

## ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ГОРЯЧЕЗАКАТНЫХ ДНИЩ БАЛЛОНОВ ИЗ СТАЛИ 20ХН4ФА С ПОМОЩЬЮ СВАРКИ

А. К. ЦАРЮК, В. Ю. СКУЛЬСКИЙ, кандидаты техн. наук, А. Р. ГАВРИК, С. И. МОРАВЕЦКИЙ,  
Г. Н. СТРИЖИУС, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрены причины образования дефектов в днищах горячекатаных баллонов и особенности их устранения. Дана оценка свариваемости стали 20ХН4ФА, рекомендована температура предварительного подогрева, сварочные электроды и техника ручной дуговой сварки. Опробован способ автоматической сварки под флюсом на подкладке как альтернативный сварочный процесс.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, горячая вальцовка, днище баллона, технология изготовления баллонов, герметизация

Одним из способов промышленного изготовления автомобильных газовых баллонов предусматривается такой процесс, как горячая вальцовка горловин и днищ. В качестве заготовки используются секции бесшовных труб толщиной 4 мм и диаметром 215 мм из стали 20ХН4ФА. После вальцовки толщина днищ баллонов увеличивается до 15...18 мм. Вследствие высокотемпературного нагрева до состояния высокой пластичности металла и быстрого прохождения рекристаллизации в условиях деформирования торцы труб покрываются окалиной, которая остается на стенке днища в зоне заката в виде прослоек. Для гарантирования герметизации полученных сферических днищ выполняют заварку зон стыковки с деформированных краев трубы в вершине сферы с помощью дуговой сварки плавлением. Однако, как выявили гидравлические испытания опытных образцов баллонов, заварка днищ баллонов без специальной механической обработки не обеспечивает стабильной герметичности соединений.

Ниже приведены результаты исследований по выбору способа, вида обработки, техники и режимов сварки с целью получения сварных соединений в вершине свальцованных днищ.

**Свариваемость стали 20ХН4ФА и выбор теплового режима сварки.** Сталь 20ХН4ФА относится к категории высокопрочных материалов и обычно рекомендуется для изготовления несварных изделий [1]. Эквивалент углерода, рассчитанный по известной формуле МИС [2] для предельно допустимых колебаний химических элементов в составе стали 20ХН4ФА по ГОСТ 4543-71 (табл. 1), составляет  $C_{\text{э}} = 0,64...0,89$ , что свидетельствует о высокой склонности стали к образованию холодных трещин (ориентировочным критерием служит  $C_{\text{э}} = 0,40...0,45$ ; если значения  $C_{\text{э}}$  превышают указанные, то сталь считается склонной к трещинообразованию).

Таблица 1. Химический состав стали 20ХН4ФА, мас. %

Материал	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Cu	S	P
В состоянии поставки	0,23	0,38	0,40	0,87	3,96	0,11	0,18	0,010	0,007
По ГОСТ 4543-71	0,17...0,24	0,25...0,55	0,17...0,37	0,70...1,10	3,75...4,15	0,10...0,18	< 0,30	< 0,025	< 0,025

Для оценки свариваемости данной стали изучен характер термокинетических превращений, происходящих в зоне термического влияния (ЗТВ), и по результатам испытаний на склонность к образованию холодных трещин выбрана оптимальная температура предварительного подогрева при сварке [3].

Представленные на рис. 1 результаты дилатометрических исследований показали, что при скорости охлаждения  $w_{6/5}$  (в интервале температур 600...500 °С) выше 20 °С/с в металле ЗТВ формируется чисто мартенситная структура, характеризующаяся высокой твердостью. Замедленное охлаждение приводит к более интенсивному развитию диффузионных процессов и прохождению промежуточного (бейнитного) превращения. С увеличением объемной доли бейнитной составляющей твердость металла снижается, хотя при  $w_{6/5} > 16$  °С/с остается выше ориентировочных значений ( $HV 3500...4000$  МПа [2]); в случае их превышения возрастает риск образования холодных трещин.

Эффективной мерой регулирования теплового режима при сварке является предварительный (сопутствующий) подогрев, который позволяет воздействовать как на силовую, так и на физико-металлургические (диффузионные и фазовые превращения, транспорт водорода) факторы, влияющие на структуру металла ЗТВ и технологическую прочность сварных соединений.

