



ВЫБОР СПОСОБА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЫХ ЭЛЕКТРОШЛАКОВЫХ КОРПУСОВ ФЛАНЦЕВЫХ ЗАДВИЖЕК ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В КОРРОЗИОННО-СТОЙКОМ ИСПОЛНЕНИИ

М. А. Полещук, В. Л. Шевцов, Л. Г. Пузрин,
А. М. Круцан, А. И. Радкевич, М. Р. Чучман

Определены механические и антикоррозионные свойства литой электрошлаковой стали 12Х21Н5Т. Показано, что ее прочностные и пластические свойства находятся на уровне свойств толстолистового проката открытой выплавки и значительно превосходят свойства обычного литья. Установлено, что скорость коррозии литой электрошлаковой стали 12Х21Н5Т меньше, чем у проката из этой стали обычной выплавки (соответственно 0,10 и 0,14 мм/год). Предложено использовать способ высокотемпературной автовакуумной пайки для получения композиционных корпусов.

Mechanical and anticorrosion properties of cast electroslag steel 12Kh21N5T are determined. It is shown that its strength and ductile properties are at the level of properties of thick-sheet rolled metal of open melting and are greatly superior to the properties of a conventional casting. It was found that the rate of corrosion of cast electroslag steel 12Kh21N5T is lower than that in rolled stock of this steel of a conventional melting (0.10 and 0.14 mm/year, respectively). It was offered to use the method of high-temperature autovacuum brazing for producing composite bodies.

Ключевые слова: литые электрошлаковые корпуса; сталь 12Х21Н5Т; механические и коррозионные свойства; автовакуумная пайка

Одним из главных направлений укрепления энергетической безопасности Украины является увеличение собственной добычи природного газа. Его разведанные перспективные месторождения залегают на больших глубинах. Для их эффективной разработки необходимо специальное оборудование, способное работать при давлении до 35 и даже 70 МПа. В ряде случаев это оборудование должно быть также стойким к вредным примесям, содержащимся в добываемом газе, прежде всего к сероводороду H_2S и углекислому газу CO_2 .

В зависимости от содержания этих примесей стандарт [1] предусматривает три исполнения оборудования, отличающихся классом используемых сталей. При содержании в газе до 6 % CO_2 используется оборудование в исполнении К1, в случае суммарного содержания H_2S и CO_2 до 6 % — К2, а при их содержании до 25 % — К3.

Основой такого оборудования являются задвижки с фланцами на концах патрубков, корпуса которых наиболее нагружены рабочим давлением и от прочности которых зависит безопасная работа (рис. 1). Для обеспечения надежности корпусов задвижек, работающих при давлении 35 и 70 МПа, их требуется изготавливать из металла с высокими прочностными и пластическими характеристиками, исключаящими возможность хрупкого разрушения.

Общепринятая в мировой практике спецификация [2] не приводит конкретных марок сталей, используемых для изготовления корпусов фланцевых задвижек в каждом исполнении, а лишь указывает предельное содержание легирующих элементов.

Кроме того, для каждого рабочего давления эта спецификация предусматривает минимально допустимые уровни механических свойств металла, из которого должно изготавливаться соответствующее оборудование. Производители сами выбирают марки стали, которые при соответствующем рабочем давлении и содержании вредных примесей обеспечивают необходимую прочность и коррозионную стойкость изделия.

На украинских газовых промыслах чаще всего используют задвижки в исполнении К1. Для их изготовления Институтом электросварки им. Е. О. Патона совместно с фирмой «ИФ Элтерм» разработана и внедрена в производство прогрессивная технология электрошлакового литья заготовок корпусов из среднеуглеродистых легированных сталей. Освоен серийный выпуск заготовок корпусов с условным проходом диаметрами 50, 65 и 80 мм на давление 70 МПа и диаметром 65 мм на давление 35 МПа из сталей 38ХМ и 40Х. Корпуса фланцевых задвижек из электрошлаковых заготовок отличает самое высокое качество при низкой себестоимости [3, 4].

