

# Новый эффективный сварочный материал для дуговой сварки стальных конструкций

С. Н. Жизняков, канд. техн. наук, Белорусский национальный технический университет (Минск)

*Сварочные материалы: покрытые металлические электроды, защитные газы, проволока сплошного сечения и порошковая проволока, флюсы, неплавящиеся электроды, — непосредственно участвуют в процессе дуговой сварки, выполняя важнейшие технологические и металлургические функции, обеспечивающие возможность эффективного производства сварочных работ и получение качественных сварных конструкций.*

Приведенный перечень сварочных материалов, — и это показали выполненные в Белорусском национальном техническом университете исследования, — может быть дополнен сухим льдом — твердым диоксидом углерода, обладающим ярко выраженными специфическими свойствами, весьма полезными для сварочного процесса. Такими свойствами являются:

— очень низкая температура льда, не превышающая минус 78,5 °С. При принудительном соприкосновении льда с металлом последний интенсивно охлаждается. Причем слой льда способен находиться на металлической поверхности в нормальных условиях достаточно долго, сохраняя свою структуру и физические свойства. Холодопроизводительность сухого льда в несколько раз превышает холодопроизводительность водяного льда;

— способность сухого льда при нормальном давлении и температуре минус 78,5 °С сублимировать, т.е. переходить из твердого кристаллического состояния сразу в газообразное, минуя жидкую фазу, с поглощением теплоты в количестве около 590 кДж/кг. При этом из 1 г льда при его полном испарении образуется порядка 0,8 л углекислого газа.

Сухой лед отличается очень высокой чистотой. Согласно ГОСТ 12162-77 массовая доля диоксида углерода в нем составляет 99,96-99,98%, фактическое содержание диоксида углерода в выпускаемом промышленностью продукте достигает 99,998% при ничтожном содержании влаги.

Сухой лед удобен для реализации. Его транспортируют и хранят в термоконтейнерах различной вместимости от 2 до 250 кг и более. В зависимости от конструктивных особенностей контейнера и внешней температуры сухой лед не теряет своих характеристик в течение нескольких суток. Потери при хранении обычно составляют 2-10% от массы льда в сутки. Лед нетоксичен, недефицитен, он широко используется в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и пр. Лед в основном поставляют в виде блоков и гранул различного размера. Плотность сухого льда 1560 кг/м<sup>3</sup>.

Высокотемпературный неравномерный нагрев с последующим охлаждением соединяемых элементов при дуговой сварке вызывает появление в них остаточных деформаций, существенно затрудняющих производство сварных конструкций и ухудшающих их качество. Можно полагать, что одним из наиболее рациональных технических решений, направленных на снижение деформаций, является локальное охлаждение металла в зоне сварки. Это сужает до возможного минимума размеры участков сварного соединения, нагреваемых в процессе сварки до температур, при которых возникают напряжения сжатия, превышающие предел текучести свариваемого металла (для сталей, главным образом, зоны, нагреваемые до температур более 600-700 °С). Появление таких критических участков и предопределяет зарождение с последующим развитием пластических деформаций и как следствие получение сварных соединений и кон-

струкций с остаточными сварочными деформациями (и напряжениями).

Вместе с тем применяемые на практике средства отвода теплоты от нагреваемого при сварке металла (водоохлаждаемые медные подкладки и ползуны, массивные прижимные устройства, жидкие охладители в виде направленных сплошных и распыленных струй) не способны оказывать заметное локальное воздействие на критические высокотемпературные зоны металла, в т.ч., и притом особенно, находящиеся вблизи сварочной ванны. Было установлено, что подобную функцию по точечному контактному отводу теплоты от нагреваемого при сварке металла может вполне успешно выполнять сухой лед. Проведенные в работе [2] экспериментальные и теоретические исследования позволили авторам разработать основные положения универсальной технологии аргонодуговой сварки тонколистовой высоколегированной стали аустенитного класса типа 18/8 с применением твердого диоксида углерода для принудительного охлаждения высокотемпературной области свариваемых элементов, позволившей в несколько раз уменьшить остаточные деформации по сравнению со сваркой без охлаждения. При сварке металла толщиной 1 мм рациональная площадь контактного охлаждения в высокотемпературных зонах на определенном расстоянии от границы сварочной ванны составила 60-90 мм<sup>2</sup> при протяженности не менее 6 мм. Следует отметить, что разработка технологии сварки проводилась с использованием созданной в этой же работе [2] методики численного моделирования температур, напряжений и деформаций в различных участках свариваемых пластин, учитывающей специфику поведения аустенитной стали и особенности низкотемпературного охладителя – сухого льда.