Для определения оптимальной температуры предварительного подогрева проведены испытания сварных соединений стали 20ХН4ФА на склонность к образованию холодных трещин методом вставок (имплант) [4]. Сварку выполняли с предварительным подогревом от 150 до 300 °С с использованием электродов, обеспечивающих концентрацию диффузионного водорода до 4,5 см<sup>3</sup> на 100 г Me. Установлено, что при подогреве свыше 200...250 °С стойкость против образования трещин резко возрастает. Как видно из диаграммы на рис. 2, объединяющей температуру предварительного подогрева  $T_{\text{п}}$ , скорость охлаждения металла ЗТВ  $w_{6/5}$

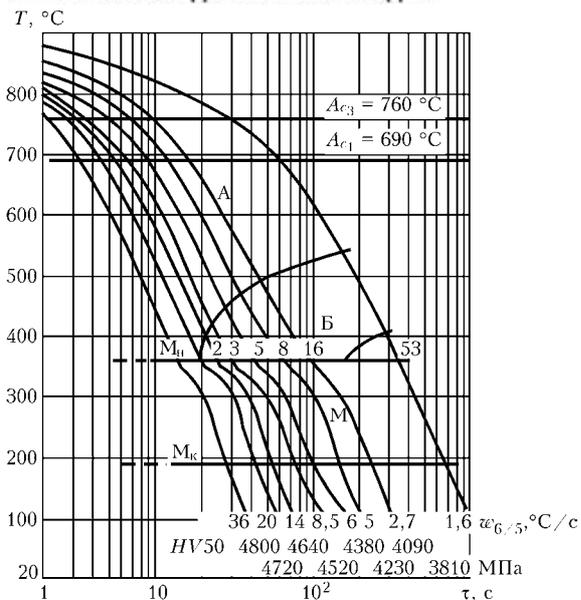


Рис. 1. Термокинетическая диаграмма превращения аустенита в стали 20ХН4ФА [3]

(в условиях испытаний имплант) и зависящие от нее содержание бейнита в бейнитно-мартенситной структуре металла ЗТВ, а также твердость  $HV 50$  (взяты из диаграммы термокинетического превращения аустенита), сварка с подогревом от 200 до 300 °С обеспечивает скорость охлаждения, достаточную для выделения в металле ЗТВ от 3 до 6 об. % бейнита. Твердость такого металла составляет приблизительно  $HV 50$  4400...4500 МПа.

Таким образом, высокая стойкость сварных соединений стали 20ХН4ФА против образования холодных трещин имеет место при скоростях охлаждения, обеспечивающих начало развития бейнитного превращения в структуре металла ЗТВ. Это достигается при предварительном подогреве до 200...300 °С, рекомендованном при заварке днищ баллонов.

**Выбор электродов и механические свойства сварных соединений.** В связи с тем, что сталь 20ХН4ФА для получения сварных соединений ранее не использовали, рекомендаций по применению материалов для ее сварки нет. Поскольку указанная сталь относится к категории закаливающихся и трудносвариваемых материалов, то для снижения риска образования холодных трещин при сварке, помимо предварительного подогрева, необходимо ограничивать переход в ЗТВ водорода из наплавляемого металла. Для этого следует применять сварочные электроды с основным типом покрытия. Для снижения степени «жесткости» сварного соединения — фактора, который в условиях термомеханического цикла сварки способствует накоплению внутренних напряжений и зарождению холодных трещин в ЗТВ, целесообразно применять сварочные материалы, обеспечивающие получение металла шва с пределом текучести меньшим, чем у металла ЗТВ. При этом нарастание напряжений и развитие пластических деформаций при усадке в шве, способствуя снижению уровня внутренних напряжений в сварном соединении, будет приводить к наклепу металла шва, а следовательно, повышению его прочностных свойств [5].

