

---

**В. Я. Кононенко**

**ПОДВОДНАЯ  
СВАРКА  
И РЕЗКА**

*2-е издание,  
дополненное и переработанное*

*Под общей редакцией академика Б. Е. Патона*

Киев  
2011

УДК 621.791 : 669.71

ББК

К 64

**Кононенко В.Я.**

К 64 Подводная сварка и резка. — Киев, 2011. — 264 с.

ISBN

В монографии рассмотрены особенности горения дуги, перенос металла и условия формирования соединения при сварке под водой. Сформулированы общие принципы создания покрытых электродов и самозащитных порошковых проволок для выполнения подводной сварки. Даны их механические свойства. Приведены типы сварных соединений, методика подготовки и сборки под сварку, возможные дефекты соединений и электрические параметры дугового процесса. Обобщены типичные повреждения подводных металлоконструкций и приведены технологические решения, использовавшиеся при их успешном восстановлении с помощью подводной сварки плавящимся электродом. Описано оборудование для реализации процессов мокрой и сухой подводной сварки плавящимся электродом.

Изложены основные способы подводной резки. Даны их сравнительные характеристики. Приведены сравнительные данные электродных материалов. Кратко описаны примеры успешной реализации технологий подводной резки.

Рассчитана на научный и инженерно-технический персонал, занимающийся подводно-техническими работами, а также «продвинутых» водолазов-сварщиков.

**Рецензенты:**

*К. В. Логунов*, проф., д-р техн. наук, кафедра морської та підводної медицини С.-Петербурзької медичної академії;

*В. Д. Кузнєцов*, проф., д-р техн. наук, кафедра відновлювання деталей машин Національного технічного університету України (КПІ).

*Автор благодарит О. Б. Волкова и С. Ю. Максимова за предоставленные фотографии.*

*Фото на обл.: Сварка стыкового образца, выполняемая автором (1990 г., Новый Орлеан, США).*

*Ни один из фрагментов данного издания не может быть распространен, сохранен с помощью систем воспроизведения или передачи информации в любой форме или с использованием каких-либо других средств, электронных или механических, в том числе путем фотокопирования, микрофильмирования или записи без предварительного письменного согласия автора.*

*Для получения разрешения на копирование от автора обращаться по адресу:*

03150 Киев 150 а/я 52 Кононенко Виктору Яковлевичу

Тел. + 380 44 200 80 56 р.

+ 380 67 401 02 66 моб.

+ 380 50 380 72 76 моб.

E-mail: victor@kononenko.kiev.ua

*Жоден з фрагментів даного видання не може бути розповсюджений, збережений за допомогою систем відновлення або передавання інформації в будь-якій формі або іншим шляхом, електронним або механічним, у тому числі шляхом фотокопіювання, мікрофільмування або запису без попередньої письмової згоди автора.*

*Для отримання дозволу на копіювання від автора звертайтеся за адресою:*

03150 Київ 150 а/с 52 Кононенку Віктору Яковичу.

Тел. + 380 44 200 80 56 р.

+ 380 67 401 02 66 моб.

+ 380 50 380 72 76 моб.

E-mail: victor@kononenko.kiev.ua

*No part of publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, microfilming or recording, without permission of the author.*

*To obtain a permission from the authors contact with*

V. Kononenko box 52 Kiev 150 03150 Ukraine

Phone: + 380 44 200 80 56

+ 380 67 401 0266

+ 380 50 380 7276

E-mail: victor@kononenko.kiev.ua

---

## От автора

Более 20 лет назад я решил обобщить практический опыт выполнения сварочных работ под водой и изложить информацию, которой располагаю. Первоначально предполагал защитить докторскую диссертацию, однако ее, кроме автора, нескольких рецензентов и небольшого количества соискателей, как правило, никто не читает. Доступа к «высоким научным материям», которые там излагаются, простой пользователь не имеет, а сама диссертация в последнее время приносит пользу лишь самому автору. По этой причине в 2004 г. я написал книгу «Технологии подводной сварки и резки»\*, в которой изложено мое видение вопроса в этом направлении. Книга была издана тиражом 800 экземпляров, которые полностью разошлись еще в 2008 г., что говорит о востребованности этого вида деятельности у пользователей. Можно было повторно издать эту книгу, однако с момента ее публикации произошли существенные изменения в технологиях выполнения подводно-технических работ и повысились требования к исполнителям и качеству их проведения. Усовершенствовался ряд технологических процессов подводной сварки и резки. Появились запросы зарубежных пользователей в части передачи им ряда технологических решений подводной сварки и резки. Поэтому материал был мной доработан, и в первую очередь применительно к практическим аспектам работ, которые выполняются в настоящее время.

