



ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ БУРОВЫХ ДОЛОТ

В. М. НЕСТЕРЕНКОВ, д-р техн. наук, **Н. Е. ПРОТОСЕЙ**, канд. техн. наук, **Ю. А. АРХАНГЕЛЬСКИЙ**, инж.
(Ин-т электросварки им. О. Е. Патона НАН Украины)

Рассмотрены особенности ЭЛС буровых долот, применяемых в нефтедобывающей промышленности. Показано, что наилучшее качество сварного шва достигается при использовании эллиптической развертки электронного луча при отношении осей 2:1 и максимальной амплитуде равной двум радиусам сосредоточенности электронного пучка. Для улучшения качества сварного шва в подшарошечной части буровых долот рекомендовано использовать вставки из модифицирующих материалов в виде фольги толщиной до 0,2 мм.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, шарошечные долота, закаливающиеся стали, парогазовый канал, сквозное проплавление, сканирование электронного луча, модифицирующий материал

Для бурения нефтяных и газовых скважин применяются шарошечные долота, являющиеся основным инструментом высокоскоростного бурения земных пород. В настоящее время общий объем шарошечного бурения достигает десятков миллионов метров в год и требуется дальнейшее многократное повышение этого объема. В связи с этим актуальное значение приобретает проблема совершенствования существующего инструмента. Шарошечные долота работают в жестких условиях воздействия высокоабразивной жидкости при высоких статических и динамических нагрузках, поэтому к прочностным и эксплуатационным показателям предъявляются повышенные требования.

Для соединения трех элементов долота в одну конструкцию (рис. 1) в настоящее время широко используют электронно-лучевую сварку (ЭЛС). Этот способ обеспечивает минимальные деформации долот при наименьшем термическом воздействии на узлы шарошечных подшипников. Однако традиционные материалы в первую очередь стали 14ХН3А и 20ХН3А, которые применяются в конструкции буровых долот, имеют ограниченную свариваемость и свойства металла сварных соединений на этих сталях в ряде случаев не отвечают условиям высокоскоростного бурения. С увеличением размеров долот и одновременно свариваемых толщин повышается вероятность образования мелких трещин в сварных соединениях, которые приводят к нарушению их гидроплотности и снижению срока эксплуатации.

С целью повышения эксплуатационных характеристик сварных соединений можно либо подбирать другие материалы для изготовления долот, либо модифицировать металл шва. На наш взгляд, второй путь более предпочтителен с точки

зрения возможности получения положительных результатов при относительно небольших затратах. Его можно осуществить, подавая в сварочную ванну легированную присадочную проволоку или применяя фольгу, изготовленную из материала-модификатора, которую можно вставлять в свариваемые стыки долота до сварки. Существуют определенные трудности в подаче присадочной проволоки при сварке швов в подшарошечной области долота и можно ожидать нарушений формирования швов при использовании вставок-модификаторов, которые увеличивают зазор в стыке. Наибольшие трудности для качественного фор-



Рис. 1. Внешний вид трех элементов долота до сборки и сварки (а) и сваренного электронным пучком долота (б)

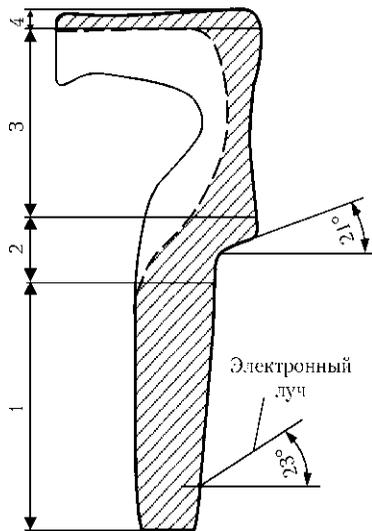


Рис. 2. Схема сечения долота, свариваемого электронным лучом: 1 — ниппельная часть долота; 2 — переход от ниппельной к затылочной; 3 — затылочная; 4 — подшарошечная

мирования представляет участок шва, где электронный луч практически параллелен свариваемому металлу (рис. 2, участок 2).