В связи с освоением в Украине ряда газовых месторождений на морском шельфе, в добываемом продукте которых содержится примесь H_2S , особую актуальность приобретает создание отечественного производства фланцевых задвижек высокого давления в коррозионно-стойком исполнении с тем, чтобы отказаться от их дорогостоящего импорта.

При повышенном суммарном содержании CO_2 и H_2S для изготовления корпусов фланцевых задвижек за рубежом применяют высоколегированные хромоникелевые стали. Для работы при высоком давлении корпуса выполняют из поковок [5]. С целью выбора стали, пригодной для изготовления

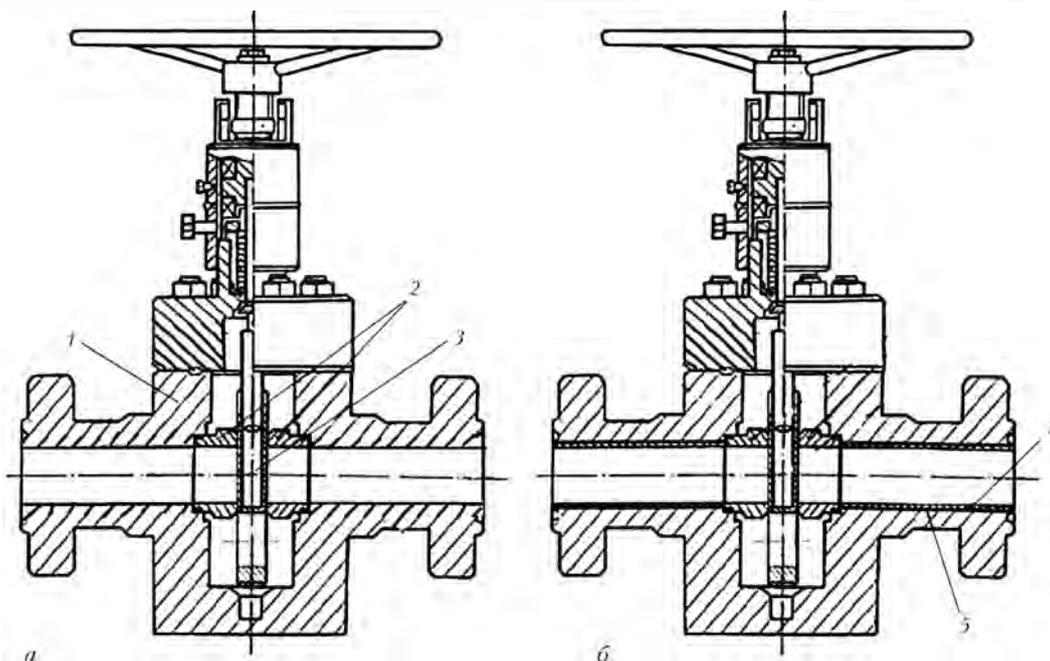


Рис. 1. Схема фланцевой задвижки высокого давления с цельнолитым электрошлаковым (а) и композиционным (б) корпусом: 1 – корпус; 2 – седла; 3 – штибель; 4 – коррозионно-стойкое покрытие канала; 5 – паяный шов

способами ЭШЛ заготовок корпусов таких задвижек, нами исследована феррито-аустенитная сталь марки 12Х21Н5Т, поковки из которой в настоящее время применяют для изделий в коррозионно-стойком исполнении.

Выплавлялись опытные электрошлаковые слитки диаметром 120 мм*. Слитки подвергали закалке в воде от температуры 1050 °С и из них изготовляли образцы для проведения механических и коррозионных испытаний литого электрошлакового металла.

Для компенсации угара титана при ЭШЛ применяли электрод-спутник из титановых проволок диаметром 5 мм. Результаты спектрального анализа выплавленных слитков приведены в табл. 1. Химический состав электрошлаковых слитков стали полностью удовлетворяет требованиям стандарта.