Были опробованы несколько марок электродов с покрытием, применяемых для сварки ответствен-

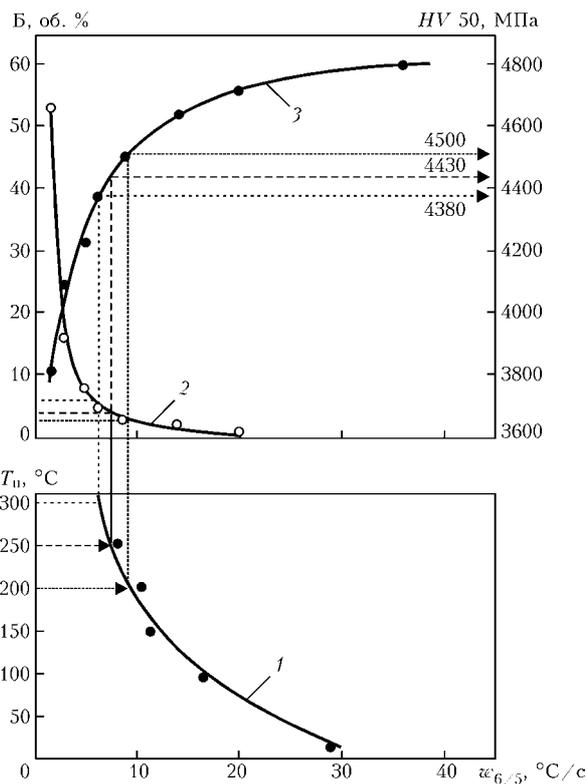


Рис. 2. Влияние температуры предварительного подогрева  $T_n$  пластины на скорость охлаждения (1) (в условиях испытания имплант), объемную долю бейнита Б (2) и твердость металла ЗТВ  $HV 50$  (3)

ных конструкций из углеродистых низколегированных сталей (табл. 2). Металл, наплавленный указанными электродами, имеет близкий химический состав, мас. %: 0,07...0,09 С; 0,25...0,50 Si; 0,63...1,30 Mn; 0,02...0,03 S; 0,015...0,030 P. Однако сочетание более высокой пластичности при достаточно высоких показателях прочности обеспечивают только электроды ТМУ-21У, Fox EV 50, ОК 53.70, LB-52U. Так, например, металл труб из стали 20ХН4ФА имеет следующие прочностные свойства, МПа: временное сопротивление составляет 1334...1520; предел текучести — не менее 1079.

Для проверки прочности сварных соединений стали 20ХН4ФА выбраны электроды ТМУ-21У диаметром 3 мм (производства России) и ОК 53.70 диаметром 3,2 мм (фирма ESAB, Швеция). Образцы для испытаний на статическое растяжение (ГОСТ 6996-66) вырезали поперек стыковых соединений, полученных из трубной стали толщиной 5 мм и прошедших отпуск при 250 °С. Сварку выполняли на следующем режиме: сварочный ток  $I_{св} = 110...120$  А (постоянный, полярность обратная); напряжение на дуге  $U_d = 22...24$  В. Кромки стыкового соединения имели одностороннюю V-образную разделку. Концентрация диффузионного водорода  $H_{диф}$  (спиртовой анализ «карандашных» проб [6]), переходящего из сварочных электродов в наплавленный металл, составляла 1,25 см<sup>3</sup>/100 г Me при использовании электродов ОК 53.70 и 3,3 см<sup>3</sup>/100 г Me в случае электродов ТМУ-21У.

Результаты испытаний представлены в табл. 3. Выбранные электроды обеспечивали достаточно высокие и практически одинаковые показатели прочности сварных соединений. При этом холодные трещины не возникали. Дополнительно испытаны со-

Таблица 2. Механические свойства наплавленного металла при ручной дуговой сварке

Марка электрода	$\sigma_{\text{т}}$ , МПа	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	
					T = +20 °С	T = -20 °С
УОНИ-13/45	360	470	24,0	57,0	155	—
ТМУ-21У	370	520	25,0	59,0	155	—
ЦУ-5	350	500	22,0	58,0	147	—
Фох EV 50	450	540	30,0	65,0	—	180
OK 53.70	440	530	30,0	68,0	—	200
LB-52U	510	600	25,0	71,0	—	195

единения, полученные с использованием электродов ТМЛ-3У, которые обычно применяются при сварке хромомолибденовых и хромомолибденованадиевых теплоустойчивых сталей ( $H_{\text{диф}} \approx 2,7 \text{ см}^3/100 \text{ г Me}$ ). Уровень прочности на разрыв и характер разрушения образцов аналогичны предыдущим. Таким образом, электроды испытанных марок (а также подобные им) можно применять для заварки негерметичных участков в днищах баллонов. При этом предпочтительнее выбирать электроды с меньшей концентрацией диффузионного водорода.