Из-за конструктивной особенности долота его сварка ведется электронным пучком, расположенным под углом 23° к горизонту. Такой угол позволяет получить требуемую глубину проплавления (на рис. 2 она показана штриховкой) в подшарошечной части долота без разрушения шарошек (см. рис. 1). Согласно техническим условиям на буровые долота ниппельная часть долот должна быть сварена с полным проплавлением и с формированием обратного валика. При переходе к затылочной части глубина проплавления снижается и составляет примерно $1/3$ толщины свариваемых заготовок. Такое же соотношение глубины проплавления к толщине изделий сохраняется и на подшарошечной части долота. В то же время наличие уступа при переходе от ниппельной к затылочной части долота резко ухудшает условия формирования шва, так как направление силы тяжести и динамического напора паров сварочной ванны совпадают в этой области, что приводит к вытеканию жидкого металла из ванны и образованию крупных дефектов в шве. Задача получения качественного формирования шва значительно усложняется в связи с тем, что при переходе от ниппельной части долота к затылочной требуемая глубина проплавления уменьшается от полного проплавления на всю толщину свариваемых заготовок до частичного, на глубину, равную $1/3$ толщины свариваемой заготовки. И если при сквозном проплавлении выход паров происходит в обе стороны парогазового канала, то при частичном проплавлении выход паров со стороны корня шва закрывается, давление паров в канале повышается и изменяются условия формирования шва. В рассматриваемом случае при прохождении



Рис. 3. Выплески металла ванны (отмечено стрелками) при ЭЛС уступа на затылочной части долота

электронным пучком уступа на затылочной части долота парогазовый канал в определенный момент времени открывается снизу и повышенное давление паров, характерное для несквозного проплавления, способствует вытеканию металла из сварочной ванны (рис. 3). Таким образом существует необходимость более детального рассмотрения технологических особенностей ЭЛС буровых долот с учетом формирования шва на проблемных участках, обеспечения стабильности производства и повышения эксплуатационных характеристик.

Особенности режима ЭЛС буровых долот.

Сложный профиль проплавления компонентов долота, резко меняющийся угол встречи электронного пучка с поверхностью свариваемого металла определяют трудности составления программы режима ЭЛС. Так, для обеспечения геометрии проплавления ниппельной части долота необходимо использовать погонную энергию сварки $22,5$ кДж/см, в то время как для сварки подшарошечного участка требуется 15 кДж/см. В процессе исследований установлено, что наряду с определением требуемых погонной энергии и положения фокуса пучка относительно поверхности изделия, необходимо определить и режим технологических колебаний электронного пучка. Сварка статическим пучком не позволяла получить требуемую воспроизводимость геометрии и качества сварных соединений.

Проведенные ранее исследования [1] показали высокую эффективность использования колебаний пучка в технологии ЭЛС. В данной работе установлено, что применение продольной или по-



перечной развертки электронного луча в случае ЭЛС буровых долот наклонным пучком на «подъем» не способствует стабильности протекания сварочного процесса, поскольку при продольной развертке возбуждаются колебания расплава в плоскости сварки параллельно движению электронного луча. Это приводит к вытеканию расплавленного металла из сварочной ванны и, как следствие, к нарушению стабильности сварочного процесса. При поперечной развертке электронного пучка парогазовый канал увеличивается в диаметре, что также способствует вытеканию расплава из канала и образованию дефектов в сварном шве (рис. 4). Таким образом, при ЭЛС изделий с вертикальной ориентацией сварного шва использование разверток данной конфигурации представляется нецелесообразным.

В то же время применение круговой развертки с радиусом немного больше радиуса сосредоточенности электронного пучка R ($r \geq R$) позволяет капиллярным силам удерживать расплав в парогазовом канале, не допуская его вытекания. Однако при круговой развертке существует еще одна проблема — неустойчивость парогазового канала по отношению к аксиально-симметричным колебаниям расплава на стенках канала.

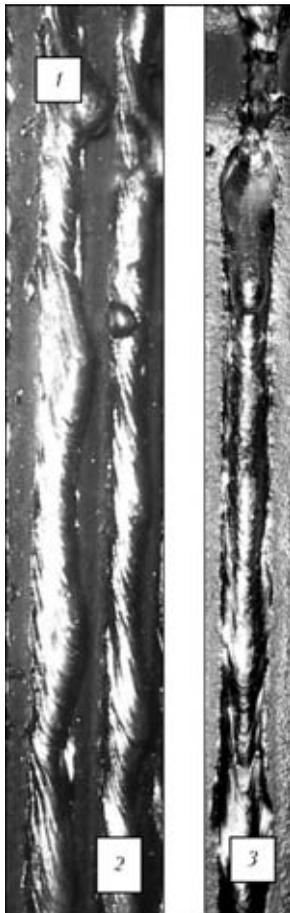


Рис. 4. Неравномерность формирования швов при использовании поперечной (участок 1), продольной (2) и круговой (3) развертки пучка

Вследствие симметрии задачи, обусловленной формой развертки, круговая развертка электронного луча может возбуждать нулевую моду ($m = 0$) колебаний расплава, соответствующую аксиально-симметричным колебаниям внутренней поверхности парогазового канала типа перетяжек и растяжений. В частности, частота нулевой моды колебаний расплава в парогазовом канале $\omega_0(k)$ определяется согласно дисперсионному соотношению из работы [2]:

$$\omega_0^2(k) = \frac{\sigma}{\rho} \frac{k}{R^2} (k^2 R^2 - 1) C_0(k), \quad (1)$$

где k — волновой вектор колебаний; σ , ρ — соответственно коэффициент поверхностного натяжения и плотность расплавленного металла; $C_0(k)$ — коэффициент, зависящий от волнового вектора и размеров парогазового канала.

