



СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ СВАРКОПАЙКЕ СТАЛИ 20

А. С. ПИСЬМЕННЫЙ, д-р техн. наук, Д. П. НОВИКОВА, канд. техн. наук,
А. С. ПРОКОФЬЕВ, инж., В. В. ПОЛУХИН, канд. техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты исследования микротвердости металла шва и околошовной зоны, полученного способом индукционной прессовой сварки (сваркопайки) с применением активирующих веществ. Установлено, что металл шва представляет собой сплав на основе основного металла соединяемых деталей. Определено, что для получения качественных швов необходимый коэффициент деформации $k_d = 0,025 \dots 0,050$. Показано, что при выполнении сваркопайки с траекторией контакта по замкнутой цилиндрической поверхности до 25 % зоны соединения не визуализируется, и соединение заготовок происходит по основному металлу.

Ключевые слова: сваркопайка, трубчатые и фланцевые соединения, индукционный нагрев, деформация, свариваемость, металлография, экспресс-методика

С использованием процесса сваркопайки выполняют стыковые соединения труб нефтяного сортамента диаметром до 325 мм, а также бурильных труб [1–8]. Особенности технологии получения таких соединений уже достаточно хорошо исследованы, известны критерии, при выполнении которых гарантировано высокое качество швов [5, 6].

Процесс сваркопайки обычно осуществляют следующим образом. При необходимости производят предварительную механическую обработку кромок и поверхности соединяемых кромок заготовок изделия. Затем заготовки помещают в зажимы сварочного приспособления, осуществляют индукционный нагрев соединяемых кромок изделия до температуры плавления активирующих веществ, предварительно размещенных в зоне шва. Далее к соединяемым деталям прикладывают давление, при этом осуществляется встречное контролируемое по уровню пластическое деформирование свариваемых кромок (осадка), в ходе которого формируется соединение деталей. Шов образуется в процессе пластической деформации нагретых кромок, сопровождающейся вытеснением легкоплавкой фазы активирующего вещества из шва, вплоть до образования прочного соединения деталей.

В последнее время получила развитие сваркопайка трубчатых соединений концевой и промежуточной трубной арматуры [9, 10]. Процесс образования швов в этих соединениях имеет отличия от такового, протекающего при стыковой сваркопайке труб. Это главным образом связано с более сложным характером перемещения металла нагретых кромок в процессе осадки.

Данная статья посвящена анализу результатов исследования швов, полученных способом сваркопайки на специальных образцах с использованием разработанной экспресс-методики [11], которая позволяет моделировать образование швов, характерных для соединений типа труба–фланец и Т-образных соединений труб [9, 10]. При этом

исследовано влияние уровня пластической деформации зоны швов на их свойства.

На рис. 1 представлены схемы традиционных фланцевых конструкций [12], выполненных посредством сваркопайки с применением осадки по внутреннему диаметру трубы.

Подобные соединения фланцев с тонкостенными трубами малых диаметров (до 70 мм и при отношении диаметра к толщине стенки 12...20 и более) широко используются при производстве велосипедов, мотоциклов, средств реабилитации инвалидов, медицинской техники.

На рис. 1, б дана схема процесса сваркопайки фланцевого соединения с образованием конусной отбортовки трубы по внутренней поверхности фланца, показана возможность формирования уплотнительного выступа или канавки посредством сварочного пуансона. Подобные соединения часто выполняют в трубных досках, где обычно толщина

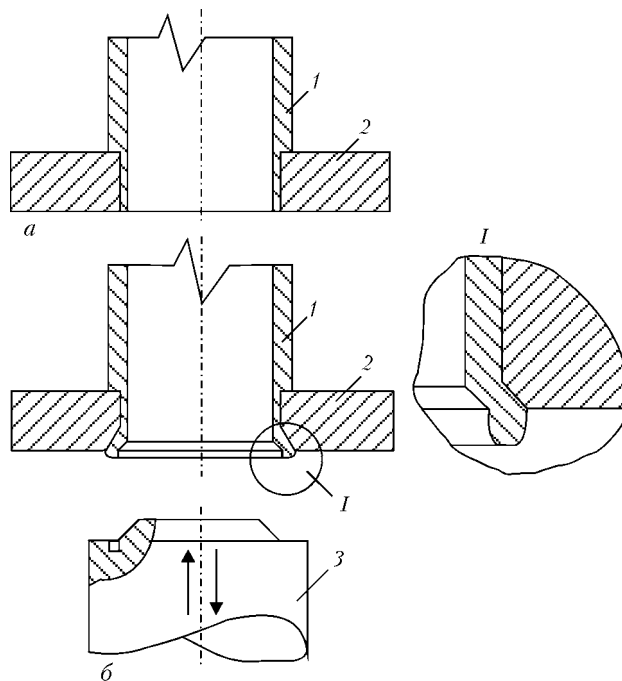


Рис. 1. Схемы жесткого фланцевого соединения (а) и его сваркопайки с отбортовкой трубы по внутренней поверхности фланца (б): 1 – труба; 2 – фланец; 3 – сварочный пуансон

