

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.791.037(204.1)

doi: 10.18698/0536-1044-2022-4-3-13

Подводная сварка с локальной водяной завесой зоны сварки*

Д.В. Рогозин

Донской государственный технический университет

Underwater Welding with a Local Water Curtain of the Welding Zone

D.V. Rogozin

Don State Technical University

■ Интенсивное развитие добычи нефти и газа в шельфовой зоне морей и океанов обуславливает необходимость строительства морских буровых платформ. Их монтаж и ремонт выполняют подводной сваркой, осуществляемой мокрым и сухим способами, которые имеют свои достоинства и области ограничения. Одним из перспективных направлений является сварка с локальной защитой зоны сварки за счет создания вокруг нее безводной полости. Водолаз-сварщик находится вне зоны защиты. В международной практике хорошо известен способ, где экранирование зоны сварки обеспечивает водоструйная завеса вокруг сопла сварочной горелки. Дан аналитический обзор научных публикаций по исследованию процесса подводной сварки с водяной завесой сопла сварочной горелки. Изучены гидродинамические параметры сварки. Рассмотрены особенности существования устойчивого дугового разряда, факторы, обуславливающие стабильность процесса и качество сварных соединений.

Ключевые слова: подводная сварка, локальная сухая полость, водяная завеса, сопло сварочной горелки

■ The intensive development of oil and gas production in the offshore zone of the seas and oceans determines the necessity of building offshore drilling platforms. Their installation and repair is performed by welding under water, which is carried out by wet and dry methods, which have their own advantages and limitations. One of the promising directions is welding with local protection of the welding zone, when an anhydrous cavity is created surrounding the welding zone. Welding diver is out of protection zone. The method where the shielding of the welding zone is provided by a water jet curtain around the nozzle of the welding torch is well known in international practice. The article presents the analytical review of scientific publications in the field of research of the underwater welding process with a water curtain surrounding the welding torch nozzle. The variables affecting the hydrodynamic parameters of the welding process, the features of the stable arc discharge existence, factors and their numerical parameters that determine the stability of the process and the quality of welded joints are discussed.

Keywords: underwater welding, local dry cavity, water curtain, curtain of welding nozzle

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-18-50220.

Подводную сварку (ПС) выполняют двумя способами: мокрым в водной среде и сухим в специальной защитной камере в газовой среде [1–5]. Мокрый способ ПС на глубине до 20 м экономически предпочтительнее сухого. Однако производительность и качество сварных соединений остаются низкими, а условия работы водолазов-сварщиков — очень трудоемкими.

Гипербарическая сухая сварка способствует получению сварных швов (далее швы), которые по качеству не уступают выполненным на воздухе. Однако объем подготовительных работ перед сваркой значительно увеличивает ее сроки и стоимость. Все это приводит к необходимости разработки и совершенствования оборудования и технологии ПС.

Одним из перспективных направлений является ПС с локальной защитой зоны сварки, когда создается окружающая ее безводная полость, а водолаз-сварщик находится вне зоны защиты [1]. Системой локальной защиты могут быть как небольшие боксы, закрепленные на конструкции, так и подвижные колпаки с герметизацией разного вида. Использование локальной защиты намного дешевле, чем сварка сухим способом и не требует индивидуальной оснастки для различных конструкций.

Цель работы — на основе анализа зарубежной литературы изучить гидродинамические параметры процесса ПС с водяной завесой (ВЗ) зоны сварки, выявить особенности существования устойчивого дугового разряда под водой, определить факторы, влияющие на стабильность процесса ПС и качество сварных соединений, систематизировать экспериментальные данные для более широкого применения ПС с ВЗ в России.

Способ, где экранирование зоны сварки обеспечивает ВЗ, известен с 1973 г. [2–4, 6]. Для механизированной ПС сплошной плавящейся проволокой применяют горелку с двойной защитой — водяной и газовой (рис. 1), что позволяет выполнять сварку в газовой среде (парогазовом пузыре) путем оттеснения воды из зоны сварки.

Горелка работает следующим образом. По специальному кольцевому каналу 3, расположенному эквидистантно по отношению к каналу 2 подачи защитного газа, поступает вода, окружающая горелку. В торцевой части сопла горелки канал 3 изогнут на угол θ во внешнюю сторону к окружающей воде. Через кольцевое отверстие на срезе сопла под давлением выте-

кает вода под углом к поверхности свариваемых деталей 11.

Между торцом сопла 1 горелки и свариваемыми деталями образуется ВЗ 10 в форме полого усеченного конуса. Такое направленное действие потока ВЗ вызывает вытеснение (отталкивание) воды между торцом сопла и свариваемыми деталями в окружающее его пространство, формирует локальную полость 8, внутрь которой подается защитный газ. Водяная завеса образует границу между окружающей водой и внутренней поверхностью защитного газа и создает надежную гидроструйную защиту зоны сварки и сварочной ванны от воздействия окружающей воды.

Оборудование для ПС такое же, как и для сварки на воздухе, за исключением сопла горелки для подачи воды и создания ВЗ. Дуговой процесс протекает в среде защитного газа аналогично условиям на воздухе, но с более интенсивным охлаждением свариваемых деталей. При этом выход пузырьков углекислого газа очень сильно затрудняет наблюдение за процессом сварки.