При сварке стальных пластин в углекислом газе была выявлена уникальная возможность охлаждения сухим льдом металла, нагреваемого непосредственно перед дугой по фронтальной границе сварочной ванны. Это имеет место при сварке под слоем сухого льда.

Находящийся на поверхности пла-



Рис. 1. Кривые максимальных температур нагрева металла (стали) при сварке в углекислом газе обычным способом (1) и под слоем сухого льда (2): Δ1 и Δ2 – ширина участков металла, нагреваемых до температуры свыше 600 – 700 °С при сварке без сухого льда и с сухим льдом соответственно; с.в. – сварочная ванна.

стин слой льда перед сваркой практически не реагирует с металлом. Однако при вступлении в прямое соприкосновение с металлом, нагреваемым при сварке до высоких вплоть до плавления температур, происходит активная сублимация льда с поглощением большого количества теплоты. Не успевший испариться в результате сублимации сухой лед вступает в соприкосновение со сварочной ванной, где, реагируя с жидким металлом (см. далее), моментально исчезает. Таким образом сварочная ванна оказывается как бы окаймленной низкотемпературным твердым сухим льдом. Взаимодействие прилегающего к сварочной ванне металла с сухим льдом уменьшает размеры высокотемпературных участков, в которых возможно активное развитие пластических деформаций (рис. 1).

В пределе при сварке под слоем сухого льда тонколистового металла с использованием грамотной технологии, предусматривающей при необходимости дополнительное охлаждение льдом остывающего метла шва и металла зоны термического влияния на высокотемпературных участках, можно получать сварные соединения и конструкции без каких-либо остаточных деформаций. Следует отметить, что применение сухого льда в качестве интенсивного охладителя

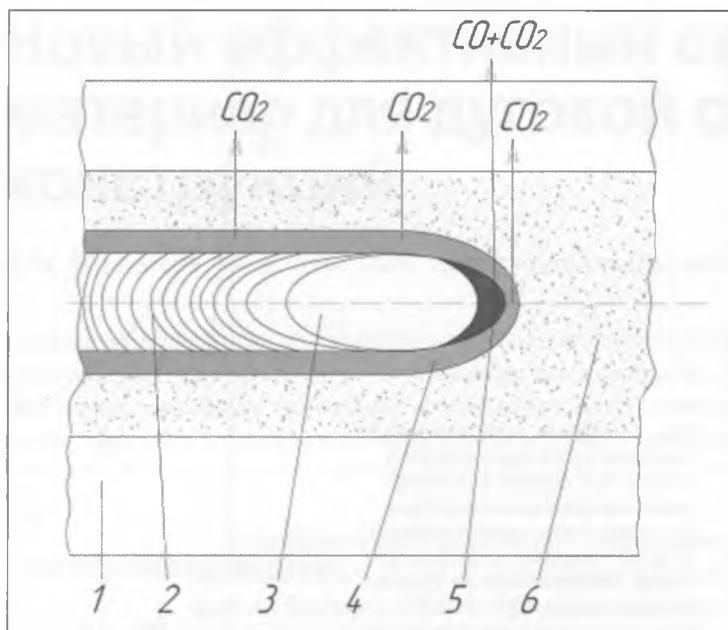


Рис. 2. Схема образования защитной газовой фазы при дуговой сварке под слоем сухого льда: 1 – основной металл; 2 – шов; 3 – сварочная ванна; 4 – участки соприкосновения слоя сухого льда с поверхностью нагреваемого при сварке до высоких температур металла; 5 – зона взаимодействия металла сварочной ванны с сухим льдом; 6 – слой сухого льда.