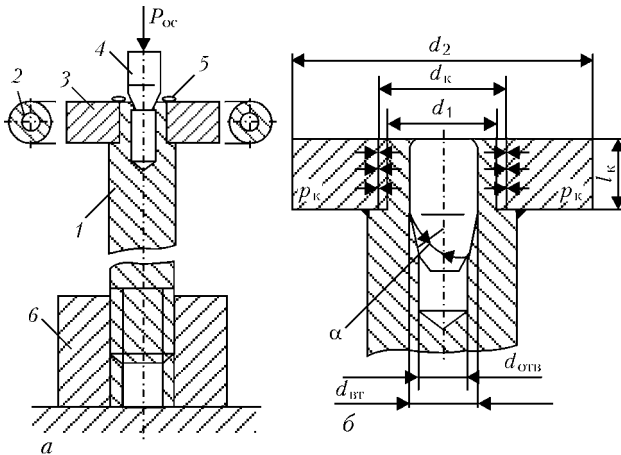


Рис. 2. Схема моделирования процесса (а) сваркопайки на образцах (б): 1 – шпилька; 2 – индуктор; 3 – шайба; 4 – цилиндрическая вставка; 5 – активирующее вещество; 6 – упор

фланца h превышает толщину стенки трубы $S_{тр}$ в 5 и более раз, например, в конструкциях теплообменных аппаратов.

В рамках упомянутой выше методики применяют специальную шпильку 1 и шайбу 3 (рис. 2), изготовленные из определенного материала, конструкция которых позволяет моделировать и исследовать процесс образования соединений между деталями, составляющими образец.

При этом можно исследовать зависимость свойств полученных соединений от заданных уровней пластической деформации соединяемых деталей образца. Для моделирования указанного процесса после прекращения нагрева образца в технологическое отверстие в шпильке запрессовывается цилиндрическая вставка 4 заданного размера с конусовидной заточкой (рис. 2). По мере углубления она вначале деформирует стенку отверстия до уплотнения зазора с размещенным в нем активирующим веществом, а при дальнейшем движении осуществляет совместную пластическую деформацию деталей образца на заданный уровень (рис. 2, б).

Образцы, соединенные сваркопайкой согласно экспресс-методике, готовили к исследованиям следующим образом. Для исследования изменений формы и размеров деталей и полученного шва, произошедших в результате пластической деформации, изготовленные образцы механически обрабатывали по торцу и шлифовали.

Для проведения металлографических исследований швов образцы разрезали по оси (рис. 2, б) и полировали. Травление образцов производили в 4%-м спиртовом растворе азотной кислоты (нитале) [13].

При необходимости с помощью этой методики можно производить подбор активирующих веществ (припоев, флюсов и связующих материалов) для сваркопайки деталей образца из заданного материала. Оценка служебных свойств сварных швов, образование которых смоделировано согласно экспресс-методике, необходимо производить в зависимости от влияющих на процесс соединения деталей параметров осадки.

Ранее для оценки служебных свойств стыковых соединений труб, полученных способом сварко-

пайки, использовали определенные числовые значения, отражающие влияние процесса и его параметров на качество швов. Так, при определении степени пластической деформации ϵ в плоскости стыка был введен коэффициент деформации $k_d = \delta_y / \delta$, где δ_y – геометрический размер, показывающий утолщение стенки трубы в месте стыка и определяющийся как разность между вновь образованной выпуклостью шва и толщиной стенки трубы δ [5].

Для предложенного типа образцов (рис. 2), моделирующих образование соединения концевой трубной арматуры, таких как соединения фланцев с трубами по замкнутой цилиндрической (контактной) поверхности, параметром, определяющим степень деформации ϵ , является диаметр контактной поверхности d_k , который претерпевает изменения в зависимости от диаметра цилиндрической части конусовидной вставки, при запрессовывании которой обеспечивается совместная пластическая деформация деталей образца на заданный уровень.

Соответствующий этому параметру коэффициент деформации для данного случая можно определить следующим образом:

$$k_d = \frac{d_k - d_1}{d_1}, \quad (1)$$

где d_1 – наружный диаметр шпильки, определяющий первоначальное расположение контактной поверхности.

При этом можно определить зависимость k_d от параметров осадки кромок.

Создающееся при запрессовке конусовидной вставки контактное давление в шве p_k можно определить так [14]:

$$p_k = \frac{E\delta(1 - k_2^2)}{2d_k}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости для данной марки стали (сталь 20 по ГОСТ 8733–87), равный $2 \cdot 10^5$ МПа; δ – образовавшийся в образце натяг (мм), определяемый из выражения $\delta = d_k - d_1$; k_2 – коэффициент разностенности, вычисляемый по формуле $k_2 = d_k / d_2$; d_2 – наружный диаметр шайбы.

Входящее в уравнение (2) выражение δ / d_k можно представить в виде $d_k - d_1 / d_k$ или с учетом того, что согласно (1) $d_k = d_1(k_d + 1)$ его можно представить как

$$\frac{\delta}{d_k} = \frac{d_k - d_1}{d_k} = \frac{d_1(k_d + 1) - d_1}{d_1(k_d + 1)} = \frac{k_d}{k_d + 1}$$

Подставив это выражение в формулу (2), последнюю можно привести к виду

$$p_k = \frac{Ek_d(1 - k_2^2)}{2(k_d + 1)}. \quad (3)$$



При этом из выражения (3) становится очевидной зависимость контактного давления от степени пластической деформации:

$$p_k = f\left(\frac{k_d}{k_d + 1}\right)$$

На рис. 3 представлена зависимость k_d от заданного p_k .