Водяная завеса, с одной стороны, препятствует быстрому высвобождению защитного газа, вытекающего сразу из-под сопла горелки, а с другой — попаданию окружающей воды в зону сварки. Если ВЗ нет, то большие пузырьки за-

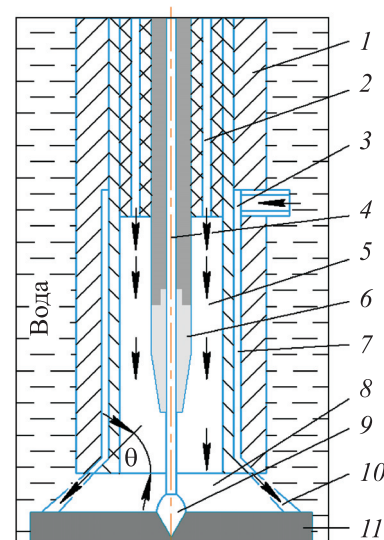


Рис. 1. Схема горелки с водяной завесой для ПС в защитных газах:

- 1 — сопло сварочной горелки; 2 и 3 — канал подачи защитного газа и воды; 4 — плавящийся электрод;
- 5 и 7 — внутренняя и наружная полости сопла сварочной горелки; 6 — токоподводящий наконечник;
- 8 — зона локальной защиты (локальная полость);
- 9 — сварочная дуга; 10 — ВЗ; 11 — свариваемые детали

щитного газа периодически выходят из зоны сварки (газового пузыря), и туда поступает окружающая вода. В случае недостаточного потока ВЗ выходящий поток газа является устойчивым, но часть воды остается в зоне сварки, и в шве будут присутствовать поры и свищи [7–9].

Условия и стабильность существования локальной полости (см. рис. 1) зависят от конфигурации и геометрических параметров сопла сварочной горелки: диаметра сопла, толщины канала подачи воды z на выходе из сопла, подачи (расхода) воды и защитного газа, зазора между соплом горелки и свариваемыми деталями.

Важнейшим геометрическим параметром является угол подачи воды θ к свариваемой детали. Он формирует форму зоны локальной защиты, влияет на возможность попадания воды в зону сварки. Кроме того, от этого параметра зависит необходимая подача (расход) воды [9, 10].

Сухой способ ПС осуществляется при угле истечения воды ВЗ $\theta = 30 \dots 60^\circ$ со скоростью $5 \dots 10$ л/мин при скорости потока защитного газа $40 \dots 60$ л/мин. Расстояние между соплом и изделием — $7 \dots 10$ мм, толщина канала подачи воды — $0,5$ мм.

При этом формирование безводной полости в зоне сварки обеспечивается разностью давлений Δp в зоне локальной защиты и окружающей водной среды, а также скоростью потока ВЗ [10, 11]. Если принять давление и радиус ВЗ (зависящий от зазора между наконечником сопла и свариваемой деталью) постоянными величинами, а трение на стенках пренебрежимо малым, то можно рассчитать давление или скорость потока ВЗ по формуле [12]

$$\Delta p = p_A - p_B = \frac{\rho \omega v_0^2}{r},$$

где p_A и p_B — давление в замкнутой и открытой области; ρ — плотность воды; ω — ширина канала ВЗ на выходе из сопла; v_0 — скорость потока воды ВЗ; r — радиус окружности ВЗ.

Дуговую ПС в защитном газе методом ВЗ применяют для сварки стыковых [7, 9] и угловых швов [8, 13]. Стыковые швы можно выполнять одно- и многопроходными сплошной и порошковой проволокой [14, 15]. Использование порошковой проволоки позволяет увеличить производительность ПС в 2–3 раза.

Так, при скорости ПС $v = 72$ м/ч на глубине $0,3$ м швы не имеют пор и трещин, значения механических свойств при испытаниях на из-

гиб и растяжение такие же, как при сварке на воздухе. При ПВ максимальная твердость шва составляет 300 HV, на таком же режиме при сварке на воздухе — 200 HV. Однако при использовании порошковой проволоки ухудшаются условия наблюдения за сваркой из-за плавления флюса.

В случае применения сплошной плавящейся проволоки производительность процесса ПС можно увеличить в 2 раза путем добавления в защитный газ $1 \dots 3\%$ кислорода. При сварке в аргоне сплошной проволокой диаметром $1,2$ мм (при давлении окружающей воды $p_B = 490$ кПа (5 атм), напряжении $U = 41$ В, силе тока $I = 300$ А) подрезы в наплавленном валике появляются при скорости сварки $v = 24$ м/ч, а при ПС в смеси газов ($97\% \text{ Ar} + 3\% \text{ O}_2$) — при $v = 48$ м/ч [16].

Увеличение скорости сварки может привести к нарушению эффекта экранирования, что компенсируется возрастанием расхода воды ВЗ. Однако это приведет к отражению воды ВЗ от свариваемой детали, и в зону сварки будут падать капли воды, насыщающие сварочную ванну водородом [9, 17]. Уменьшение содержания влаги в сварочной ванне достигается повышением тепловложения, например, увеличением погонной энергии. Количество диффузионного водорода в металле шва не будет превышать 2 см^3 на 100 г [17].

Расход газа — важнейший параметр, стабилизирующий локальную газовую полость и определяемый из условия наименьшего количества диффузионного водорода в металле шва. Так, при расходе защитного газа $55 \dots 60$ л/мин содержание диффузионного водорода в швах составляет $2 \dots 4 \text{ см}^3$ на 100 г [18, 19].

При ПС в условиях действия гидростатического давления воды режимы сварки (сила тока, напряжение, скорость) являются более значимыми и сильнее влияют на качество и геометрические параметры шва, чем при сварке на воздухе с нормальным атмосферным давлением. Сила тока и напряжение на дуге увеличиваются с повышением давления воды для обеспечения стабильного процесса ПС.

При ПС длинной дугой с напряжением $U = 40$ В и силой тока $I = 250$ А на глубине 90 м наблюдается нестабильное плавление электродной проволоки и повышение разбрызгивания электродного металла (рис. 2, а). При силе тока $I = 300$ А дуговой процесс стабильный, в шве отсутствуют дефекты (рис. 2, б) [20].