Для сквозного парогазового канала, формируемого на участке 1 (рис. 2) бурового долота, длина волны колебаний расплава равна глубине канала, которая на данном участке меняется примерно от 25 до 30 мм. Следовательно, волновой вектор колебаний $k = 2\pi/H$ меняется от 2,5 до 2 см⁻¹. Для радиуса канала 1...1,5 мм, который образуется при сварке ниппельной части долота, получаем kR порядка 0,2...0,38, что меньше единицы ($kR < 1$). Это означает, что применение круговой развертки приводит к неустойчивости парогазового канала уже на начальном участке сварки долот.

Как показала практика, подавить неустойчивость парогазового канала удается с помощью комбинированной развертки электронного луча, обеспечивающей его сканирование одновременно вдоль двух осей X и Y — параллельно и перпендикулярно направлению сварки. Мгновенное распределение мощности электронного пучка $q(r, t)$ в проекции на плоскость XY (перпендикулярно электронному лучу) имеет следующий вид [2]:

$$q(r, t) = q_0 \exp\left(-\frac{r(t)^2}{R^2}\right) = q_0 \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}_{xy} - \mathbf{r}_e(t)|^2}{R^2}\right), \quad (2)$$

где q_0 — максимальная мощность на оси электронного пучка; \mathbf{r}_{xy} , \mathbf{r}_e — соответственно текущий радиус-вектор в плоскости XY и мгновенный радиус-вектор оси электронного пучка (в формуле (2) было использовано векторное равенство $\mathbf{r} = \mathbf{r}_{xy} - \mathbf{r}_e$).

Очевидно, что для достаточно больших частот сканирования электронного пучка усреднение величины $q(x, y, t)$ по периоду T позволяет заменить временную зависимость пространственной. Иными словами, можно рассматривать процесс сканирования электронного луча как пространственное рассредоточение пучка, приводящее к уменьшению его пиковой мощности.

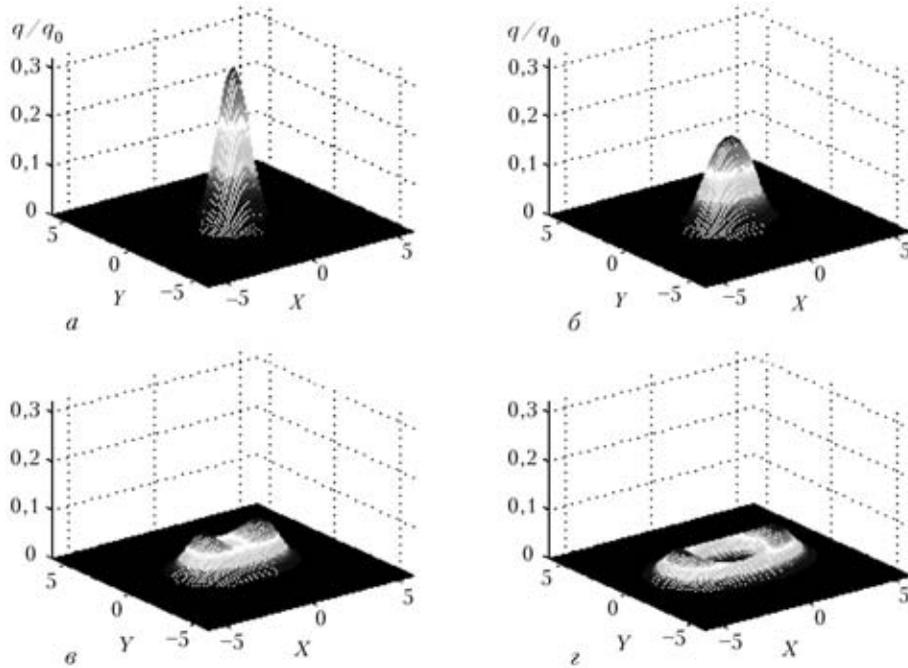


Рис. 5. Распределение нормированной плотности мощности электронного пучка q/q_0 при использовании комбинированной развертки электронного луча: $X(t) = A \cos \omega t$ и $Y(t) = B \cos \omega t$ при различных амплитудах сканирования: a — 0; $б$ — $1R$; $в$ — $2R$; $г$ — $3R$