Для определения усилия, требуемого для контактного смятия и развития пластической деформации в металлах и сплавах, можно воспользоваться результатами четвертой теории прочности, из которой следует, что

$$\sigma_{max} = 5\sigma_T \tag{4}$$

где σ_{max} — нормальное к поверхности шва максимальное контактное сжимающее напряжение [15].

Данное сравнение позволяет оценить влияние пластической деформации на формирование шва, его свойства при образовавшемся контактом давлением p_k , а также возможность оптимизации процесса сваркопайки с учетом σ_T соединяемых материалов и используемых активирующих веществ.

Для определения механической мощности привода осадки и усилия осадки P_{oc} сравнивали контактное давление в шве p_k , вычисляемое из выражения (3), с напряжением σ_{max} , которое необходимо развить для пластической деформации и контактного смятия в металлах и сплавах.

Для определения усилия осадки воспользуемся выражением, приведенным в работе [9]:

$$P_{oc} = \frac{P_n}{\cos \alpha} = \frac{S_k p_k}{\cos \alpha} = \frac{\pi d_{вст} l_k p_k}{\cos \alpha} \tag{5}$$

где P_n — нормальное усилие к поверхности смятия; S_k — площадь контактной поверхности; p_k — контактное давление при осадке и температуре проведения процесса, обычно $p_k = 5...50$ МПа; $d_{вст}$ — диаметр цилиндрической вставки; l_k — осевая длина контактной поверхности; α — угол между осью цилиндрической вставки и нормалью, проведенной к контактной поверхности.

В описанных экспериментах детали образцов изготавливали из углеродистой стали (ГОСТ 8733–87) с нормированием следующего химического состава по группе «Б» (ГОСТ 1050–74), мас. %: 0,16...0,24 углерода; $\leq 0,65$ марганца; 0,15...0,30 кремния; $\leq 0,25$ хрома и до 0,005 фосфора. В качестве активирующего вещества использовали латунную фольгу марки Л-63, а также флюс Na_2BrO_7 (бура).

Результаты измерений размеров шпилек и шайб на общей обработанной торцевой поверхности показали, что в результате сваркопайки произошло их изменение. Например, когда диаметр конусообразной вставки составлял 5,0 мм, диаметр технологического отверстия в шпильке увеличился от 3,5 до 5,0 мм, а средний диаметр поверхности шва (практически совпадающий с наружным диаметром шпильки и внутренним диаметром отвер-

стия в шайбе) изменился с 8,0 (диаметр d_1) до 8,44 мм (диаметр d_k). Наружный диаметр шайбы d_2 не изменился. При этом коэффициент деформации шва составил 0,055 (5,5 %).

В результате деформации толщина стенки между поверхностью технологического отверстия и средней поверхностью шва уменьшилась от 2,25 до 1,72 мм, т. е. на 24 %. Это привело к увеличению площади поверхности шва $\Delta S_{шв}$ на 5 % по сравнению с первоначальной площадью соединения.

Изменение указанных размеров можно объяснить следующим образом. Исходя из геометрических размеров образцов (рис. 2), определенное расчетным путем из выражения (3) образовавшееся при сваркопайке контактное давление в остывшем шве изменяется в пределах $p_k \cong 2000...4250$ МПа вдоль осевой длины шва.

При сравнении расчетного контактного давления p_k в остывшем шве с определенным из выражения (4) максимальным контактным сжимающим напряжением σ_{max} установлено, что p_k превышает более чем в 2...4 раза σ_{max} и более чем в 7...15 раз σ_T (σ_T — предел текучести для данной марки стали при 20 °С). Напомним, что для стали 20 при температуре окружающей среды $T = 20$ °С $\sigma_T = 200...245$, а $\sigma_{max} = 1000$ МПа. Эти же соотношения соблюдаются и при температуре протекания процесса сваркопайки, но при более низких абсолютных значениях напряжений. Так, при температуре плавления активирующего вещества ($T_{пл} = 880...950$ °С) в условиях формирования шва σ_{max} приближается по уровню к σ_T , при этом σ_T находится в пределах 5...50 МПа. Соответственно значения контактного давления p_k будут гораздо меньше.

Достижение температуры плавления активирующего вещества определяет начало проведения процесса соединения, протекающего обычно для поддерживающих медь активирующих веществ в температурном интервале 1000...1100 °С, при котором происходит процесс осадки кромок в случае соответствующего p_k , а также формирование шва.