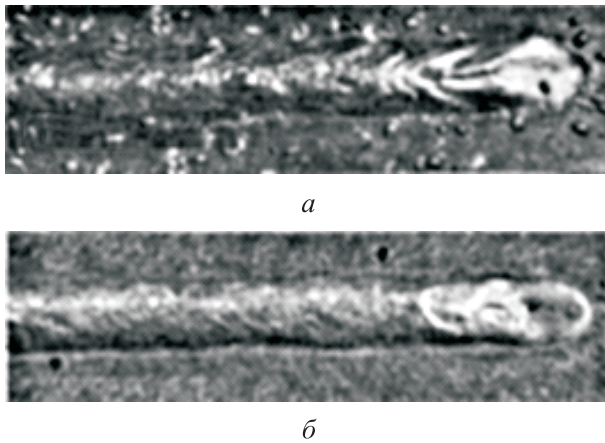


Рис. 2. Внешний вид валиков, наплавленных под водой на глубине 90 м сварочной горелкой с ВЗ в аргоне при расходе защитного газа $G_r = 50$ л/мин, расходе воды $G_b = 8$ л/мин, напряжении $U = 40$ В, скорости сварки $v = 18$ м/ч, силе тока $I = 250$ (а) и 300 А (б)

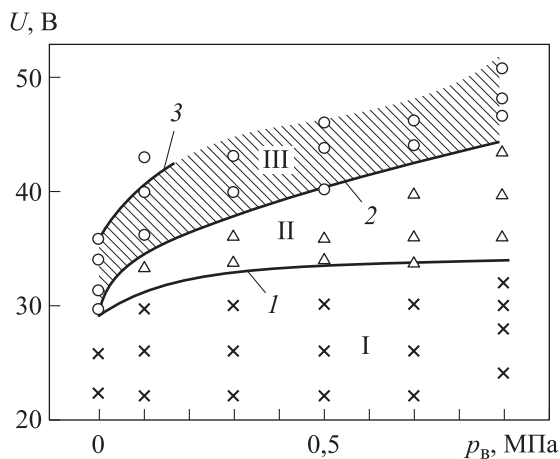


Рис. 3. Области переноса металла для разных видов дуговой ПС с ВЗ в углекислом газе:
 I — ПС с частыми короткими замыканиями дугового промежутка;
 II — ПС с нестабильным горением дуги и редкими короткими замыканиями дугового промежутка с крупнокапельным переносом металла;
 III — ПС длинной дугой с капельным переносом металла;
 ×, △ и ○ — результаты эксперимента для дуги с короткими замыканиями, нестабильного горения дуги и стабильного горения дуги и плавления электрода соответственно

При одном и том же значении силы тока характер переноса электродного металла зависит как от падения напряжения на дуговом промежутке, так и от давления окружающей воды p_w или глубины, на которой происходит ПС, что видно на рис. 3. Здесь сварка выполнена током обратной полярности с помощью электродной проволоки Св-08Г2С диаметром $d_s = 1,2$ мм при силе тока $I = 300$ А. Границы переходных процессов (кривые 1–3) между областями разно-

видностей переноса металла являются возрастающими.

С увеличением глубины, на которой происходит ПС, т. е. давления, интервалы изменения напряжения для различных областей переноса металла (I, II и III) увеличиваются. Выше заштрихованной области III в шве появляются подрезы [20].

Однако при возрастании мощности дуги, которая повышается с увеличением давления воды, растет количество сварочного аэрозоля [21]:

$$F = 5,3 \cdot 10^2 UI - 12,5, \text{ мг/мин,}$$

где F — интенсивность выделения сварочного аэрозоля.

Поэтому при высоком давлении ПС рекомендуется осуществлять с малыми значениями силы тока и напряжения на дуге, такими как при сварке короткой дугой с периодическими короткими замыканиями. При необходимости использования больших сварочных токов предпочтительнее применять сварку на прямой полярности (DCEN). Интенсивность выделения сварочного аэрозоля уменьшается с увеличением давления, а форма наплавленного валика аналогична таковой при сварке на обратной полярности (DCEP) и высоком давлении.

Повышение давления окружающей воды при неизменных параметрах ПС приводит к изменению параметров наплавленного валика: уменьшению ширины и высоты выпуклости и увеличению глубины проплавления (см. таблицу) [20].

Повышение давления воды не влияет на твердость металла шва и приводит к незначительному увеличению содержания диффузионного водорода в металле шва (2,2...3,5 см³ на 100 г). Твердость металла шва снижается с увеличением содержания кислорода в аргоне. При ПС в чистом аргоне (при давлении воды $p_w = 490$ кПа, напряжении $U = 38$ В, силе тока $I = 300$ А, скорости сварки $v = 18$ м/ч) твердость металла шва составляет более 300 HV, при ПС в смеси газов (90 % Ar + 10 % O₂) — 200 HV [20].

Параметры наплавленных валиков под водой при напряжении на дуге $U = 36$ В, силе тока $I = 300$ А и скорости сварки $v = 18$ м/ч

Глубина наплавки валика, м	Параметры наплавленного валика, мм		
	Ширина	Высота выпуклости	Глубина проплавления
1	15	2,6	3,6
90	10	3,2	5,4

В качестве защитного газа при ПС с ВЗ можно использовать углекислый газ, аргон и различные варианты их смесей с добавлением кислорода [18, 19, 22–24]. Выбор газовой защиты зависит от марки свариваемых сталей, обеспечения показателей качества, механических свойств и технологической прочности швов.

При ПС в защитной среде аргона на режимах, соответствующих крупнокапельному переносу электродного металла (см. рис. 3) на глубине 50 м и более, добавление кислорода от 1 до 5 % приводит к уменьшению размера капли. Крупнокапельный перенос электродного металла переходит в стабильный мелкокапельный с одновременным увеличением ширины валика, глубины проплавления и снижения образования подрезов.

При ПС в чистом аргоне ($p_v = 490$ кПа, $U = 38$ В, $I = 300$ А, $v = 18$ м/ч) твердость металла шва составляет более 300 НВ, при ПС в смеси газов (90 % Ar + 10 % O₂) — 200 НВ. Также увеличивается ударная вязкость шва [20]. При ПС в смесях аргона и кислорода (80 % Ar + 20 % O₂), углекислого газа и кислорода (95 % CO₂ + 5 % O₂) твердость металла угловых сварных швов также достигает 200 НВ [15].

При ПС с ВЗ (как и при любом мокром способе сварки) твердость металла шва становится выше, чем при сварке на воздухе из-за быстрого охлаждения окружающей водой [11, 24–26]. Снизить твердость наплавленного металла и металла в зоне сварки можно путем увеличения погонной энергии и использования смесей защитного газа. Более существенных результатов удастся достичь улучшением условий экранирования зоны сварки и применением различных способов, обеспечивающих замедленное охлаждение металла шва до значений, близких к таковым при сварке на воздухе.