Так, для двух периодических функций $f(t) = f(t + T_1)$ и $g(t) = g(t + T_2)$ произвольного вида, описывающих сканирование электронного пучка (с гауссовым распределением) вдоль двух взаимно перпендикулярных осей X и Y , усредненную по периоду мощность пучка $\langle I(x, y) \rangle$ можно записать в следующем виде:

$$\langle I(x, y) \rangle = \frac{I_0}{T} \int_0^T \exp \left\{ -\frac{(x + f(t))^2 + (y + g(t))^2}{R^2} \right\} dt, \quad (3)$$

где I_0 — пиковая мощность пучка; T — наименьший общий период функций $f(t)$ и $g(t)$.

Таким образом, формула (3) для произвольных функций $f(t)$ и $g(t)$ позволяет избавляться от временной зависимости, заменив ее на пространственную.

В случае применения развертки пучка по эллипсу функции $f(t)$ и $g(t)$ можно представить в виде: $X(t) = A \cos \omega t$ и $Y(t) = B \sin \omega t$, где ω — частота развертки электронного пучка; A , B — соответственно амплитуды сканирования электронного луча вдоль осей X и Y . Для такой развертки на рис. 5 представлено пространственное распределение усредненной по периоду нормированной плотности мощности двумерного электронного пучка, рассчитанное для различных амплитуд сканирования $A = (0..3)R$ при фиксированном отношении амплитуд $A/B = 2:1$.

Главная ось направлена вдоль оси X . Все распределения мощности на рисунке нормированы таким образом, чтобы объем под каждой из двумерных поверхностей был равен единице:

$\int q(x, y) dx dy / q_0 = 1$, а расстояния измеряются в радиусах сосредоточенности электронного пучка R .

Статический электронный пучок, изображенный на рис. 5, a , имеет гауссово распределение плотности мощности. Из рисунка видно, что с увеличением амплитуды сканирования происходит перераспределение мощности электронного пучка вдоль оси X и он перестает быть гауссовым. Наряду с этим падает и максимальная плотность мощности пучка, которая при $A = 3R$ составляет порядка 25 % пиковой мощности статического электронного пучка.

Как видно из рисунка, при небольших амплитудах сканирования ($A \leq 2R$) распределение мощности электронного пучка незначительно отличается от аналогичного распределения мощности при использовании одномерной косинусоидальной развертки вдоль оси X . Однако, начиная с амплитуд сканирования $3R$ и выше ($A \geq 3R$), распределение мощности принимает четко выраженную форму овала (или эллипса) с провалом в центральной его части.

Эксперименты показали, что использование овальной развертки электронного луча с амплитудой сканирования $A \geq 3R$ приводит к нарушению стабильности сварочного процесса и, как следствие, к появлению различного рода дефектов в сварных швах буровых долот. Наилучшее качество сварного шва достигнуто при небольших амплитудах сканирования пучка ($A = 2R$, $B = R$ и $B/A = 1/2$), т. е. при таких амплитудах, когда провал в центре распределения мощности еще не проявляется.



Ввиду симметрии, эллиптическая развертка соответствует второй моде колебаний ($m = 2$) расплава в парогазовом канале, которая отвечает попеременному сжатию и растяжению канала вдоль двух взаимно перпендикулярных направлений (рис. 6). Поэтому при использовании эллиптической развертки электронного луча в парогазовом канале возбуждается устойчивая вторая мода колебаний ($m = 2$), подавляя при этом как неустойчивую нулевую моду ($m = 0$), так и первую моду колебаний ($m = 1$), соответствующую продольным смещениям расплава. Колебания второй моды расплава в парогазовом канале осуществляются на более высоких частотах, чем первой или нулевой моды колебаний жидкого металла. Согласно данным работы [2], дисперсионное соотношение для второй моды колебаний имеет следующий вид:

$$\omega_2^2 = \frac{\sigma}{\rho} \frac{k}{R^2} (k^2 R^2 + 3) C_2, \quad (4)$$

где C_2 — коэффициент, зависящий от волнового вектора и размеров парогазового канала, определяется по следующей формуле:

$$C_2(k) = \frac{[K'_2(kR_1) I_2(kR_2) - I'_2(kR_1) K_2(kR_2)]}{[I_2(kR_1) K'_2(kR_2) - K_2(kR_1) I'_2(kR_2)]}, \quad (5)$$

где R_1, R_2 — соответственно внутренний и внешний радиусы канала; I_2, K_2 — модифицированные функции Бесселя 1, 2-го рода; I'_2, K'_2 — соответствующие производные от этих функций по их аргументу.