**Устранение причин возникновения негерметичности.** Торцы труб, сходящиеся в зените сферической части баллона при горячем деформировании, образуют складки, заключающие в себе прослойки прочно застрявшей окалины, которые могут пересекать в этой зоне все сечение стенки. Как показали металлографические исследования, окалина приводит к образованию расслоений и трещин в основном металле, а при взаимодействии со швом продукты, содержащиеся в окалине, вызывают образование несплавов по краям последнего, а также пор и трещин в наплавленном металле. Типичный вид дефектов в макро- и микроструктуре металла «закатных» зон днищ баллонов с герметизирующими швами показан на рис. 3. В совокупности эти дефекты приводят к образованию сквозных каналов, а следовательно, к потере герметичности соединения.

Как правило, «закатные» трещиноподобные слои концентрируются в узкой зоне стыковки кромок. Для их удаления предложено осуществлять выборку дефектного металла путем высверливания. С целью облегчения доступа сварочного электрода к корню будущего шва необходимо выполнять коническую выборку металла. Отработанный экспериментально угол скоса в коническом отверстии позволяет достаточно эффективно «очистить» металл от внутренней окалины и обеспечить удобное заполнение отверстия.

**Техника заварки отверстий.** Для заварки технологических отверстий в днищах баллонов (без дополнительно вставляемой пробки) опробованы два процесса: ручная дуговая сварка покрытыми электродами (как основной) и автоматическая сварка под флюсом как дополнительный процесс с целью проверки возможности его применения. Основной особенностью ручной дуговой сварки является возможность выполнения сварки на весу (без подкладки) в любых пространственных положениях.

В ходе сварочно-технологических испытаний установлено, что для получения качественных швов

Таблица 3. Результаты испытаний сварных соединений стали 20ХН4ФА на кратковременный разрыв

Маркировка образца	Марка электрода	$\sigma_{0,2}$ , МПа
39-1	ТМЛ-3У	915
39-2	ТМЛ-3У	1007
21-1	ТМУ-21У	886
21-2	ТМУ-21У	1086
28-1	OK 53.70	994
28-1	OK 53.70	1099

днищ баллонов необходимо применять следующие приемы техники сварки.

1. При выполнении корневого шва сварочный ток следует уменьшить на 10... 15 % по сравнению с номинальным; зажигать дугу необходимо на средней части образующей конической выборки, после чего переместить дугу к отверстию и заварить его спиральным швом — от края к центру отверстия на короткой дуге.

2. Последующие проходы осуществлять на номинальном сварочном токе, начиная шов на границе сплавления основного металла со швом предыдущего прохода и заканчивая в центре выборки; сварной шов необходимо выполнять по спирали.

3. Количество слоев зависит от толщины металла в месте выборки, толщина одного слоя должна составлять 3... 5 мм.

4. После каждого прохода следует тщательно удалять шлак из выборки, обращая особое внимание на место перехода шва к основному металлу.

5. Для предотвращения образования пор сварку необходимо выполнять прокаленными электродами на короткой дуге, избегая подрезов на стенке выборки.

Указанная техника сварки имеет следующие преимущества: меньшее тепловложение в каждом проходе дает возможность получать металл шва с более мелкой первичной структурой и металл ЗТВ с зерном более мелкого размера; многопроходный способ сварки валиками малого сечения исключает транскристаллитное строение металла шва, способствует получению дезориентированной структуры шва между слоями, а также измельчению зерна металла ЗТВ вследствие фазовой перекристаллизации [7], что в целом положительно сказывается на технологической прочности сварных соединений; возможность осуществления визуального контроля качества шва после каждого прохода; удобство и простота настройки под сварку, мобильность.

К недостаткам следует отнести низкую производительность процесса сварки. К тому же при выполнении многопроходных швов в случае недостаточной квалификации сварщика существует вероятность возникновения таких дефектов, как шлаковые включения, поры и несплавления.