Книга «Подводная сварка и резка» состоит из 7 глав. Основное внимание в ней уделено технологиям РДС и МССПП непосредственно в воде, наиболее востребованным на территории стран СНГ. Кроме того, за последние 20 лет повысились требования к исполнителям, связанные с получением соединений под водой с гарантированным уровнем качества, что не всегда возможно достичь при использовании технологий мокрой сварки под водой. В связи с этим в новую книгу введено описание технологии выполнения сварочных работ в газовой среде, заполняющий кессон. Этот технологический процесс в настоящее время востребован в России и является преобладающими в этом направлении при выполнении ремонтов подводных переходов газо- и нефтепроводов через водные преграды. Изложены также наиболее востребованные способы разделения металлоконструкций под водой. Даны их характеристики и приведены сравнительные данные электродных

---

\* Эта книга с дополнениями и исправлениями вышла в 2006 г. на английском языке под названием «Technologies of underwater wet welding and cutting».

материалов, используемых для реализации этих технологий. Кратко описаны примеры успешного применения технологий подводной резки.

За последнее время в России появилась группа специалистов, длительное время проработавших под водой и владеющих всеми нюансами технологии мокрой сварки самозащитными порошковыми проволоками. Познания в области практического применения этой технологии у них значительно выше, чем у разработчиков. Их задача — получение конечного результата с прогнозируемым уровнем качества и минимальными трудозатратами. Они смогли доработать конструкцию погружных узлов полуавтоматов и сделали их пригодными для работы в экстремальных условиях сварки под водой, что не всегда получается у конструкторов. К этой когорте в первую очередь можно отнести водолаза-сварщика Александра Нестерова, который выполнил более половины из 1800 м шва в потолочном положении при сварке кессона ледостойкого основания платформы «Приразломная».

Несколько слов о себе. Родился в Киеве 01.12.1947 г. После окончания техникума и Киевского политехнического института профессионально занимаюсь сваркой. С 1967 по 1971 гг. работал на кафедре сварки в КПИ, а с 1971 по 1996 гг. — в отделе №18 (Лаборатория подводной сварки и резки) ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, где занимался исследовательской работой. Принимал участие в разработке электродных материалов, а также испытаниях оборудования для проведения подводно-технических работ. Самостоятельно и в составе группы выполнил ряд работ под водой, связанных с восстановлением подводных переходов трубопроводов через реки Обь, Волга, Днепр, принимал участие в приварке пластыря при подъеме теплохода «Моздок» на Черном море. Водолаз I класса 1-2 группы специализации. Проработал под водой более 6000 ч.

В 1987 г. защитил диссертацию в области разработки новых сварочных материалов для механизированных процессов сварки под водой. С 1994 по 1999 гг. принимал участие в создании нового Американского стандарта по подводной сварке ANSI/AWS D3.6M. В 1996 г. обучал специалистов за рубежом. Опубликовал 62 печатные работы, 30 из которых самостоятельно, в том числе с 2004 г. самостоятельно написал и издал семь книг: «Технология подводной сварки и резки» (2004), «Газовая сварка и резка» (2005), «Technologies of underwater wet welding and cutting» (2006), «Сварка покрытым электродом» (2006), «Сварка в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся электродом» (2007), «Ручная и механизированная дуговая сварка и наплавка» (2009) и «Сварка алюминия» (2010). Директор фирмы ДП «Экотехнология» МНТК ИЭС. В настоящее время занимаюсь предоставлением консультативных услуг в области технологий и оборудования для сварки и резки металлов.

---

## Условные обозначения и сокращения

ЖВАХ	— жесткая вольт-амперная характеристика
ЗТВ	— зона термического влияния
КДР	— кислородно-дуговая резка
КЗ	— короткие замыкания
МАГ (MAG)	— сварка в среде активных газов плавящимся электродом
МГ	— магистральные газопроводы
МИГ (MIG)	— сварка в среде инертных газов плавящимся электродом
МССПП	— мокрая сварка самозащитными порошковыми проволоками
МТ	— магистральный трубопровод
ПВАХ	— падающая вольт-амперная характеристика
ПП	— порошковая проволока
ППВАХ	— пологопадающая вольт-амперная характеристика
ППР	— плазменная подводная резка
РДС (MMA)	— ручная дуговая сварка
РПП	— резка порошковой проволокой
ТИГ (TIG)	— сварка в среде инертных газов неплавящимся электродом
ТЭР	— технология экзотермической резки штучным электродом
УКЗ	— удлиненный кумулятивный заряд
ЭДР	— электродуговая резка покрытым электродом
<i>KCU, KCV</i>	— ударная вязкость с U- и V-образным надрезом
<i>a.c. (AS) (≈)</i>	— переменный ток
<i>d.c. (DC) – (= –)</i>	— постоянный ток прямой полярности
<i>d.c. (DC) + (= +)</i>	— постоянный ток обратной полярности
$d_{э}$	— диаметр электрода и сварочной проволоки
$I$	— сила тока
$U$	— напряжение дуги
$U_{x.x}$	— напряжение холостого хода источника питания дуги
$v$	— скорость сварки
$\sigma_T$	— физический предел текучести
$\sigma_B$	— временное сопротивление
$\delta$	— относительное удлинение
$\phi$	— относительное сужение