Результаты механических испытаний образцов приведены в табл. 2. Там же указаны требования стандартов на механические свойства сталей в виде обычного литья и толстолистового проката, а также требования спецификации [2] к прочности корпусных изделий, работающих при давлении 35 и 70 МПа. Как видно из табл. 2, литая электрошлаковая сталь 12Х21Н5Т по своим механическим свойствам не уступает прокату обычной выплавки и значительно

превосходит обычное литье. Однако ее свойства соответствуют лишь требованиям к металлу корпусов, работающих при давлении до 35 МПа.

Для определения возможности изготовления из этих сталей литых электрошлаковых корпусов фланцевых задвижек в исполнении, стойком против примеси H₂S и CO₂, нами проведены коррозионные испытания металла выплавленных слитков, в ходе которых определяли скорость коррозии сталей в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным; стойкость против межкристаллитной коррозии (МКК); сопротивляемость сероводородному коррозионному растрескиванию под напряжением (СКРН), что является важнейшей характеристикой коррозионно-механической прочности, а также коррозионно-стойкую и коррозионно-циклическую трещиностойкость.

Скорость коррозии измеряли массометрическим методом в специально созданном автоклаве в потоке раствора, движущегося со скоростью 6 м/с, при температуре 30 °С и давлении 2 МПа в течение 20 ч [6]. Электрохимические измерения проводили по оригинальным [7] и общепринятым методикам с использованием потенциостата IPC-Pro. Склонность к МКК оценивали согласно ГОСТ 6032–2003 методом АМУ [8]. СКРН изучали способом статическо-

Таблица 1. Химический состав стали 12Х21Н5Т до и после ЭШЛ

Образец	Массовая доля элементов, %							
	С	Cr	Ni	Ti	Mn	Si	S	P
Исходный металл	0,11	21,3	4,9	0,29	0,40	0,34	0,014	0,021
ЭШЛ	0,12	21,0	5,0	0,30	0,41	0,36	0,010	0,020
ГОСТ 5632–72	0,09... 0,14	20,0... 22,0	4,8... 5,8	0,25... 0,50	≤ 0,8	< 0,8	≤ 0,025	≤ 0,035

*В работе принимали участие Ф. К. Биктагиров и А. П. Игнатов.



Таблица 2. Механические свойства стали 12Х21Н5Т в различных состояниях

Образец	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ²
ЭШЛ	360,6... 387,3	709,9... 748,0	35,3... 43,0	40,0... 48,5	86,9... 107,2
	369,6	733,4	38,2	43,2	94,3
Толстолистовой прокат*	≥345	≥588	≥18	–	≥59
Отливка**	≥300	≥600	≥18	≥22	≥30
Требования для 35 МПа [2]	≥310	≥483	≥19	≥32	≥20
Требования для 70 МПа [2]	≥517	≥655	≥17	≥35	≥20

*Согласно ГОСТ 7350–77. **Согласно ТУ 26-06-066–82.

го растяжения гладких цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 6,4 мм на базе 720 ч. Циклическую трещиностойкость металла оценивали по скорости роста трещин при изгибе образцов с частотой 5 Гц на воздухе и в коррозионной среде. Статическую трещиностойкость определяли на образцах с предварительно созданной усталостной трещиной, нагруженных консольным изгибом, на базе 720 ч. Во всех опытах испытательной средой являлся стандартный раствор NACE (5%-й раствор NaCl + 0,5 % CH₃COOH + H₂S, насыщенный, pH 3... 4, (20±3) °C) [9].

Исследования показали, что скорость коррозии литой электрошлаковой стали 12Х21Н5Т снижается, по сравнению с исходным прокатом обычной выплавки (соответственно 0,10 и 0,14 мм/год). Эти данные согласуются с результатами определения потенциала коррозии. У электрошлакового литого металла он положительнее ($E_{кор} = -575$ мВ), чем у исходного ($E_{кор} = -595$ мВ), что свидетельствует о более высоких защитных свойствах продуктов коррозии, образующихся на поверхности электрошлакового металла. Аналогичные результаты получены при определении скорости коррозии электрохимическим способом. В растворе NACE без перемешивания при температуре 20 °C ток коррозии электрошлакового металла составлял 0,23 мА/см², в то время как для исходного проката обычной выплавки он равнялся 0,30 мА/см². Испытание литой электрошлаковой стали 12Х21Н5Т по методу АМУ показало полное отсутствие у нее склонности к МКК.