Улучшение условий экранирования зоны сварки ВЗ позволяет уменьшить теплоотвод в окружающую воду с поверхности свариваемых деталей и тем самым снизить скорость охлаждения металла шва. С этой целью могут быть применены сварочные горелки разных диаметров и конфигураций, что приведет к большому разбросу значений расходов воды и защитного газа.

Например, в кольцевой камере сопла сварочной горелки, куда под давлением подается вода для создания водоструйной завесы, расположены направляющие лопасти. Они могут быть как неподвижными, так и вращающимися. В любом случае подаваемая вода закручивается,

на выходе из сопла циркулирует и создает вихрь, в результате чего центробежные силы препятствуют попаданию окружающей воды в зону сварки, где будет поддерживаться газовая атмосфера [27]. Лопастями может служить вращающаяся насадка с проволочной щеткой из нержавеющей стали, которая позволяет уменьшить пузырьки защитного газа и блики сварочной дуги [28, 29]. Улучшить условия наблюдения за процессом сварки можно применением сварочной горелки с тройным соплом для отвода защитного газа через внутреннее сопло [30]. Однако, несмотря на хорошие результаты, данные методы развития не получили.

Для улучшения метода экранирования зоны сварки применяют горелку особой конструкции с дополнительным прямоугольным соплом в хвостовой части [31]. В совокупности с использованием покрытия поверхности основного металла лентой этот метод позволяет снизить скорость охлаждения до значений, близких к таковым при сварке на воздухе. Так, при ПС высокопрочной стали НТ50 максимальная твердость сварного соединения меньше 380 НВ и не вызывает его растрескивания [31, 32].

Для обеспечения замедленного охлаждения металла шва применяют различные теплоустойчивые покрытия, которые прикрепляют как к наружным поверхностям прилегающих под сварку кромок, так и к внутренней поверхности свариваемых деталей с обратной стороны корня будущего шва.

Хорошие результаты показал следующий метод замедленного охлаждения [33]. На прилегающие к сварке кромки основного металла и на обратную поверхность деталей прикрепляют теплоизоляционный материал толщиной 1 мм и шириной 100 мм. В качестве этого материала можно использовать многослойную пленку из натурального каучука, полиэтилен или хлопчатобумажную ткань.

К сварочной горелке с ВЗ прикрепляют шатун, на другом краю которого устанавливают медную пластину (длиной 300 мм), прижимающую пенополиуретановую резину (толщиной 15 мм), выполняющую роль защитного материала. В процессе сварки защитный материал с медной пластиной перемещается за сварочной горелкой по изоляционному материалу и как бы заглаживает шов, тем самым создаются условия для замедленного охлаждения хвостовой части сварочной ванны и шва.

В результате удается добиться такой же скорости охлаждения до 300 °С, как и при сварке на воздухе (8...14 °С/с). Твердость шва аналогична получаемой при сварке на воздухе. Значительные улучшения наблюдаются в механических свойствах, таких как удлинение, прочность на разрыв, пластичность при изгибе и ударная вязкость [33].

Для уменьшения теплоотвода в окружающую воду с поверхности свариваемых деталей при ПС с ВЗ можно использовать способы сварки с высокой концентрацией тепла, как это делают при сварке на воздухе. В качестве таких способов используют лазерную сварку [34–38] и сварку неплавящимся вольфрамовым электродом в среде защитных газов [4, 39, 40].

Основная технологическая сложность применения этих способов проявляется в наличии пористости швов, вызванной образованием водяного пара на обратной поверхности свариваемых деталей (которая контактирует с окружающей водой) и высокой скоростью кристаллизации сварочной ванны. Качественные сварные соединения без пор можно получить при оптимальных параметрах процесса, когда прочность на растяжение, ударная вязкость и микротвердость приближаются к показателям сварного соединения, выполненного на воздухе [4, 10, 40].

При ПС зазор, перекосы и другие геометрические параметры сварного соединения должны быть оценены перед началом рабочего процесса, чтобы выбрать необходимые режимы и технику сварки. Если имеется некоторое искажение или слишком большая ширина зазора в нижней части корня соединения, то для получения хорошего экранирования дуги необходимо большее количество потока защитного газа [23, 41–48].

Зазор между свариваемыми деталями (до 2...3 мм) не влияет на качество сварных соединений, через него не поступает вода в локальную сухую газовую полость при соответствующих расходах защитного газа и воды в ВЗ [7, 8]. Однако полный провар корня шва без подкладки получить практически невозможно, так как поддерживать устойчивость локальной газовой полости в зоне сварки довольно сложно.

Для этих целей в основном используют различные подкладки: стальную остающуюся, скользящую медную или статическую беспористую керамическую. С точки зрения эффективности процесса предпочтительнее односторонняя сварка [23, 41–48].

Одним из основных этапов реализации ПС с ВЗ является контроль положения и перемещения сопла горелки в процессе сварки. Рабочее расстояние между соплом и свариваемыми элементами следует поддерживать постоянным. Видимость в разделке, как правило, неблагоприятная для ПС. Кроме того, ВЗ с бесчисленными мелкими пузырьками защитного газа загораживает зону стыка.

Для решения этих задач необходимо использовать методы слежения за перемещением по свариваемому стыку или проводить ПС в автоматическом режиме сварочными автоматами. Для слежения за перемещением по свариваемому стыку широко применяют следующие методы: механическую сенсорную систему, систему визуального зондирования, визуальное зондирование волоконным оптическим прицелом и визуальное восприятие процесса дуговой сварки. Более подробно эти методы описаны в работах [41–44, 46, 48].

Автоматическая ПС осуществляется с использованием системы автоматической сварки горизонтальных кольцевых стыков труб [22], погружного аппарата автоматической сварки с дистанционной системой телевизионного наблюдения и контроля процесса ПС [39], автоматической сварочной системы для сварки труб [49].