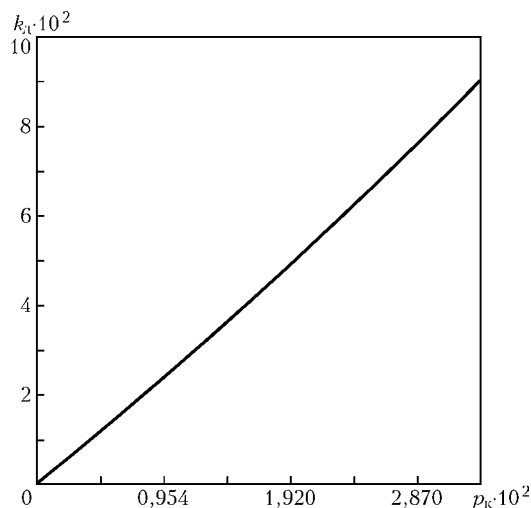


Рис. 3. Зависимость коэффициента деформации k_d от заданного контактного давления p_k

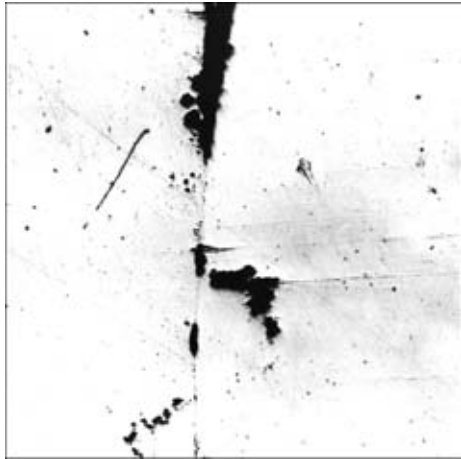


Рис. 4. Обогащение стальных деталей медьсодержащей расплавленной прослойкой в зонах шва, которые прилегают к контактной поверхности соединения, $\times 25$

Эти давления приводят к образованию течений в расплавленной прослойке, направленных вдоль соединяемых контактных поверхностей и способствующих вытеснению легкоплавкой фазы активирующего вещества из шва. Кроме того, эти давления являются причиной изменения диаметра контактной поверхности d_k в сформировавшемся образце и способствуют образованию сварного соединения.

Полученные таким образом данные позволяют определить из выражения (5) усилие осадки P_{oc} , равное 5060 Н, что соответствует $p_k = 8$ МПа при температуре ведения процесса. Эти данные использованы в экспериментах.

В соответствии с приведенной выше методикой подготовки образцов проанализировано строение металла шва и околошовной зоны. Обнаружено обогащение медью стальных деталей в зонах шва, прилегающих к контактной поверхности соединения (темные следы на рис. 4).

На рис. 5 показано, что закристаллизовавшаяся прослойка шва имеет прерывистое строение вдоль сопряжения поверхностей соединяемых кромок и не обнаруживается визуально приблизительно на 25 % общей его границы. Здесь соединение кромок деталей, очевидно, происходит в твердой фазе.

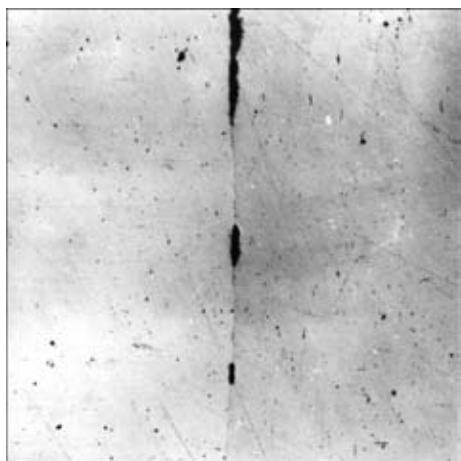


Рис. 5. Прерывистое строение закристаллизовавшейся прослойки в зоне шва, $\times 25$

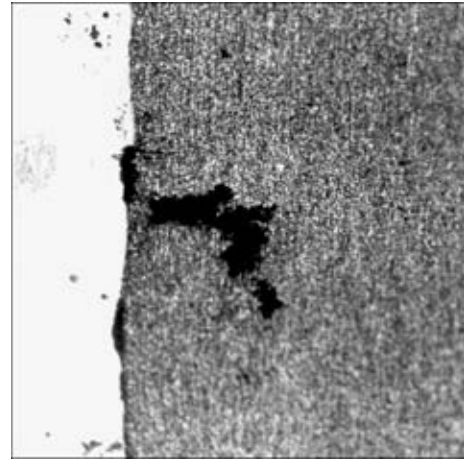


Рис. 6. Заполнение материалом закристаллизовавшейся прослойки микротрещин на глубину до 0,4 мм, $\times 63$

На рис. 6 и 7 заметно, что медьсодержащий материал закристаллизовавшейся прослойки шва в процессе сваркопайки проникает по границам зерен в тело деталей на глубину до 0,4 мм, заполняя несовершенные зоны поверхностей кромок (микротрещины).

При более подробном металлографическом анализе этих же образцов видимых дефектов в шве не обнаружено.

Для определения сравнительных характеристик металла шва и околошовной зоны выполнили анализ микротвердости этих зон в образцах по известной методике [16–21].

Распределение микротвердости в зоне швов исследовали с помощью микротвердомера фирмы «LECO». В тех местах, где не обнаружен видимый шов (соединение в твердой фазе) и выявлены изолированные вкрапления невыдавленной прослойки толщиной до 2,5 мкм (рис. 8, а), на приборе зафиксирована твердость $HV 2540$ МПа, что превышает таковую образцов стали 20 в состоянии поставки на 9,4 % ($HV 2320$ МПа).