Общепринятым критерием по СКРН пригодности стали к эксплуатации в сероводородной среде считается значение отношения минимального напряжения, при котором образуются трещины в образцах в растворе NACE σ_{SSCC} , к пределу текучести $\sigma_{0,2}$ не ниже 0,8. Измерения показали, что у литой электрошлаковой стали σ_{SSCC} составляет 300 МПа, т. е. $\sigma_{SSCC}/\sigma_{0,2}$ равно 0,81. Такое же значение имела и исходная сталь 12Х21Н5Т. Скорость роста трещины под циклической нагрузкой у литой электрошлаковой стали при испытании на воздухе оказалась ниже, чем у исходной деформированной (соответственно $5,2 \cdot 10^{-8}$ и $6,35 \cdot 10^{-8}$ м/цикл). Условный пороговый коэффициент интенсивности статических напряжений в упомянутом растворе для литой электрошлаковой стали составляет не менее 43 МПа·м^{1/2}, что превышает минимальные требования для сталей, применяемых для изготовления

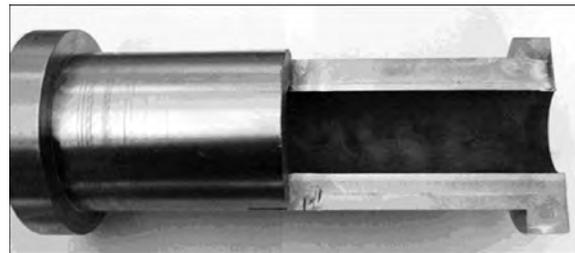


Рис. 2. Паяный макет рабочего канала композиционного корпуса с вырезанной частью

нефтегазового оборудования, стойкого против сероводородной среды (≥ 33 МПа·м^{1/2}).

Анализ полученных результатов показал, что из стали 12Х21Н5Т способом ЭШЛ можно успешно изготавливать корпуса задвижек в коррозионно-стойком исполнении для работы при давлении до 35 МПа. Для корпусов, работающих при более высоких значениях давления, эта сталь не обеспечивает необходимых прочностных характеристик. Задачу получения высокой прочности одновременно с коррозионной стойкостью можно решить путем создания композиционного корпуса задвижки. В этом случае требуемую прочность обеспечит корпус из литой электрошлаковой конструкционной стали, а стойкость стенки канала, непосредственно контактирующей с коррозионной средой, — слой высоколегированной стали, нанесенный на ее поверхность (рис. 1, б).

Мы предлагаем новую технологию получения композиционных корпусов задвижек, использующую высокотемпературную автовакуумную пайку (АВП) [10]. Она основана на так называемом автовакуумном эффекте, заключающемся в образовании вакуума в узком герметизированном зазоре между деталями при их нагреве для пайки. Вакуум возникает из-за растворения кислорода и азота горячими стенками зазора еще до расплавления припоя. При этом поверхность стенок зазора очищается от оксидов.

При АВП применяют более широкие зазоры, чем при капиллярной пайке. В них припой затекает под действием собственного веса и в результате образовавшегося вакуума беспрепятственно проникает на большую глубину. Припой надежно смачивает свободные от оксидов стенки зазора и образует прочное соединение. Благодаря этим особенностям способом АВП можно соединять крупные детали. Имеется положительный опыт пайки этим способом углеродистой и нержавеющей стали [11].