Для сквозного канала глубиной $H = 3$ см соответственно с внутренним и внешним радиусами $R = 0,08$ и $0,12$ см коэффициент C_2 для первой гармоники колебаний примерно равен $C_2 \approx 32$. Тогда собственная частота второй моды колебаний составляет порядка $\omega_2 \approx 1230$ рад/с, что соответствует частотам развертки $f \approx 195$ Гц. На практике частота развертки выбирается больше — $f \approx 200 \dots 300$ Гц для уменьшения амплитуды резонансных колебаний расплава в парогазовом канале.

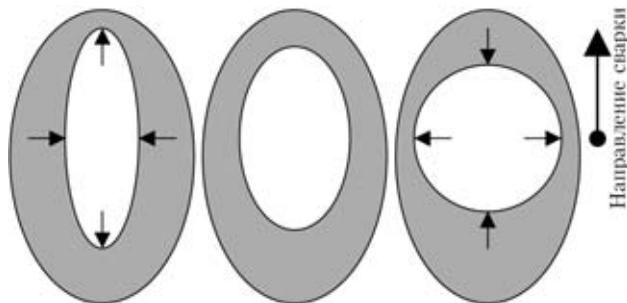


Рис. 6. Вторая мода колебаний расплава ($m = 2$) в парогазовом канале (стрелками указано направление сжатия и растяжения расплавленного металла в канале)

Капиллярный эффект при ЭЛС стыков с зазорами. Как упоминалось выше, угол наклона электронного пучка к поверхности свариваемого изделия должен оставаться постоянным на протяжении всего сварочного процесса, чтобы не повредить шарошки бурового долота. При этом появляются определенные сложности в формировании сварного шва в подшарошечной части сварного шва. Так, на горизонтальном участке шва образуются микротрещины из-за неполного провара, обусловленного малым углом наклона электронного луча к поверхности долота (около 23°).

Для повышения эксплуатационных характеристик сварных соединений и устранения дефектов в подшарошечном участке шва использовали Г-образные вставки из материала-модификатора в виде фольги из нержавеющей стали или титана, которые помещали в стыках долота. Наличие вставок из фольги приводит к образованию зазора между составными частями долота по всей длине стыка. Образовавшийся зазор накладывает дополнительные трудности при формировании сварного шва. Как показали эксперименты, слишком большой зазор приводит к вытеканию жидкого металла и, как следствие, к образованию дефектов в сварном шве. В то же время малый зазор не влияет на формирование шва, но эффект модификации при применении тонкой фольги сводится к нулю. Очевидно, для правильного выбора толщины вставок материала-модификатора необходимо провести оценку максимально допустимого зазора, при котором металл не вытекает из ванны и, следовательно, не нарушается стабильность сварочного процесса.

Для оценки зазора можно использовать известную задачу из гидродинамики о капиллярном поднятии жидкости между двумя параллельными пластинами, расположенными на некотором расстоянии $d < a$, где a — капиллярная постоянная вещества [3]. Как известно, капиллярная постоянная определяется по формуле

$$a = \sqrt{2\sigma/\rho g}, \quad (6)$$

где g — ускорение силы тяжести.

Для стали ($\sigma = 1500 \cdot 10^{-5}$ Н/см, $\rho = 7,8$ г/см³) капиллярная постоянная $a = 0,63$ см. Следовательно, парогазовый канал радиусом $R = 1 \dots 2$ мм, образующийся при ЭЛС металлов, представляет собой капилляр, в котором капиллярные силы оказывают большое влияние на течение расплавленного металла по стенкам канала. Более того, в зазоре между сегментами долота, размер которого меньше диаметра парогазового канала, капиллярный эффект может проявляться еще более выражено, чем в самом канале.

Согласно данным работы [3] для пластин, погруженных в смачиваемую жидкость, высота стол-



ба поднятия жидкости между пластинами Z_0 и высота капиллярного пристеночного слоя жидкости Z_1 могут быть определены из следующих формул:

$$Z_0 = a \sqrt{A - 1}, \quad Z_1 = a \sqrt{A_\sigma - \sin \theta}, \quad (7)$$

где θ — угол смачивания; A_σ — коэффициент, который определяется по формуле

$$A_\sigma = \frac{a^2}{d^2} \cos \theta, \quad (8)$$

где d — расстояние между пластинами.