Измерена также твердость металла шва, имеющего размер до 18 мкм вблизи его центральной части (рис. 9, а). Зафиксированные на приборе показания составили $HV 2190$ МПа, что меньше, чем у материала образцов на 6 %.

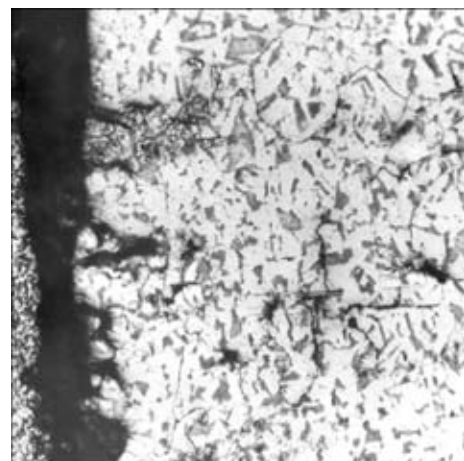


Рис. 7. Проникновение материала прослойки по границам зерен в тело деталей, $\times 100$

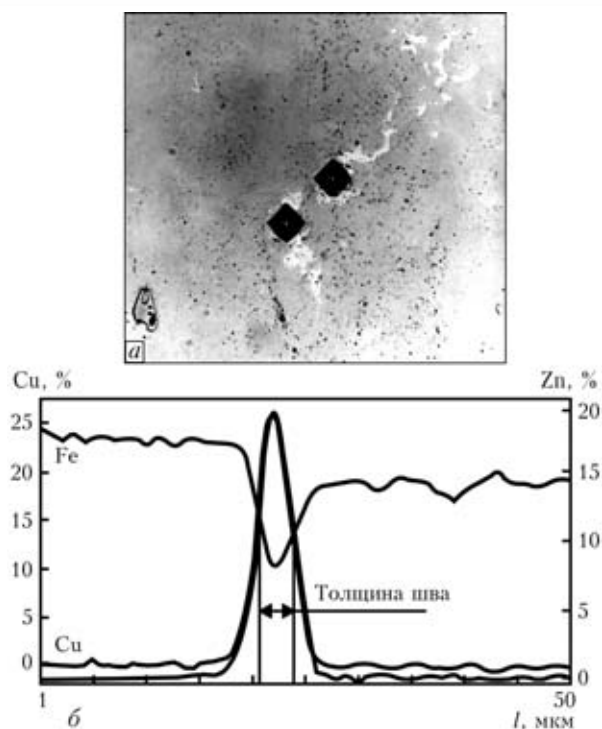


Рис. 8. Микроструктура ($\times 320$) участка соединения с изолированными вкраплениями прослойки (а) и распределение железа, меди и цинка в нем (б)

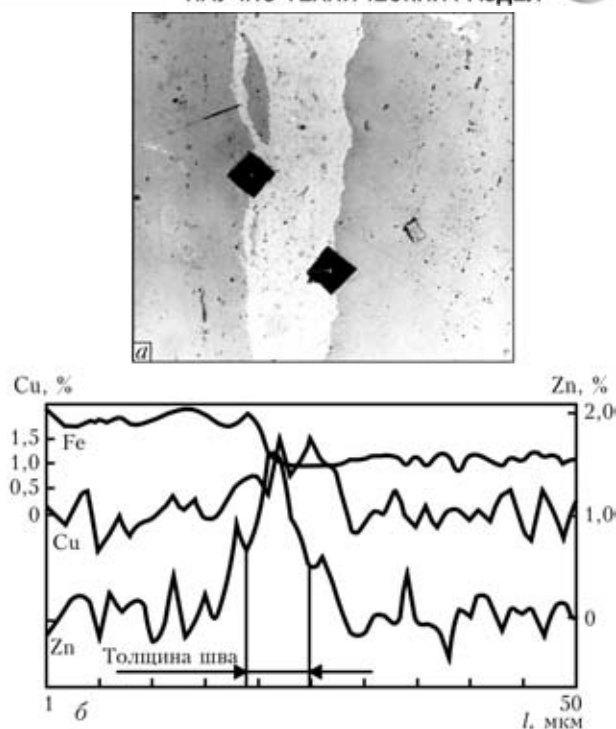


Рис. 9. Микроструктура ($\times 320$) участка соединения с толщиной шва до 18 мкм (а) и распределение железа, меди и цинка в нем (б)

Микроструктура этой же зоны шва при еще большем увеличении изображения данного участка шва (рис. 10) свидетельствует об отсутствии несплавлений, несплошностей, пор и других дефектов.

Полученные при исследовании шва границы прослойки и кромки значения микротвердости составляют $HV\ 2190 \dots 2510$ МПа, при этом их разброс от средней измеренной твердости шва $HV\ 2320$ МПа достигает +10 % и не превышает 10 % твердости основного металла. Эти данные свидетельствуют о сходстве прочностных свойств металла шва и основного металла [22].