При механизированном процессе заварка технологических отверстий на весу недопустима из-за вытекания металла шва через его корневую часть. Поэтому сварку выполняли с использованием подкладок — чисто медной и медной со слоем флюса (флюсомедной). При отработке режимов и техники сварки использовали стальные пластины толщиной 20 мм с отверстиями двух типов — цилиндрическим и коническим. Для сварки применяли штатное сварочное оборудование — головку А1416 и выпрямитель ВДУ 1201. Длительность горения ду-

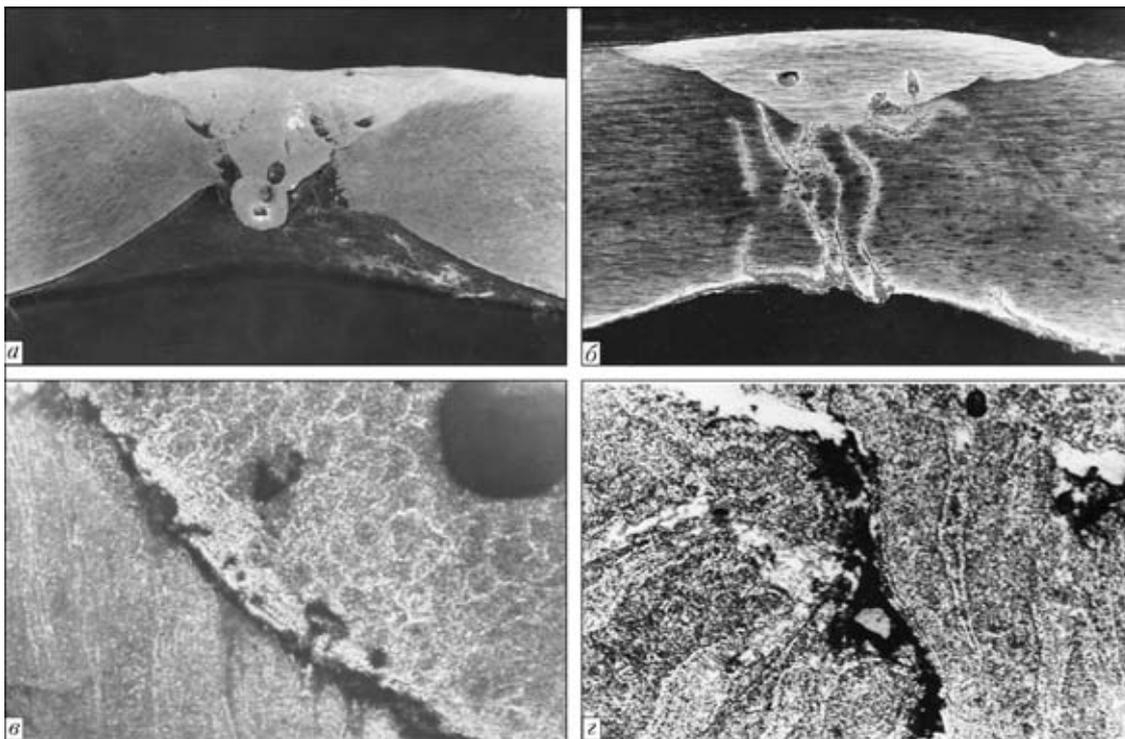


Рис. 3. Макро- (*a, б*) и микроструктура (*в, з*) «закатных» зон дниц баллонов с герметизирующими швами: *a* — общий вид дефектов в шве (поры в металле шва и трещины в зоне сплавления); *б* — общий вид пор в шве и трещиноподобных дефектов в основном металле; *в* — трещины в зоне сплавления,  $\times 100$ ; *з* — несплошности, образовавшиеся при растрескивании в зоне скопления окалины,  $\times 200$

ги и скорость подачи сварочной проволоки подбирали исходя из условий заполнения отверстия.

При использовании медной подкладки можно возбуждать дугу непосредственно на ней, что позволяет выполнять в днищах баллонов цилиндрические отверстия. В случае флюсомедной подкладки возбуждение дуги происходит на основном металле на поверхности конической разделки.