Следует отметить, что ПС с ВЗ для сварки ответственных конструкций и конструкций на глубине более 20 м применима только в автоматическом режиме с использованием указанных систем слежения и контроля перемещения сварочной горелки за стыком в различных пространственных положениях, а также для подводной резки, обеспечивая качество реза со скоростью, как и на воздухе [50].

Приведенный анализ литературных источников показал, что ПС с ВЗ зоны сварки обладает большими возможностями механизации и автоматизации процесса на больших глубинах с обеспечением требуемого качества сварных соединений пространственных деталей из сталей различных марок, в том числе высокопрочных.

Выводы

1. Механизированная дуговая ПС мокрым способом в защитном газе горелкой с ВЗ обеспечивает сварным соединениям такие же механические свойства, что и сварка в защитном газе на воздухе.

2. Характер переноса металла при ПС мокрым способом с ВЗ при постоянном значении силы тока зависит от давления окружающей воды и напряжения на дуге.

3. Геометрические размеры сварного валика при постоянных параметрах режима сварки (таких как сила тока, напряжение, скорость)

зависят от глубины сварки. С увеличением глубины сварки ширина валика уменьшается, а высота выпуклости и глубина проплавления растут.

4. Для исключения подрезов шва сварку необходимо проводить при пониженной скорости.

Литература

- [1] AWS D3.6M:2017. *Underwater welding code*.
- [2] Sakakibara J. A survey of underwater welding and cutting in sea water. *J. JWS*, 1991, vol. 60, no. 1, pp. 24–29, doi: <https://doi.org/10.2207/qjwsw1943.60.24>
- [3] Łabanowski J., Fydrych D., Rogalski G. Underwater welding — a review. *Adv. Mater. Sci.*, 2008, vol. 8, no. 3, pp. 11–22.
- [4] Kiran Sai Kumar S., Pavan Kumar Reddy V., Bharath Chowdary C. Fundamental study of underwater welding. *IJATIR*, 2015, vol. 7, no. 11, pp. 2076–2079.
- [5] Barnabas S.G., Rajakarunakaran S., Pandian G.S. et al. Review on enhancement techniques necessary for the improvement of underwater welding. *Mater. Today: Proc.*, 2021, vol. 45–2, pp. 1191–1195, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.725>
- [6] Sagara H., Nishio Y., Wada H. et al. *Welding torch for underwater welding*. Patent US 4029930. Appl. 02.08.1973, publ. 14.06.1977.
- [7] Hamasaki M., Sakakibara J. Studies on the underwater CO₂ arc welding method with a curtain nozzle. *J. JWS*, 1973, vol. 42, no. 9, pp. 897–906, doi: <https://doi.org/10.2207/qjwsw1943.42.897>
- [8] Hamasaki M., Sakakibara J. Studies on the underwater CO₂ arc welding method with a curtain nozzle. *J. JWS*, 1974, vol. 43, no. 9, pp. 868–875, doi: <https://doi.org/10.2207/qjwsw1943.43.868>
- [9] Watanabe M., Hamasaki M., Sakakibara J. Underwater butt welding of mild steel with water curtain type CO₂ arc welding method. *Trans. Jap. Weld. Soc.*, 1975, vol. 6, no. 2, pp. 3–9.
- [10] Рогозин Д.В., Маслов И.В. Численное моделирование формирования локальной защиты при подводной сварке с водяной завесой сопла. *Сварка и диагностика*, 2018, № 4, с. 34–37.
- [11] Almeida D.S., Machado I.G. Development of wet underwater GMAW with local cavity process. *21 Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem*, 1995, pp. 1–12.
- [12] Nishiguch K., Matsunawa A., Tamura M. et al. Development of underwater welding with local cavity formation method. *Proc. 2nd Int. Symp. Japan Welding Sec. on the Advanced Welding Technology*, 1975, no. 2-2-(6), pp. 315–320.
- [13] Hoffmeister H., Kuster K., Boellinghaus T. et al. Repair welding of tubular structures by an underwater low hydrogen wet fillet weld system. *Proc. Welding of Tubular Structures*, 1984, pp. 145–150, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-031156-2.50009-9>
- [14] Sakakibara J., Tateiwa F., Hamasaki M. Water curtain type underwater CO₂ arc welding by using flux cored wire (the first report). *J. JWS*, 1974, vol. 43, no. 1, pp. 23–30, doi: <https://doi.org/10.2207/qjwsw1943.43.23>
- [15] Hamasaki M., Sakakibara J., Tateiwa F. On the curtain type CO₂ arc welding using flux cored wires. *J. JWS*, 1974, vol. 43, no. 2, pp. 141–146, doi: <https://doi.org/10.2207/qjwsw1943.43.141>
- [16] Arata Y., Hamasaki M., Sakakibara J. Water curtain type underwater MIG arc welding (the 2nd report). *J. JWS*, 1977, vol. 46, no. 10, pp. 728–734, doi: https://doi.org/10.2207/qjwsw1943.46.10_728
- [17] Arata Y., Hamasaki M., Sakakibara J. Hydrogen content in arc atmosphere of water curtain type underwater argon arc welding. *Trans. Jap. Weld. Soc.*, 1981, vol. 10, no. 1, pp. 19–25.
- [18] Hoffmeister H., Kuster K. Process variables and properties of underwater wet shielded metal arc laboratory welds. *Proc. Int. Conf. Underwater Welding*. Trondheim, 1983, pp. 115–120.