Когда расстояние между пластинами много меньше, чем капиллярная постоянная жидкости ($d \ll a$), то $A_\sigma \gg 1$ и, следовательно, высоты поднятия жидкости Z_0 и Z_1 являются величинами одного порядка:

$$Z_0 \approx Z_1 = \frac{a^2}{d} \cos \theta. \quad (9)$$

Для расплава на поверхности металла угол смачивания практически равен нулю (полное смачивание), поэтому выполняется условие $\cos \theta \approx 1$. Например, при зазоре 0,3 мм формула (9) дает высоту поднятия расплава до $Z_0 \approx 4$ мм.

На практике расплавленный металл в ходе сварочного процесса не может подниматься на такую большую высоту в узком зазоре, так как он будет непременно охлаждаться боковыми стенками и застывать в пространстве зазора. Поэтому формула (9) дает несколько завышенную оценку для высоты поднятия расплава в зазоре стыков долот.

В общем случае задача капиллярного подъема расплава в зазоре с учетом его охлаждения на стенках зазора не имеет точного решения и должна решаться численными методами. Подобное решение является крайне громоздким и лежит за пределами рассмотрения настоящей статьи. Оценку максимально допустимого зазора, при котором не нарушается стабильность сварочного процесса, можно провести исходя из следующих физических соображений. Очевидно, что наличие зазора приводит к уменьшению количества металла, участвующего в формировании сварного шва. При малом зазоре данный эффект практически не сказывается на формировании шва, однако с увеличением зазора начинает нарушаться баланс переноса вещества на передней стенке парогазового канала. Кроме того, при достаточно большом зазоре происходит капиллярное втягивание расплава в зазор, что приводит к дополнительному уменьшению количества расплава, текущего по стенкам парогазового канала. Очевидно, что это приводит к еще более сильному нарушению баланса переноса массы металла в ходе сварочного процесса. В данной концепции характерным раз-

мером для оценки допустимой толщины зазора может служить толщина слоя расплава на передней стенке парогазового канала. Для сохранения баланса металла необходимо, чтобы зазор d не превышал толщину слоя расплава D ($d < D$). Исходя из анализа макрошлифов продольных сечений швов толщина слоя расплава на передней стенке канала может лежать в пределах 0,2...0,4 мм. Эксперименты показали, что удовлетворительное качество сварных швов достигается при зазоре 0,1...0,2 мм, что хорошо согласуется с проведенной выше оценкой.

Как отмечалось выше, одной из особенностей ЭЛС буровых долот является прохождение электронным пучком затылочной области долота, где имеется выступ более 1 см. При ЭЛС вертикальных стыков столб расплава в зазоре удерживается за счет лапласова давления в зазоре P_L , а также за счет давления газа и паров металла в парогазовом канале P_V и давления отдачи на передней стенке канала P_R (рис. 7). Поэтому при ЭЛС ниппельной части долота даже при наличии зазора в стыках вытекания расплава из сварочной ванны не происходит.

При прохождении ступенчатого участка 2 парогазовый канал открывается в верхней части, и, следовательно, давление P_V исчезает. В результате равновесие столба расплава нарушается, и как следствие, может происходить затекание избыточного расплавленного металла со ступеньки под электронный пучок. Для устранения эффекта затекания при подходе сварочного луча к затылочной области необходимо обеспечить условия ламинарного течения жидкого металла в канале проплавления. С этой целью следует, в первую очередь, плавно уменьшить на рассматриваемом участке скорость сварки, что и делается в технологическом цикле ЭЛС буровых долот.

Экспериментальные результаты. На рис. 8, а четко видна трещина, образовавшаяся в сварном шве, который получен при ЭЛС без материала-модификатора. Использование материала-модификатора позволяет избежать появления трещин в сварных швах (рис. 8, б), что повышает эксплуатационные характеристики свариваемого изделия. Сварку выполняли при использовании развертки электронного пучка по эллипсу с частотой 300 Гц и соотношением осей эллипса 2:1 (мм). Такая развертка пучка обеспечивает равномерное формирование шва по всей длине (см. рис. 1, б).

В данной работе применяли модификаторы в виде пластинок из титана или нержавеющей стали 10X18H10T толщиной 0,2 мм. Ширина и длина пластинок зависела от типа свариваемых долот и могла изменяться в пределах 15...20 мм по ширине и 45...70 мм по длине. Такие вставки не нарушают формирования швов, не требуют перделки существующего электронно-лучевого