При увеличении толщины металла в зоне заварки отверстия до размера оптимального вылета электрода  $10d_3$  (где  $d_3$  — диаметр сварочной проволоки) вылет требуется также увеличить во избежание закорачивания мундштука на изделие. В настоящей работе сварку выполняли с увеличенным вылетом ( $16d_3$ ), что, однако, не отразилось на результатах заварки отверстий.

Вид подготовленных отверстий в пластинах представлен на рис. 4, а подобранные режимы их заварки — в табл. 4 и 5.

Опыты показали, что при использовании механизированного процесса удается получить монолитный шов. Однако у опробованных способов есть

свои недостатки. Так, для сварки на медной подкладке характерно неудовлетворительное формирование обратной стороны шва (рис. 5, *a, б*). Имеет место недозаполнение металлом нижней части отверстия (рис. 5, *a*), дефекты типа подрезов, неровность поверхности обратной стороны шва (рис. 5, *б*) и в ряде случаев трещиноподобные дефекты у неровностей. Неровности формируются при неудовлетворительном растекании по подкладке первых фракций расплавленного металла, разделяемых нерасплавившимися частицами просыпавшегося флюса, что, по-видимому, связано со значительной теплоотводящей способностью меди. Кроме того, происходит прихватывание медной подкладки к металлу шва.

Указанные недостатки исключаются при использовании флюсомедной подкладки. При разделке с коническим отверстием в зените за счет дополнительного внутреннего скоса  $\alpha_2$ , как показано на рис. 4, *б*, возможно получение соединений с качественным формированием шва (рис. 5, *в*). Оптимальные условия заварки отверстий, подобранные для сварки электродами диаметрами 3 и 4 мм,

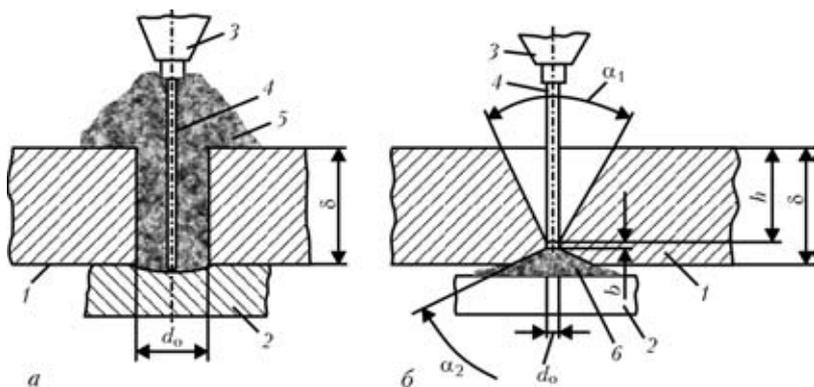


Рис. 4. Вид отверстий, подготовленных в пластинах для сварки на медной (*a*) и флюсомедной подкладке (*б*): 1 — основной металл; 2 — медная подкладка; 3 — мундштук сварочной головки; 4 — электродная проволока; 5, 6 — соответственно сварочный и подкладочный флюсы;  $d_0$  — цилиндрическое отверстие;  $\delta$  — толщина стали;  $\alpha_1$  — угол раскрытия конического отверстия;  $\alpha_2$  — угол конической внутренней выборки;  $h$  — глубина конического отверстия;  $b$  — притупление

Таблица 4. Варианты заварки отверстий в днищах с использованием различных подкладок при толщине свариваемой стали 20 мм

Форма отверстия	Тип подкладки	$\alpha_1$ , град	$\alpha_2$ , град	$d_o$ , мм	$h$ , мм	$b$ , мм
Цилиндрическая	Медная	—	—	10,2	—	—
Коническая	Флюсомедная	50	120	2,8 (3,8)*	17	1

\* Диаметр электродной проволоки З(4) мм.

Таблица 5. Оптимальные условия заварки под флюсом отверстий в днищах из низколегированной высокопрочной стали толщиной 20 мм

$d_o$ , мм	$I_{св}$ , А	$U_d$ , В	$\tau$ , с	Вылет электрода, мм
3	400...420	32...34	7...9	48
4	500...520		6...8	64

Примечание. Размер зерен флюса для флюсомедной подкладки — менее 0,63 мм.