- [19] Hoffmeister H., Kuster K. Process variables and properties of wet underwater gas metal arc laboratory and sea welds of medium strength steels. *Proc. Int. Conf. Underwater Welding*. Trondheim, 1983, pp. 121–128.
- [20] Arata Y., Hamasaki M., Sakakibara J. Water curtain type underwater MIG arc welding (the 1st report). *J. JWS*, 1977, vol. 46, no. 9, pp. 648–655, doi: https://doi.org/10.2207/qjws1943.46.9_648
- [21] Sakakibara J., Matsuoka S., Ogawa Y. Weld fumes in high pressure MIG welding. *Q. J. Jpn. Weld. Soc.*, 1988, vol. 6, no. 4, pp. 468–473, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws.6.468>
- [22] Hamasaki M., Sakakibara J., Minehisa S. et al. Automatic wet underwater welding at horizontal position of tubes using water curtain type GMA welding technique. *Trans. Jap. Weld. Soc.*, 1978, vol. 9, no. 2, pp. 11–16.
- [23] Ogawa Y., Irie T., Ono Y. et al. Effect of shielding gas on underwater CO₂ welding. *Proc. 76th OMAE*, 1998, p. 11.
- [24] Rogalski G., Labanowski J., Fydrych D. et al. Bead-on-plate welding on S235JR steel by underwater local dry chamber process. *Polish Maritime Research*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 58–64.
- [25] Satoh K., Tamura M., Ohmae T. et al. Study on cooling characteristic and hardness in locally drying under water weld of mild steel and 50 kgf/mm² h.t. steel. *J. JWS*, 1981, vol. 50, no. 8, pp. 800–806.
- [26] Lee K.B., Hwang S.H., Park Y.I. et al. A study on locally drying underwater welding. *J. KWS*, 1992, vol. 10, no. 2, pp. 51–62.
- [27] Stingelin V., Budliger J.P., Katzarkoff J. et al. *Underwater welding apparatus*. Patent US 4172974. Appl. 01.03.1977, publ. 30.10.1979.
- [28] Hamasaki M., Sakakibara J., Arata Y. Underwater MIG welding using a wire brush nozzle. *Met. Constr.*, 1979, vol. 11, no. 6, pp. 288–289.
- [29] Sakakibara J., Hamasaki M., Funamori S. et al. Study to protect shielding gas from influence of side wind using wire brush nozzle. *J. JWS*, 1982, vol. 51, no. 11, pp. 928–932, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws1943.51.928>
- [30] Stingelin V., Budliger J.-P., Katzarkoff J. et al. *Apparatus and method for creating dry underwater welds*. Patent US 5981896. Appl. 26.08.1998, publ. 09.11.1999.
- [31] Hamasaki M., Sakakibara J. Underwater welding of high tensile strength steel. *J. JWS*, 1979, vol. 48, no. 2, pp. 115–120, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws1943.48.115>
- [32] Hoffmeister H., Kuster K., Schafstall H-G. Weld joint properties of medium strength steels after underwater wet MIG-welding by the water curtain process. *2nd Int. Conf. Offshore Welded Structures*. London, The Welding Institute, 1983, pp. P17.1–P17.8.
- [33] Satoh K., Tamura M., Ohmae T. et al. Study on improvement of locally drying underwater welding joint by retarded cooling method. *J. JWS*, 1982, vol. 51, no. 8, pp. 665–672, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws1943.51.665>
- [34] Takahashi K., Kobayashi H., Yoneyama T. In-water laser ablation of metals by Q-switched Nd:YAG laser. *Preprints of the National Meeting of JWS*, vol. 66, pp. 70–71.
- [35] Kajiwara J. Study on the fundament of underwater welding technology. Research Report of Shikoku Industrial Technology Institution, 0389-12161986.
- [36] Morita I., Tsuchiya K., Owaki K. et al. Development of underwater Nd:YAG laser welding technology. IIW Doc. IV-768-2000.
- [37] Zhang X., Ashida E., Shono S. et al. Effect of shielding conditions of local dry cavity on weld quality in underwater Nd:YAG laser welding. *J. Mater. Process. Technol.*, 2006, vol. 174, no. 1–3, pp. 34–41, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.12.009>
- [38] Guo N., Fu Y., Xing X. et al. Underwater local dry cavity laser welding of 304 stainless steel. *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, vol. 260, pp. 146–155, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.05.025>
- [39] Tamura M., Nishio Y., Wada H. Development of automatic underwater welding with local cavity formation method. *Proc. Ann. Offshore Tech. Conf.*, 1976, pp. 333–344, doi: <https://doi.org/10.4043/2646-MS>
- [40] Obana T., Hamada Y., Ootsuka T. et al. Development of maintenance technology with underwater TIG welding for spent fuel storage pool. *Weld. Int.*, 2009, vol. 23, no. 5, pp. 382–396, doi: <https://doi.org/10.1080/09507110802542791>

- [41] Ono Y., Nishida K., Tohno K. et al. Mechanized wet CO₂ welding for butt joints. *Proc. 16th OMAE*, 1997, vol. 3, part 1-B, pp. 35–41.
- [42] Irie T., Ono Y., Matsushita H. et al. Formation of local cavity by water curtain nozzle. *Proc. 16th OMAE*, 1997, vol. 3, part 1-B, pp. 43–50.
- [43] Kitamura N., Tohno K., Nishida K. et al. Site trial of mechanized wet welding for a 'mega-float'. *Proc. 16th OMAE*, 1997, vol. 6, part 1-B, pp. 23–29.
- [44] Ogawa Y. Detection of wet condition for underwater local dry welding. *Proc. OPEC*, 1998, vol. 3, part 3, pp. 169–172.
- [45] Irie T., Ono Y., Sato M. et al. Underwater butt welding down to 10 m. *Proc. 17th OMAE*, 1998, 23 p.
- [46] Ogawa Y. Mechanization of underwater wet welding. *Proc. VLFS99*, 1999, vol. 2, pp. 708–716.
- [47] Irie T., Nakatani T., Ono Y. et al. New underwater welding with super-water-repellent material. *Proc. 20th OMAE*, 2001, vol. 3, pp. 153–159.
- [48] Ogawa Y. Mechanization of underwater welding and cutting for VLFS. *Proc. Int. Symp. Underwater Technology*, 2002, pp. 87–92, doi: <https://doi.org/10.1109/UT.2002.1002395>
- [49] Ohmae T., Manabe Y., Nagata Y. et al. Practical application of locally drying underwater welding for steel pipes. *Proc. Int. Conf. Underwater Welding*, Trondheim, 1983, pp. 333–340.
- [50] Hamasaki M., Murao Y. Underwater gas cutting (first report). *Trans. Jap. Weld. Soc.*, 1978, vol. 9, no. 2, pp. 17–22.