теля возможно при ручной дуговой сварке покрытыми электродами, другими способами сварки плавлением. Заметное повышение в этом случае скорости охлаждения тонколистового металла сказывается на его структуре и свойствах (в данной статье этот вопрос не рассматривается). Естественно, что сварка с сухим льдом может быть использована только для металла, не склонного при резком охлаждении к образованию хрупких закалочных структур, трещин и других пороков.

Эксперименты по сварке под слоем сухого льда позволили выявить чрезвычайно важное для дальнейших исследований явление – количество образующихся в зоне сварки газов является вполне достаточным для ее надежной защиты от воздуха. Причем состав газовой фазы представляет собой не чистый углекислый газ, а его смесь с оксидом углерода (рис. 2).

Образование газовой фазы подобного состава можно объяснить следующим образом: углекислый газ образуется в результате сублимации части слоя сухого льда, непосредственно прилегающей к поверхности нагреваемого при сварке металла. С повышением темпера-

туры металла скорость испарения льда многократно возрастает и достигает максимума при температурах, близких к температуре его плавления. Поскольку основная масса льда испаряться не успевает, его большая часть в процессе сварки «сползает» на головную высокотемпературную часть сварочной ванны, где вступает в прямое контактное взаимодействие с находящимся в постоянном движении расплавленным металлом. Происходит почти мгновенная сублимация льда с выделением в ограниченном пространстве огромного количества углекислого газа, приводящая к резкому возрастанию его концентрации и парциального давления в сфере соприкосновения жидкой и газовой фаз. Это моментально вызывает высокоскоростное и полномасштабное протекание реакции  $Fe_{ж} + CO_2 = FeO_{ж} + CO$ . Образующийся в большом количестве оксид углерода, а также остатки не вступившего в реакцию углекислого газа формируют, совместно с углекислым газом сублимирующего сухого льда, соприкасающегося с горячей поверхностью твердого металла, защитную газовую фазу зоны сварки. Выполненные исследования дают основание предполагать, что содержание оксида углерода, как продукта рассматриваемой реакции, в зоне дуги при сварке стали под слоем сухого льда может достигать 60–70%. При взаимодействии с воздухом оксид углерода реагирует с его кислородом преобразуясь обратно в углекислый газ.

Процесс дуговой сварки в смеси оксида углерода с углекислым газом существенно отличается – и это нашло подтверждение при экспериментальных исследованиях – от процесса сварки в одном углекислом газе. При сварке в смеси наблюдается стабильное мягкое горение дуги без чрезмерного разбрызгивания расплавленного металла, грубочешуйчатая поверхность сварного шва отсутствует. Процесс сварки во многом подобен сварке в смеси аргона с углекислым газом. Кстати, согласно литературным данным [3] сварке под защитой одного оксида углерода свойственно устойчивое горение дуги и хорошее формирование и внешний вид шва.

Изменение характера горения дуги и вида переноса капель электродного металла при сварке в смеси оксида углерода с углекислым газом связано, главным образом, с низкой концентрацией углекислого газа в смеси. Присутствие в дуговом пространстве большого количества оксида углерода препятствует диссоциации углекислого газа, вызывающей интенсивное охлаждение плазмы дуги и сжатие ее активных пятен и как следствие крайне неблагоприятное расположение действующих на каплю электродного металла сил, в первую очередь силы пинч-эффекта, реактивной силы давления паров металла и силы давления плазменных потоков дуги. Надлежит отметить, что большая концентрация оксида углерода в газовой фазе в определенной степени тормозит проходящие в зоне сварки окислительные процессы.