Рис. 5. Макрошлифы отверстий, заваренных под флюсом при сварке на медной (а, б) и флюсомедной (в) подкладке

представлены в табл. 5. Для обеспечения удовлетворительного формирования обратной стороны шва с незначительной или нулевой выпуклостью при флюсомедной подкладке рекомендуется применять флюс мелкой грануляции, что обеспечивает ее плотное прилегание к обратной стороне изделия.

Факторами, влияющими на формирование внешней стороны шва, являются в первую очередь сварочный ток  $I_{св}$  и продолжительность горения дуги  $\tau$ . Коническая форма отверстий, подлежащих заварке, в данном случае предпочтительнее, чем цилиндрическая, особенно при увеличении их глубины, поскольку именно такая форма обеспечивает более благоприятную направленность кристаллизации металла шва (отсутствуют зоны с поперечным ростом кристаллитов), способствующую всплыванию шлаковых включений.

Отверстия цилиндрической формы технически выполнить более просто. В случае применения при этом флюсомедной подкладки для обеспечения закорачивания электрода на изделии цилиндрическая выборка металла в области корня шва должна иметь диаметр менее  $d_o$ . Однако при этом из-за малого объема выбранного металла повышается вероятность присутствия в нем окалины.

Таким образом, в случае применения автоматической сварки под флюсом целесообразно использовать вариант с флюсомедной подкладкой. Он лишен недостатков, свойственных чисто медной подкладке. Однако механизированная сварка требует специализированной аппаратуры и дополнительных приспособлений для введения через горловину и крепления подкладки, что значительно усложняет весь процесс сварки. Кроме того, непостоянная толщина стенки в зените днища в зоне отверстий требует постоянной корректировки режима сварки. Поэтому более приемлемой является ручная дуговая сварка покрытыми электродами, при которой

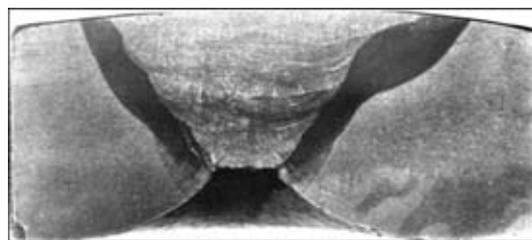


Рис. 6. Макрошлиф соединения, полученного при заварке технологического отверстия в днище баллона из стали 2ХН4ФА ручной дуговой сваркой

заварку отверстий выполняют с предварительным подогревом. Вид соединения, полученного ручной дуговой сваркой, представлен на рис. 6.

Рекомендуемый процесс ручной дуговой сварки обеспечивает высокое качество сварных соединений, прошел всестороннее опробование и принят для заводского изготовления штатных баллонов емкостью 20 и 50 л, рассчитанных на рабочее давление 16,9 МПа и предназначенных для хранения автомобильного топлива.

1. *Марочник* сталей и сплавов / Под ред. В. Г. Сорокина. — М.: Машиностроение, 1989. — 639 с.
2. *Гривняк И.* Свариваемость сталей. — М.: Машиностроение, 1984. — 216 с.
3. *Структурные превращения и свариваемость закаляющейся высокопрочной стали 20ХН4ФА* / В. Ю. Скульский, А. К. Царюк, В. Г. Васильев, Г. Н. Стрижнук // Автомат. сварка. — 2003. — № 2. — С. 19–23.
4. *Sawhill J. M., Dix A. W., Sawage W. F.* Modified implant test for studying delayed cracking // *Welding J.* — 1974. — **35**, № 12. — P. 554–560.
5. *Закс И. А.* Электроды для дуговой сварки сталей и никелевых сплавов: Справ. пособие. — СПб.: Welcome, 1996. — 384 с.
6. *Козлов Р. А.* Сварка теплоустойчивых сталей. — Л.: Машиностроение, 1986. — 154 с.
7. *Chew B., Harris P.* HAZ refinement in CrMoV steel. Effects of welding position, weld preparation and electrode size // *Metal Construction.* — 1979. — May. — P. 229–234.

The paper deals with the causes for defect formation in the bottoms of hot-sealed cylinders and features of their repair. Weldability of 20KhN4FA steel is evaluated, preheating temperature, welding electrodes and technique of manual arc welding are recommended. The method of automatic submerged-arc welding on a backing is tested as an alternative welding process.

Поступила в редакцию 30.05.2005