References

- [1] AWS D3.6M:2017. *Underwater welding code*.
- [2] Sakakibara J. A survey of underwater welding and cutting in sea water. *J. JWS*, 1991, vol. 60, no. 1, pp. 24–29, doi: <https://doi.org/10.2207/qjwsw1943.60.24>
- [3] Łabanowski J., Fydrych D., Rogalski G. Underwater welding — a review. *Adv. Mater. Sci.*, 2008, vol. 8, no. 3, pp. 11–22.
- [4] Kiran Sai Kumar S., Pavan Kumar Reddy V., Bharath Chowdary C. Fundamental study of underwater welding. *IJATIR*, 2015, vol. 7, no. 11, pp. 2076–2079.
- [5] Barnabas S.G., Rajakarunakaran S., Pandian G.S. et al. Review on enhancement techniques necessary for the improvement of underwater welding. *Mater. Today: Proc.*, 2021, vol. 45–2, pp. 1191–1195, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.725>
- [6] Sagara H., Nishio Y., Wada H. et al. *Welding torch for underwater welding*. Patent US 4029930. Appl. 02.08.1973, publ. 14.06.1977.
- [7] Hamasaki M., Sakakibara J. Studies on the underwater CO₂ arc welding method with a curtain nozzle. *J. JWS*, 1973, vol. 42, no. 9, pp. 897–906, doi: <https://doi.org/10.2207/qjwsw1943.42.897>
- [8] Hamasaki M., Sakakibara J. Studies on the underwater CO₂ arc welding method with a curtain nozzle. *J. JWS*, 1974, vol. 43, no. 9, pp. 868–875, doi: <https://doi.org/10.2207/qjwsw1943.43.868>
- [9] Watanabe M., Hamasaki M., Sakakibara J. Underwater butt welding of mild steel with water curtain type CO₂ arc welding method. *Trans. Jap. Weld. Soc.*, 1975, vol. 6, no. 2, pp. 3–9.
- [10] Rogozin D.V., Maslov I.V. Numerical modelling of local protection formation at underwater welding with water screening of a nozzle. *Svarka i diagnostika [Welding and Diagnostics]*, 2018, no. 4, pp. 34–37. (In Russ.).
- [11] Almeida D.S., Machado I.G. Development of wet underwater GMAW with local cavity process. *21 Encontro Nacional de Tecnologia de Soldagem*, 1995, pp. 1–12.
- [12] Nishiguch K., Matsunawa A., Tamura M. et al. Development of underwater welding with local cavity formation method. *Proc. 2nd Int. Symp. Japan Welding Sec. on the Advanced Welding Technology*, 1975, no. 2-2-(6), pp. 315–320.
- [13] Hoffmeister H., Kuster K., Boellinghaus T. et al. Repair welding of tubular structures by an underwater low hydrogen wet fillet weld system. *Proc. Welding of Tubular Structures*, 1984, pp. 145–150, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-031156-2.50009-9>
- [14] Sakakibara J., Tateiwa F., Hamasaki M. Water curtain type underwater CO₂ arc welding by using flux cored wire (the first report). *J. JWS*, 1974, vol. 43, no. 1, pp. 23–30, doi: <https://doi.org/10.2207/qjwsw1943.43.23>

- [15] Hamasaki M., Sakakibara J., Tateiwa F. On the curtain type CO₂ arc welding using flux cored wires. *J. JWS*, 1974, vol. 43, no. 2, pp. 141–146, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws1943.43.141>
- [16] Arata Y., Hamasaki M., Sakakibara J. Water curtain type underwater MIG arc welding (the 2nd report). *J. JWS*, 1977, vol. 46, no. 10, pp. 728–734, doi: https://doi.org/10.2207/qjws1943.46.10_728
- [17] Arata Y., Hamasaki M., Sakakibara J. Hydrogen content in arc atmosphere of water curtain type underwater argon arc welding. *Trans. Jap. Weld. Soc.*, 1981, vol. 10, no. 1, pp. 19–25.
- [18] Hoffmeister H., Kuster K. Process variables and properties of underwater wet shielded metal arc laboratory welds. *Proc. Int. Conf. Underwater Welding*, Trondheim, 1983, pp. 115–120.
- [19] Hoffmeister H., Kuster K. Process variables and properties of wet underwater gas metal arc laboratory and sea welds of medium strength steels. *Proc. Int. Conf. Underwater Welding*, Trondheim, 1983, pp. 121–128.
- [20] Arata Y., Hamasaki M., Sakakibara J. Water curtain type underwater MIG arc welding (the 1st report). *J. JWS*, 1977, vol. 46, no. 9, pp. 648–655, doi: https://doi.org/10.2207/qjws1943.46.9_648
- [21] Sakakibara J., Matsuoka S., Ogawa Y. Weld fumes in high pressure MIG welding. *Q. J. Jpn. Weld. Soc.*, 1988, vol. 6, no. 4, pp. 468–473, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws.6.468>
- [22] Hamasaki M., Sakakibara J., Minehisa S. et al. Automatic wet underwater welding at horizontal position of tubes using water curtain type GMA welding technique. *Trans. Jap. Weld. Soc.*, 1978, vol. 9, no. 2, pp. 11–16.
- [23] Ogawa Y., Irie T., Ono Y. et al. Effect of shielding gas on underwater CO₂ welding. *Proc. 76th OMAE*, 1998, p. 11.
- [24] Rogalski G., Łabanowski J., Fydrych D. et al. Bead-on-plate welding on S235JR steel by underwater local dry chamber process. *Polish Maritime Research*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 58–64.
- [25] Satoh K., Tamura M., Ohmae T. et al. Study on cooling characteristic and hardness in locally drying under water weld of mild steel and 50 kgf/mm² h.t. steel. *J. JWS*, 1981, vol. 50, no. 8, pp. 800–806.
- [26] Lee K.B., Hwang S.H., Park Y.I. et al. A study on locally drying underwater welding. *J. KWS*, 1992, vol. 10, no. 2, pp. 51–62.
- [27] Stingelin V., Budliger J.P., Katzarkoff J. et al. *Underwater welding apparatus*. Patent US 4172974. Appl. 01.03.1977, publ. 30.10.1979.
- [28] Hamasaki M., Sakakibara J., Arata Y. Underwater MIG welding using a wire brush nozzle. *Met. Constr.*, 1979, vol. 11, no. 6, pp. 288–289.
- [29] Sakakibara J., Hamasaki M., Funamori S. et al. Study to protect shielding gas from influence of side wind using wire brush nozzle. *J. JWS*, 1982, vol. 51, no. 11, pp. 928–932, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws1943.51.928>
- [30] Stingelin V., Budliger J.-P., Katzarkoff J. et al. *Apparatus and method for creating dry underwater welds*. Patent US 5981896. Appl. 26.08.1998, publ. 09.11.1999.
- [31] Hamasaki M., Sakakibara J. Underwater welding of high tensile strength steel. *J. JWS*, 1979, vol. 48, no. 2, pp. 115–120, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws1943.48.115>
- [32] Hoffmeister H., Kuster K., Schafstall H.-G. Weld joint properties of medium strength steels after underwater wet MIG-welding by the water curtain process. *2nd Int. Conf. Offshore Welded Structures*. London, The Welding Institute, 1983, pp. P17.1–P17.8.
- [33] Satoh K., Tamura M., Ohmae T. et al. Study on improvement of locally drying underwater welding joint by retarded cooling method. *J. JWS*, 1982, vol. 51, no. 8, pp. 665–672, doi: <https://doi.org/10.2207/qjws1943.51.665>
- [34] Takahashi K., Kobayashi H., Yoneyama T. In-water laser ablation of metals by Q-switched Nd:YAG laser. *Preprints of the National Meeting of JWS*, vol. 66, pp. 70–71.
- [35] Kajiwara J. Study on the fundament of underwater welding technology. Research Report of Shikoku Industrial Technology Institution, 0389-12161986.
- [36] Morita I., Tsuchiya K., Owaki K. et al. Development of underwater Nd:YAG laser welding technology. IIW Doc. IV-768-2000.
- [37] Zhang X., Ashida E., Shono S. et al. Effect of shielding conditions of local dry cavity on weld quality in underwater Nd:YAG laser welding. *J. Mater. Process. Technol.*, 2006, vol. 174, no. 1–3, pp. 34–41, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.12.009>