Для исследования состава шва и распределения основных компонентов активирующего вещества (медь и цинк) в металле шва и околошовной зоны в условиях произошедшей деформации кромок проведен микрорентгеноспектральный анализ зоны соединения на приборе фирмы «Самбах» (модель SX-50). Исследования проводили при перемещении микрозонда на расстояние 50 мкм (шаг 1,02 мкм). Установлено, что содержание растворенных в металле шва элементов активирующего вещества (на примере припоя Л-63 и буры) следующее:

в местах, где не обнаружен видимый шов, но выявлены изолированные вкрапления невыдавленной прослойки (рис. 8, а): Cu — 0,018, Zn — 0,015 мас. % при Fe — 99,967 мас. %; Cu — 0,02, Zn — 0,01 при Fe — 99,97 ат. % (рис. 8, б);

на участках вблизи центральной части шва Cu — 1,510, Zn — 1,698 при Fe — 96,792 мас. %; Cu — 1,33, Zn — 1,46 при Fe — 97,21 ат. % (рис. 9, б);

на периферии шва, где есть участки невытесненной прослойки (рис. 6): Cu — 26,190, Zn — 18,162 мас. % при Fe — 55,648 мас. %; Cu — 24,44, Zn — 16,47 при Fe — 59,08 ат. %.

Установлено, что металл шва представляет собой сплав на основе основного металла — железа. Даже на периферийных участках шва, в месте образования галтельного участка, где степень пластической деформации и контактное давление в 2,5 раз меньше, чем в середине, содержание железа составляет более 50 %. Это свидетельствует о зависимости химического состава металла закристаллизовавшегося шва от степени пластической деформации ϵ и контактного давления p_k , действующего на прослойку в шве в условиях кристаллизации в стесненных условиях.

Таким образом, для получения качественных швов по замкнутой цилиндрической поверхности способом сваркопайки необходимо обеспечить $k_d = 0,025 \dots 0,050$.

Проведены механические испытания на срез образцов (рис. 11), моделирующих выполнение фланцевого соединения с образованием конусовидной отбортовки трубы по внутренней поверхности фланца (см. рис. 1, б). В условиях опытов коэф-

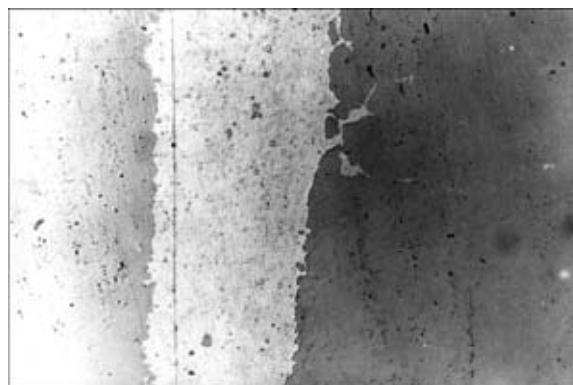


Рис. 10. Микроструктура зоны шва (рис. 9) при большем увеличении, $\times 680$ (увел. в 5 раз)

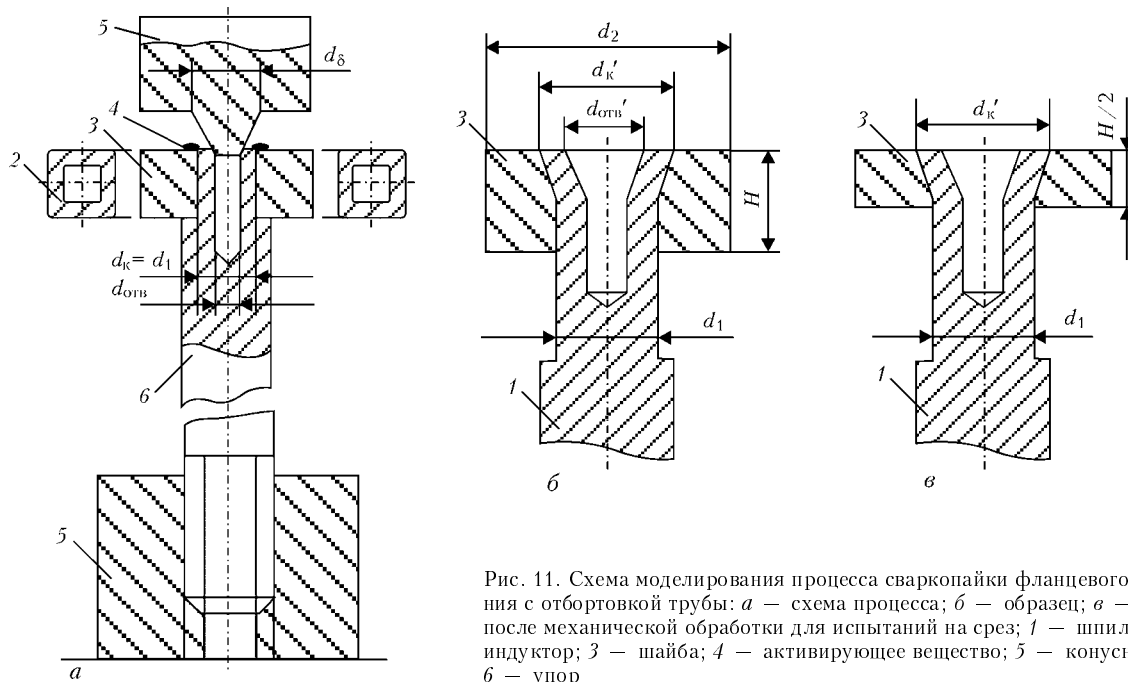


Рис. 11. Схема моделирования процесса сваркопайки фланцевого соединения с отбортовкой трубы: а — схема процесса; б — образец; в — образец после механической обработки для испытаний на срез; 1 — шпилька; 2 — индуктор; 3 — шайба; 4 — активирующее вещество; 5 — конусный боек; 6 — упор