---

## Введение

Транспортировка газа и нефти с месторождений, расположенных на значительном расстоянии от регионов, где они потребляются, осуществляется, как правило, по трубопроводам, которые проложены как по суше, так и по дну морей или других водоемов. Так, только в России в 2008 г. количество подводных переходов трубопроводов через водные преграды составило 1855 единиц (или 2687 ниток), общей протяженностью 5800 км. В силу многообразных факторов воздействия окружающей среды и труднодоступности подводные переходы трубопроводов являются сложными объектами для проведения подводно-технических работ с использованием подводной сварки. Построены причальные сооружения с большим количеством металлических элементов, находящихся в воде. Строятся и эксплуатируются десятки тысяч кораблей и судов, ремонт которых обычно выполняется в сухих доках или на слипах. Проблемы возникают в случае невозможности поместить их в сухой док или при отсутствии доков в регионах, где необходимо проведение ремонтно-восстановительных работ. В подводной части всех этих металлоконструкций возникают дефекты вследствие монтажных работ, волнового воздействия, коррозии, боевых повреждений, а также ввиду возможных ошибок при проектировании и строительстве. Для выполнения этих работ, кроме наличия высококвалифицированного персонала, необходимы технологии, позволяющие быстро и эффективно с прогнозируемым уровнем качества решать задачу сварки металла под водой.

В настоящее время существуют два основных способа выполнения сварочных работ под водой:

- сварка в сухой камере [1–3]
- мокрая сварка [4].

Способ сухой гипербарической сварки начал развиваться в мире в 60-х годах прошлого столетия [1–3], когда по мере расширения добычи углеводородного сырья на морском дне и монтажа установок для его добычи проектировщики стали использовать материалы с более высокими механическими свойствами. Повысились

требования к качеству сварных соединений. Основная цель применения этого способа сварки состоит в том, чтобы исключить контакт с водой реакционной зоны и свариваемого металла, что дает существенные преимущества для получения равнопрочных сварных соединений независимо от внешних условий и глубины выполнения работ.

Использование сухой сварки в обитаемых камерах применительно к ремонту трубных элементов стационарных оснований, корпусов судов, причалов и других гидротехнических сооружений с развитой поверхностью связано со значительными материальными затратами. Существенные неудобства возникают и при использовании сухой сварки в обитаемых камерах при ремонте подводных переходов трубопроводов через малые водные преграды. В этом случае невозможно использовать специализированные глубоководные суда, имеющие на борту необходимое оборудование и грузоподъемные механизмы. Для решения этого вопроса в настоящее время в России разработана и изготовлена камера в виде отдельных транспортируемых модулей для выполнения ремонтных работ на подводных переходах газопроводов, которые располагаются в труднодоступных местах при глубине залегания трубы более 1,5 м [5, 6]. С помощью сухой сварки в России выполнен целый ряд работ по ремонту подводных переходов газопроводов через водоемы [5, 6].

При мокрой сварке сварщик и свариваемый объект находятся в водной среде [4]. Сварка осуществляется без каких-либо дополнительных сооружений и устройств, благодаря чему сварщик имеет большую свободу перемещений. Это делает мокрую сварку наиболее эффективной и самой экономичной из существующих способов сварки под водой в первую очередь применительно к металлоконструкциям, изготовленным из малоуглеродистых сталей с развитой поверхностью на глубине до 20 м [7–9].

Мокрая сварка плавящимся электродом является и в настоящее время основным технологическим процессом, используемым на территории стран СНГ для восстановления большинства подводных металлоконструкций за исключением подводных переходов газо- и нефтепроводов через водные преграды. В связи с этим в дальнейшем основное внимание будет уделено технологии сварки плавящимся электродом (ручной и механизированной), когда дуга горит непосредственно в воде и не защищается ничем другим, кроме газов и шлака, образующихся при плавлении электродного ма-



териала. Технология сухой сварки в мини-боксе, когда дуга имеет дополнительную защиту от воздействия окружающей водной среды, в данной публикации не рассматривается.

В 1885 г. Н. И. Бенардос впервые высказал мысль о возможности сварки под водой. В 1887 г. он совместно с профессором Д. А. Лачиновым [10, 11] осуществил процесс разделительной электродуговой резки под водой угольным электродом. Эти опыты следует считать первой попыткой применения электрической дуги для подводной сварки и резки металла.