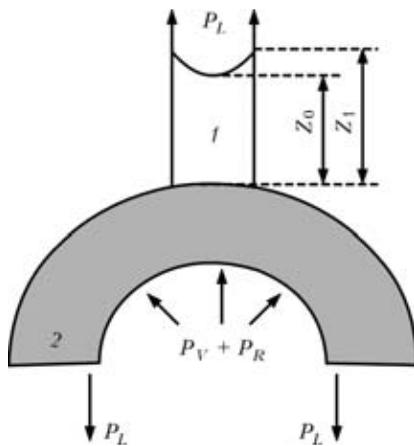


Рис. 7. Схема капиллярного поднятия расплава в зазоре между сегментами буровых долот (1) и расплав на передней стенке парогазового канала (2)

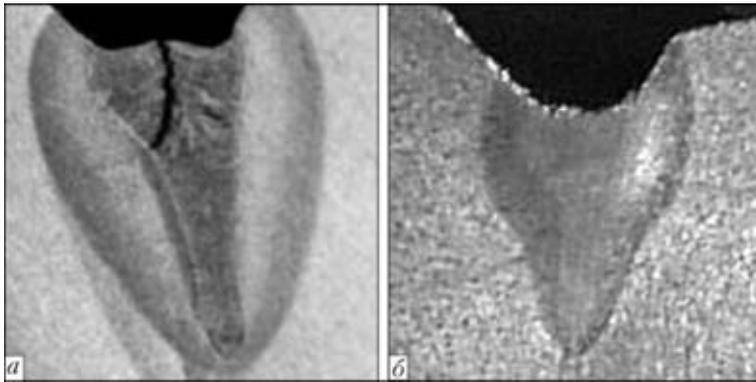


Рис. 8. Макрошлифы швов в подшарошечной области бурового долота, сваренных без применения материала-модификатора (а) и с использованием фольги из нержавеющей стали (б)

оборудования и приспособлений для сборки и сварки и не создают препятствий при автоматическом слежении за стыками во время ЭЛС.

Материал-модификатор вставляется в три подшарошечные стыки и в стыки затылочной части долота, где наиболее вероятно возникновение трещины.

Для изучения влияния модификаторов на свойства сварных соединений проводили металлографические исследования структур на микроскопе «Неорhot-32». Установлено, что при термическом цикле, характерном для ЭЛС, превращение аустенита металла шва и участка перегрева металла ЗТВ происходит в бейнитной и мартенситной областях. При этом выявляется характерное дендритное строение сварного шва с направ-

лением роста кристаллитов от линии сплавления к центру шва. Именно в этих местах наиболее часто возникают кристаллизационные трещины размером 0,5...0,7 мм.

Микроструктура металла шва и участка перегрева металла ЗТВ представляют собой смесь бейнита и низкоотпущенного мартенсита и имеют одинаковую твердость ($HV\ 418$), что немного выше твердости основного металла ($HV\ 385...396$). На участке перегрева происходит незначительный рост зерна (рис. 9, а).

Сравнительный анализ структур сварных швов, выполненных без модификаторов и после их введения в сварочную ванну, показывает, что во втором случае происходит измельчение зерна при кристаллизации металла шва (рис. 9, б). При этом твердость металла шва уменьшается до $HV\ 280...300$. Твердость околошовной зоны сохраняется на уровне твердости зоны швов, выполненных без модификатора.

В связи с изменением размера зерна металла шва при титановой вставке ожидалось повышение стойкости сварных швов против образования кристаллизационных трещин. Однако при дальнейшем изучении микроструктур швов с титановыми вставками установлено, что в средней части литой зоны часто возникают кристаллизационные трещины. Общий вид таких трещин представлен на рис. 9, в. Трещины располагаются по границам первичных зерен по линии встречи столбчатых кристаллитов.

Микрорентгеноспектральный анализ соединений с титановой вставкой показал наличие значительного количества включений в виде карбидов титана как по сечению сварного шва, так и на границе сплавления с основным металлом. При этом в эвтектике шва находится 2...3 % титана, в то время как в составе включений — 10...11 %. По-видимому, такое неравномерное распределение включений и является причиной снижения прочностных характеристик шва.

При анализе структур сварных соединений, выполненных после введения вставок из нержавеющей стали 10X18H10T, установлено измельчение зерна в структуре шва, аналогичное швам с титаном, но без трещин. Микрорентгеноспектральный анализ показывает, что распределение

Механические свойства сварных соединений буровых долот

Тип соединения	σ_b , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	α_H , Дж/см ²
Сталь 14ХНЗА	960	822	8,1	49,2	74,31
Сварное соединение без модификатора	862	—	—	—	84,45
Сварное соединение со вставкой титана толщиной 0,2 мм	690,3	—	—	—	12,10
Сварное соединение со вставкой 10X18H10T толщиной 0,2 мм	918	—	—	—	51,35