На основании результатов выполненных исследований в соавторстве с сотрудниками Белорусского национального технического университета разработан принципиально новый способ дуговой сварки плавящимся электродом – сварка под сухим льдом [4]. Механизованная и автоматическая дуговая сварка плавящимся электродом под сухим льдом производится без внешней газовой и шлаковой (флюсовой) защиты (рис. 3). Основополагающими сварочными материалами являются твердый диоксид углерода и содержащая раскислители сварочная проволока.

Наплавка валиков и сварка стыковых и тавровых соединений из низкоуглеродистой и низколегированной сталей средней толщины с применением твердого диоксида углерода по ГОСТ 12162-77 и проволоки марки Св-08Г2С по ГОСТ 2246-70 показали спокойное горение дуги с минимальным разбрызгиванием расплавленного металла, хорошее формирование и внешний вид шва, отсутствие в сварных соединениях пор, твердых включений и других недопустимых дефектов (рис. 4). Швы сварных соединений обладают высокими механическими свойствами: сопротивление разрыву,  $\sigma_B$ , составляет 580-620 МПа, относительное удлинение,  $\delta_5$ ,

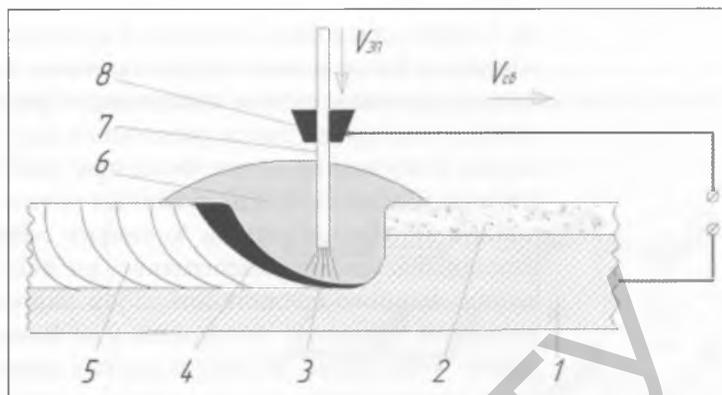


Рис. 3. Схема дуговой сварки под слоем сухого льда: 1 – основной металл; 2 – слой сухого льда; 3 – дуга; 4 – сварочная ванна; 5 – шов; 6 – газовая защита зоны сварки; 7 – электродная сварочная проволока; 8 – токосъемный наконечник (токоподвод).

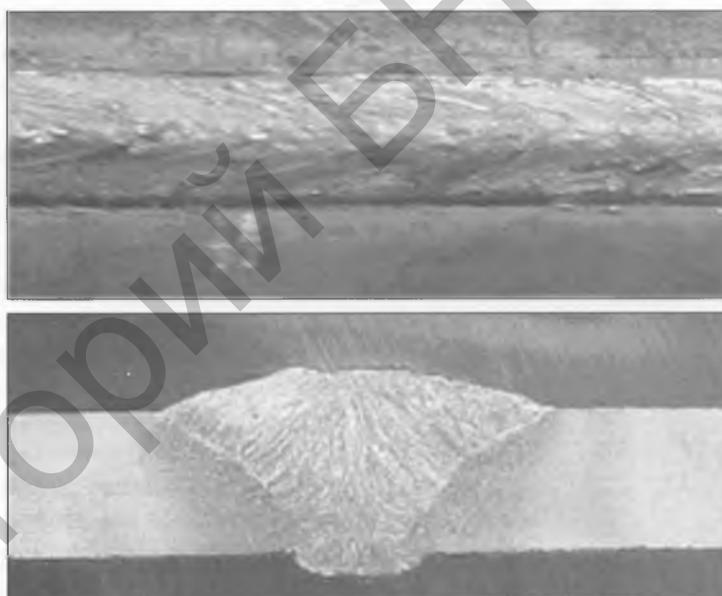


Рис. 4. Внешний вид (а) и макрошлиф (б) сварного соединения, полученного при механизированной сварке под сухим льдом низколегированной стали толщиной 6 мм.