В 1932 г. группа сотрудников под руководством академика АН УССР К. К. Хренова разработала и осуществила на практике [12–14] электродуговую сварку под водой покрытым электродом. Эти работы явились фундаментом для дальнейшего развития подводной сварки и резки в СССР.

Новый метод был применен на практике в 1936–1938 гг. при подъеме парохода «Борис» на Черном море [11, 15, 16] и при выполнении других подводно-технических работ. Широкое распространение получила подводная сварка покрытым электродом во время Великой Отечественной войны, когда требовалось оперативно ремонтировать получившие боевые повреждения корабли ВМФ.

После войны потребность в применении подводной сварки и резки существенно возросла. Однако разработанные в то время электроды не обеспечивали необходимый уровень прочности и пластичности сварных соединений. Скорость сварки была низкой [11, 12, 15, 17].

Для повышения прочностных и пластических свойств металла шва при сварке под водой в зону горения дуги по внутреннему каналу трубчатого электрода подавали аргон [18]. Практического применения этот технологический процесс не нашел, ввиду его технической сложности и низких механических характеристик металла сварных соединений.

В дальнейшем были разработаны электроды для подводной сварки марок ЭПС-35, ЛПС-3, ЛПС-4, ЛПС-5, ЦН-П, УОНИ-13/45П, ЭПС-5, ЭПО-55 и М5 [17, 19, 20]. Прочностные показатели сварных соединений, выполненных этими электродами под водой, находятся на уровне показателей, получаемых при сварке на воздухе электродами с меловым покрытием (тип Э-34).

Низкая производительность процесса и неудовлетворительные показатели механических свойств соединений заставили специалистов искать другие пути решения вопроса в области подводной

сварки. Н. М. Новожиловым [21, 22] был предложен технологический процесс механизированной сварки под водой проволокой сплошного сечения в среде углекислого газа. Широкого распространения он не нашел даже после усовершенствования за счет замены углекислого газа на его смесь с кислородом. Сварка со свободной подачей в реакционную зону газа или его смесей как технологический процесс, основным исполнителем которого является водолаз, малопригодна для работы под водой. Мощный газовый поток, образующийся вокруг реакционной зоны, препятствует наблюдению за формированием сварного соединения. Особенно это ощущается при сварке в нижнем и потолочном положениях. Реализация этого технологического процесса возможна только в автоматическом режиме.

В 1959 г. был предложен технологический процесс [20, 23] механизированной сварки под водой проволокой сплошного сечения без дополнительной защиты реакционной зоны. При его использовании водолаз хорошо видит дугу и расплавленный металл, что позволяет ему сформировать удовлетворительный сварной шов.

Технология механизированной сварки под водой имеет ряд преимуществ по сравнению со сваркой покрытым электродом. Она позволяет исключить трудоемкий и опасный для водолаза-сварщика процесс смены электрода под водой и технологический перерыв, связанный с этой операцией. Повышается производительность и улучшаются условия труда водолаза-сварщика, возрастает безопасность и снижается влияние субъективных факторов на качество выполняемых под водой сварных соединений. Этот процесс можно выполнять, используя более высокую силу тока дуги.

С металлургической точки зрения выполнение механизированной сварки электродной проволокой сплошного сечения непосредственно в воде является тупиковым вариантом. Использование этого технологического процесса позволяет повысить прочностные характеристики сварных соединений, однако пластические свойства металла шва остаются низкими. Кроме того, устойчивый процесс горения дуги удается поддерживать в весьма узком интервале режимов [20, 23]. В связи с перечисленными недостатками этот технологический процесс практического применения не нашел.

Следующий шаг на пути развития технологий механизированных процессов сварки под водой плавящимся электродом был сделан в ИЭС им. Е.О. Патона. По заказу ВМФ СССР была разра-

ботана технология сварки под водой самозащитной порошковой проволокой [4, 24–26].

В 1987–1992 гг. сотрудниками лаборатории подводной сварки ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины был разработан состав покрытия электродов для мокрой сварки под водой малоуглеродистых и некоторых низколегированных сталей [27–29]. До этого времени работы в этом направлении в институте не проводились. В настоящее время разрабатываются электроды для сварки под водой ряда низколегированных сталей и сталей повышенной прочности [30, 31].

Одновременно с разработкой электродов в ИЭС им. Е.О. Патона аналогичные работы были проведены в Санкт-Петербургском морском техническом университете. В результате были разработаны электроды Э38-ЛКИ-1П и ЛКИ-2П [32–34].

В настоящее время работы в области совершенствования технологий мокрой подводной сварки продолжают. Разрабатываются новые порошковые проволоки ферритного и аустенитного классов для механизированного процесса сварки под водой [35–37], а также покрытые электроды.