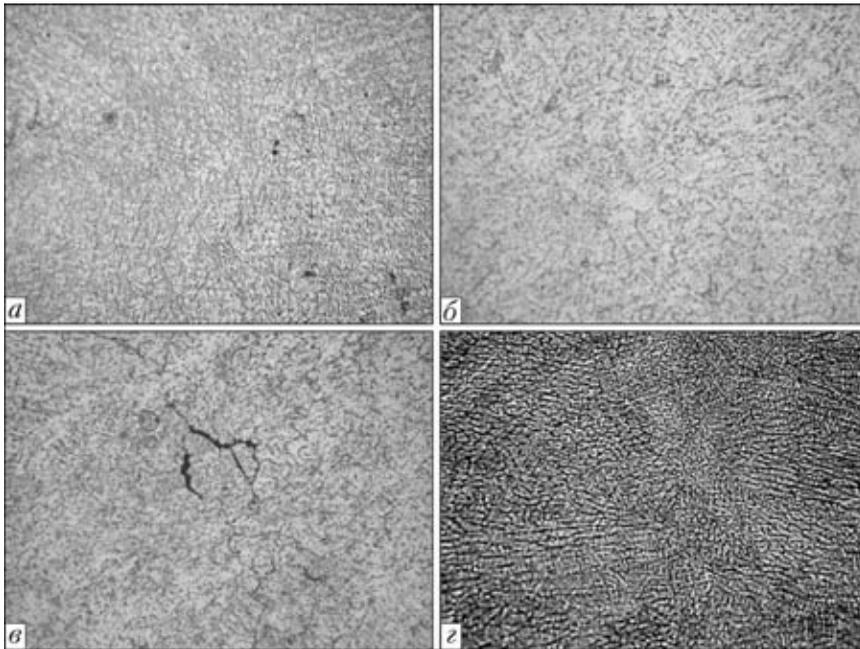


Рис. 9. Микроструктуры (X320) центральной части металла шва, сваренного без модификатора (а), со вставками титана (б) и стали 10X18H10Т (с); трещина при модифицировании титаном (д)

модифицирующих элементов в шве намного равномернее по сравнению с распределением при использовании титана (рис. 9, в).

Проведенные механические испытания сварных соединений буровых долот, обобщенные результаты которых приведены в таблице, показывают, что при использовании титана в качестве модификатора показатели прочности и особенно ударной вязкости металла шва резко ухудшаются. Это обусловлено образованием большого количества карбидов титана в металле шва. Все разрывные образцы разрушаются по шву, ударные образцы разрушаются хрупко.

При вставке фольги из стали 10X18H10T разрыв происходит по участку металла ЗТВ разрушение ударных образцов — вязкое.

Механические свойства сварных соединений со вставкой из стали 10X18H10T значительно превышают свойства сварных соединений с титано-

вой вставкой и по прочности приближаются к свойствам основного металла.

В заключение следует отметить, что в работе исследовано влияние формы развертки электронного луча и капиллярного эффекта в зазоре между сегментами буровых долот сложной конфигурации на качество сварного шва при ЭЛС с переменной скоростью движения электронного луча на вертикальной плоскости. Показано, что применение комбинированной развертки электронного луча одновременно вдоль двух осей X и Y (параллельно и перпендикулярно направлению ЭЛС при отношении амплитуд сканирования 2:1 соответственно) в диапазоне частот $f = 250 \dots 300$ Гц позволяет уменьшить возмущения

поверхности расплава в парогазовом канале, и, как следствие, добиться существенного улучшения качества сварных швов буровых долот. Установлено, что использование материала-модификатора в виде фольги из нержавеющей стали толщиной до 0,2 мм позволяет избежать появления трещин в сварных швах, что улучшает эксплуатационные характеристики свариваемых изделий.

Полученные теоретические результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

1. *Электронно-лучевая сварка* / О. К. Назаренко, А. А. Кайдалов, С. Н. Ковбасенко и др. — Киев: Наук. думка, 1987. — 256 с.
2. *Нестеренков В. М.* Особенности капиллярных волн в парогазовом канале при электронно-лучевой сварке металлов большой толщины // *Автомат. сварка*. — 2003. — № 4. — С. 8–13.
3. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Гидродинамика. — М.: Наука, 1986. — 736 с.

Peculiarities of EB welded drill bits used in oil production industry are considered. It is shown that the best quality of the weld can be achieved by using an elliptical scan of the electron beam at the ratio of axes equal to 2:1 and at the maximal amplitude equal to two radii of concentration of the electron beam. It is recommended to use an insert of metals-modifiers in the form of foil up to 0.2 mm thick to improve quality of the weld in the under-rolling cutter part of the drill bits.

Поступила в редакцию 13.01.2009