23-27%, ударная вязкость при нормальной температуре, КСУ, 135-160 Дж/см<sup>2</sup>. При сварке тонколистовой стали наблюдалось уменьшение остаточных сварочных деформаций в 5 – 10 раз.

Техника и технология сварки под сухим льдом отличаются от сварки в углекислом газе, что обусловлено особенностями формирования защитной газовой фазы в зоне дуги и спецификой ведения сварочного процесса. Следует также учитывать заметное действие на сварочную ванну силы давления углекислого газа, образующегося, – о чем упоминалось выше, – при взрывной высокотемпературной сублимации сухого льда на поверхности жидкого метал-

ла. Сварка стыковых, угловых и дуговых точечных швов может осуществляться с использованием сухого льда в виде брикетов, пластин и гранул различных размеров, получаемых в том числе при дроблении и измельчении исходных материалов. Подготовленный к сварке лед выкладывается предварительно на всю длину сварного соединения слоем определенной толщины и ширины или вводится «под дугу». В этих и других случаях может иметь место схема сварки, при которой сухой лед дополнительно подается позади дуги на заданные участки остывающего сварного шва и/или металла зоны термического влияния. Подобная схема процесса представляет интерес для однопроводной бездеформационной сварки тонколистового металла и многопроводной сварки металла средней и большой толщины, когда требуется послойное охлаждение шва, например, при сварке аустенитной стали.

Механизированная и автоматическая сварка под сухим льдом осуществляется с применением обычного сварочного оборудования. При этом используются упрощенные конструкции сварочных горелок и гибких шлангов, поскольку отпадает необходимость подвода защитного газа через горелку в зону сварки. Баллоны с защитным газом и газовую аппаратуру заменяет простой термостат с сухим льдом.

#### Литература:

**Жизняков С.Н.** Правильный выбор и подготовка сварочных материалов - основа эффективного производства сварочных работ /С.Н. Жизняков // Сварщик в Белоруссии. – 2013. - № 1. – С. 32 – 38.

**Пантелеенко Ф.И.** Минимизация деформаций при аргонодуговой сварке тонколистовой аустенитной стали локальным охлаждением высокотемпературной области /Ф.И. Пантелеенко, С.Н. Жизняков, А. Хейдари Монфаред //Перспективные материалы и технологии /Под редакцией В.В. Клубовича - Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2013, - С. 172 – 187.

**Новожилов Н.М.** Основы металлургии дуговой сварки в газах / Н.М.Новожилов. – М.: Машиностроение, 1979. – 231 с.

**Жизняков С.Н.** Дуга и лед. Новый способ дуговой сварки плавящимся электродом / С.Н. Жизняков, Ф.И.Пантелеенко, Д.И. Викторовский, Н.И. Урбанович // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка: сб. докл. 8-го Междунар. симп. (Минск, 10 – 12 апр. 2013 г.). В 2 ч. Ч. 2 – Минск: Беларус. навука, 2013. – С. 347 – 349.

#### Выводы

Сухой лед – твердый диоксид углерода непосредственно участвует в процессе дуговой сварки, выполняя важные технологические и металлургические функции, обеспечивающие стабильное протекание самого процесса и получение качественных сварных соединений. Это дает основание считать его полноценным сварочным материалом, пригодным для успешного применения в сварочном производстве.

Разработанный принципиально новый способ сварки плавящимся электродом – сварка под сухим льдом IMAW (Ice Metal Arc Welding), не требующий газовой и шлаковой защиты и выполняемый с применением обычного сварочного оборудования, может быть использован при изготовлении, ремонте и монтаже стальных конструкций и сооружений.

Сухой лед в качестве сварочного материала применим при ручной дуговой сварке покрытыми электродами и других способах сварки плавлением, а также при выполнении наплавочных работ и резке металлов.