{CO}_2$ с двухструйной коаксиальной подачей защитных газов в зону горения дуги / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, В. П. Долячко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 3. – С. 65–73.
6. Коротеев, А. О. Технологические характеристики дуговой сварки с двухструйной коаксиальной подачей компонентов защитной газовой среды / А. О. Коротеев, Е. А. Фетисова, В. П. Куликов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 2 (63). – С. 14–22.
7. Коротеев, А. О. Особенности технологии дуговой сварки высокопрочных микролегированных сталей с комбинированной газовой защитой зоны горения дуги / А. О. Коротеев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев, 2014. – С. 96.
8. Коротеев, А. О. Особенности перехода легирующих элементов через дуговой промежуток в условиях комбинированной двухструйной газовой защиты / А. О. Коротеев, В. П. Куликов, В. П. Долячко // Материа-



лы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2015. – С. 147–148.

9. **Долячко, В. П.** Особенности формирования микроструктуры высокопрочных низколегированных сталей при дуговой сварке с двухструйной подачей компонентов защитной газовой среды / В. П. Долячко, А. О. Коротеев // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. – Могилев, 2017. – С. 118.

Статья сдана в редакцию 20 января 2020 года

Артур Олегович Коротеев, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Екатерина Анатольевна Фетисова, аспирант, Белорусско-Российский университет.

Валерий Петрович Куликов, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

Artur Olegovich Koroteyev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

Ekaterina Anatolievna Fetisova, PhD student, Belarusian-Russian University.

Valery Petrovich Kulikov, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