коэффициент деформации кромок k_d составлял от 0,04 до 0,14 в разных сечениях по высоте шва. При этом вместо цилиндрической вставки заданного размера с конусной заточкой (см. рис. 2) использовали конусный боек 5 (рис. 11, а). В дальнейшем образец, полученный по схеме на рис. 11, б, обрабатывали согласно схеме на рис. 11, в. Результаты испытаний образцов приведены в таблице.

Как видно из таблицы, наименьшее напряжение среза $\tau_{ср.ср}$ имеют образцы, изготовленные без применения активирующих веществ. Для образцов, где швы выполнены с применением активирующих веществ, напряжение среза $\tau_{ср.ср}$ в 3 и более раз больше, чем в образцах без активирующих веществ при одной и той же заданной степени деформации металла шва и околошовной зоны.

При этом напряжение среза $\tau_{ср.ср}$ в образцах с применением в качестве активирующего вещества латуни Л-63 с бурой составило 218 МПа, что близко к нормируемому напряжению среза стальных деталей, паянных латунным припоем, который достигает примерно 200 МПа. Это также соответствует нижней границе предела текучести $\sigma_T \cong 200...245$ МПа для стали 20 (ГОСТ 1050-52).

Еще более высокое напряжение среза (425,2 МПа) получено при использовании в качестве активирующего вещества смеси буры и припоя ПАН-3 (ТУ 14-1-2991-80). Этот показатель превысил более чем в 1,5 раза напряжение среза латуни марки Л-63 и в 1,2...1,3 раза нормируемое значение напряжения среза при пайке швов припоем ПАН-3. При этом часть образцов (№ 7 и 8) не удалось довести до разрушения по причине срыва резьбы с хвостовой части образца.

Данные результаты свидетельствуют о том, что значения прочности металла шва и основного металла близки.

Как следует из работ [3-7], коэффициент деформации, необходимый для выполнения качес-

твенных швов способом сваркопайки в стыковых соединениях труб, превышает таковой в рассматриваемых соединениях и составляет 0,4...0,5 толщины стенки трубы в месте стыка. Это объясняется перемещением нагретого металла кромок рассматриваемых соединений как в осевом, так и тангенциальном направлениях вдоль поверхности шва, что способствует улучшению механических свойств соединения [8, 23].

Толщина визуально зафиксированного сварного шва соизмерима с глубиной шероховатости поверхности кромок заготовок, являющийся результатом механической обработки деталей образцов перед

Результаты испытаний на срез образцов, выполненных способом сваркопайки

№ образца	Активное вещество	$F_{ср}$, Н	d_1 , мм	d_k , мм	$S_{шв}^2$, мм ²	$\tau_{ср}$, МПа	$\tau_{ср.ср}$, МПа
1	—	2660	8,0	10,18	101,36	26,24	—
2	—	4850	8,0	10,18	101,36	47,85	—
3	—	3751	8,0	10,18	101,35	37,01	37,0
4	Л-63	18400	8,1	10,18	102,24	179,9	—
5	Л-63	22000	8,0	10,18	101,34	217,0	—
6	Л-63	25980	7,9	10,18	100,52	258,5	218,0
7	ПАН-3	38400	Не разрушился				
8	ПАН-3	37700					
9	ПАН-3	17200	7,9	10,18	50,65	339,6	—
10	ПАН-3	30600	8,0	10,18	58,13	526,4	—
11	ПАН-3	22850	7,8	10,18	55,79	425,2	425,2

Примечания. 1. Здесь d_1 — диаметр контактной поверхности, измеренный на образце до выполнения соединения; $\tau_{ср} = F_{ср}/S_{шв}$. 2. Напряжение среза определяли согласно действующим методикам из выражения $\tau_{ср.ср} = (\tau_{ср1} + \tau_{ср2} + \dots + \tau_{срn})/n$, где n — количество образцов для определения среднего значения напряжения среза. В наших опытах $n = 3$. 3. При получении образцов № 1-3 активирующие вещества не применяли. 4. Составной частью активирующего вещества, используемого в опытах, являлась бура.



сваркой. Именно поэтому шов представляет собой чередующиеся участки различной толщины, вплоть до исчезновения границы между поверхностями кромок.

Выводы

1. Данные микрорентгеноспектрального анализа свидетельствуют о том, что металл шва представляет собой сплав на основе основного металла соединяемых деталей — железа. При выполнении способом сваркопайки шва по замкнутой цилиндрической поверхности до 25 % зоны соединения не визуализируется, и соединение заготовок происходит в твердой фазе.

2. Сравнительные исследования микротвердости металла шва и околошовной зоны свидетельствуют о получении металла, аналогичного по свойствам основному металлу.