- [38] Guo N., Fu Y., Xing X. et al. Underwater local dry cavity laser welding of 304 stainless steel. *J. Mater. Process. Technol.*, 2018, vol. 260, pp. 146–155, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.05.025>
- [39] Tamura M., Nishio Y., Wada H. Development of automatic underwater welding with local cavity formation method. *Proc. Ann. Offshore Tech. Conf.*, 1976, pp. 333–344, doi: <https://doi.org/10.4043/2646-MS>
- [40] Obana T., Hamada Y., Ootsuka T. et al. Development of maintenance technology with underwater TIG welding for spent fuel storage pool. *Weld. Int.*, 2009, vol. 23, no. 5, pp. 382–396, doi: <https://doi.org/10.1080/09507110802542791>
- [41] Ono Y., Nishida K., Tohno K. et al. Mechanized wet CO₂ welding for butt joints. *Proc. 16th OMAE*, 1997, vol. 3, part 1-B, pp. 35–41.
- [42] Irie T., Ono Y., Matsushita H. et al. Formation of local cavity by water curtain nozzle. *Proc. 16th OMAE*, 1997, vol. 3, part 1-B, pp. 43–50.
- [43] Kitamura N., Tohno K., Nishida K. et al. Site trial of mechanized wet welding for a 'mega-float'. *Proc. 16th OMAE*, 1997, vol. 6, part 1-B, pp. 23–29.
- [44] Ogawa Y. Detection of wet condition for underwater local dry welding. *Proc. OPEC*, 1998, vol. 3, part 3, pp. 169–172.
- [45] Irie T., Ono Y., Sato M. et al. Underwater butt welding down to 10 m. *Proc. 17th OMAE*, 1998, 23 p.
- [46] Ogawa Y. Mechanization of underwater wet welding. *Proc. VLFS99*, 1999, vol. 2, pp. 708–716.
- [47] Irie T., Nakatani T., Ono Y. et al. New underwater welding with super-water-repellent material. *Proc. 20th OMAE*, 2001, vol. 3, pp. 153–159.
- [48] Ogawa Y. Mechanization of underwater welding and cutting for VLFS. *Proc. Int. Symp. Underwater Technology*, 2002, pp. 87–92, doi: <https://doi.org/10.1109/UT.2002.1002395>
- [49] Ohmae T., Manabe Y., Nagata Y. et al. Practical application of locally drying underwater welding for steel pipes. *Proc. Int. Conf. Underwater Welding*. Trondheim, 1983, pp. 333–340.
- [50] Hamasaki M., Murao Y. Underwater gas cutting (first report). *Trans. Jap. Weld. Soc.*, 1978, vol. 9, no. 2, pp. 17–22.

Статья поступила в редакцию 08.12.2021

Информация об авторе

РОГОЗИН Дмитрий Викторович — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства». Донской государственный технический университет (344000, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, площадь Гагарина, д. 1, e-mail: dmrogozin@yandex.ru).

Information about the author

ROGOZIN Dmitry Viktorovich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Machines and Automation of Welding Production. Don State Technical University (344000, Rostov-on-Don, Russian Federation, Gagarina Sq., Bldg. 1, e-mail: dmrogozin@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Рогозин Д.В. Подводная сварка с локальной водяной завесой зоны сварки. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 4, с. 3–13, doi: [10.18698/0536-1044-2022-4-3-13](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-4-3-13)

Please cite this article in English as:

Rogozin D.V. Underwater Welding with a Local Water Curtain of the Welding Zone. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 4, pp. 3–13, doi: [10.18698/0536-1044-2022-4-3-13](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-4-3-13)