3. Коэффициент деформации, необходимый для выполнения качественных швов способом сваркопайки по замкнутой цилиндрической поверхности, составляет $0,025...0,050$. Это меньше, чем k_d у стыковых соединений труб и стержней ($0,4...0,5$), что объясняется перемещением нагретого металла кромок как в осевом, так и в тангенциальном направлениях вдоль поверхности шва.

1. *Высокотемпературная пайка труб для геологоразведочного бурения* / В. К. Лебедев, В. Д. Табелев, А. С. Письменный и др. // Автомат. сварка. — 1989. — № 5. — С. 28–30.
2. *Письменный А. С., Шинлов М. Е., Буженецкий А. И.* Применение индукционной сваркопайки для соединения труб нефтяного сортамента // Там же. — 1995. — № 12. — С. 35–38.
3. *Лебедев В. К., Табелев В. Д., Письменный А. С.* Стыковая пайка под давлением стальных трубопроводов // Там же. — 1983. — № 9. — С. 25–27.
4. *Структура и фазовый состав швов, выполненных капиллярной пайкой и пайкой с приложением давления* / В. Д. Табелев, Н. Л. Карета, А. И. Панасенко и др. // Там же. — 1985. — № 11. — С. 26–29.
5. *Письменный А. С.* Синтез индукционных систем для сварки и пайки труб в стык // Там же. — 1990. — № 5. — С. 11–15.
6. *Физическое моделирование осадки при сварке или пайке труб в стык* / В. К. Лебедев, А. С. Письменный, О. Г.

- Касаткин, М. Е. Шинлов // Там же. — 1990. — № 8. — С. 17–20.
7. *Табелев В. Д.* Особенности образования соединений при пайке с пластическим деформированием основного металла // Там же. — 1991. — № 7. — С. 5–9.
8. *Письменный А. С., Прокофьев А. С.* Прессовая сварка труб с применением активирующих веществ // Там же. — 2002. — № 7. — С. 22–27.
9. *Прокофьев А. С., Письменный А. С.* Технология сваркопайки фланцев с трубой // Там же. — 2000. — № 5. — С. 50–52.
10. *Индукционная сваркопайка безарматурных тройниковых соединений труб* / А. С. Прокофьев, А. С. Письменный, В. А. Бондарев, А. В. Бондарев // Там же. — 2001. — № 4. — С. 46–50.
11. *Экспресс-методика для разработки и проверки технологической пайки давлением* / А. С. Письменный, В. В. Полушин, А. С. Прокофьев и др. // Там же. — 2002. — № 1. — С. 48–50.
12. *Долгунов Л. Ш., Прокопов В. К., Самсонов Ю. А.* Расчет и конструирование фланцевых соединений судовых трубопроводов и сосудов. — Л.: Судостроение, 1972. — 264 с.
13. *Реактивы для выявления макро- и микроструктур сварных соединений сталей и сплавов* / В. Ф. Грабин, А. В. Денисенко, Д. П. Новикова и др. — Киев: Наук. думка, 1977. — 120 с.
14. *Справочник машиностроителя: В 6 т.* — М.: Машгиз, 1955. — Т. 3. — 563 с.
15. *Сопrotивление материалов* / Под ред. Г. С. Писаренко. — Киев: Виц. шк., 1973. — 627 с.
16. *Давиденков Н. Н., Беляев С. Е., Марковец М. П.* Получение основных механических характеристик стали с помощью измерений твердости // Завод. лаб. — 1945. — № 10. — С. 964–973.
17. *Сичиков М. Ф., Захаров Б. П., Козлова Ю. В.* Об определении механических свойств стали без испытаний разрывных образцов // Там же. — 1947. — № 12. — С. 1463–1471.
18. *Куцук-Яценко С. И., Казымов Б. И.* Оптимальный термический цикл при контактной стыковой сварке стали 12Х1МФ // Там же. — 1967. — № 6. — С. 24–27.
19. *Форостовец Б. А.* Особенности структуры металла соединений при сварке оплавлением // Там же. — 1972. — № 4. — С. 9–13.
20. *Марковец М. П.* Определение механических свойств металла по твердости. — М.: Машиностроение, 1979. — 191 с.
21. *Гуляев А. П.* К вопросу о механических свойствах конструкционных сталей // Металловедение и терм. обработка мет. — 1989. — № 7. — С. 23–25.
22. *Шмыков А. А.* Справочник термиста. — М.: Машгиз, 1956. — 332 с.
23. *Сахацкий Г. П., Дудник Г. П.* Свойства соединений, выполненных стыковой сваркой в формирующих устройствах // Автомат. сварка. — 1972. — № 4. — С. 56–58.

The paper gives the results of studying the microhardness of the weld and HAZ, produced by the method of induction-press welding with application of activating substances (braze-welding). It is established that the weld metal is an alloy based on the parent metal of the parts being joined. It is determined that deformation coefficient required for performance of sound welds is within $k_d = 0.025...0.050$. It is shown that during performance of braze welding with the contact trajectory along a closed cylindrical surface, up to 25 % of the joint zone is not visualized and the billets are joined over the base metal.

Поступила в редакцию 02.02.2004,
в окончательном варианте 25.06.2004