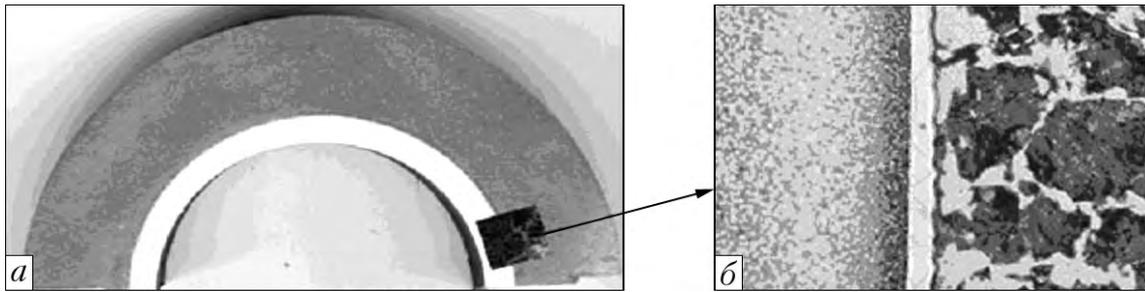


Рис. 3. Макрошлиф (а) и микроструктура (X50) (б) паяного соединения

Технологию получения композиционного корпуса задвижки с помощью АВП отработывали на макете, имитирующем задвижку с проходным каналом диаметром 50 мм с отношением диаметра паяного шва к его длине примерно 1:7. Основным металлом служил круглый прокат диаметром 130 мм из стали 40Х.

В качестве коррозионно-стойкого слоя использовали трубу с внутренним диаметром 50 мм и стенкой толщиной 5 мм из стали 12Х21Н5Т. Для ее размещения через всю заготовку на месте будущего рабочего канала путем механической обработки выполнили отверстие диаметром около 60 мм. В это отверстие вставили трубу и соединили ее торцы с заготовкой герметичными кольцевыми сварными швами. В герметизированном зазоре с верхнего конца разместили припой, в качестве которого применили порошок сплава системы никель–хром–кремний–бор с температурой плавления около 1000 °С. Нагрев макета производили в термической печи с воздушной атмосферой при вертикальном расположении рабочего канала и температуре 1050 °С.

При отработке технологического процесса особое внимание уделяли выбору оптимального размера зазора при сборке с учетом разницы в тепловом расширении трубы и корпуса. Требовалось достичь надежного заполнения припоем паяного зазора при его минимальной ширине с целью получения высокой прочности паяного соединения.

После пайки макет подвергли закалке с отпуском по стандартному режиму для стали 40Х. Его внешний вид после вырезки образцов для исследования приведен на рис. 2. В паяном шве не было обнаружено непропаев, пор или каких-либо других дефектов. Макрошлиф зоны паяного соединения и микроструктура этой зоны показаны на рис. 3.

Испытания на срез паяного шва показали, что его прочность составляла 295 МПа, что в два раза превышает требования стандарта к двухслойной стали (ГОСТ 10885–75 «Сталь горячекатаная толстолистовая двухслойная»). Испытания образцов, вырезанных из основного слоя, подтвердили, что свойства стали 40Х в макете полностью соответствуют требованиям к прочности корпусных изделий, работающих при давлении 70 МПа.

Таким образом, отработанная на макете технология АВП дала возможность определить основные параметры процесса, необходимые для получения качественных композиционных корпусов задвижек. Новая технология позволяет простыми средствами наносить на стенки рабочего канала коррозионно-стойкий слой гарантированной толщины с требуемым химическим составом. При этом стенки рабо-

чего канала после пайки не нуждаются в дополнительной механической обработке.

Полученные нами результаты дают основание использовать цельнолитые электрошлаковые корпуса фланцевых задвижек из стали 12Х21Н5Т для работы при давлении до 35 МПа на промыслах с повышенным содержанием коррозионно-активных примесей в добываемом природном газе. Для такого типа промыслов с рабочим давлением до 70 МПа мы предлагаем производить композиционные корпуса задвижек с использованием новой технологии АВП. Данные корпуса позволяют не только решить задачу одновременного обеспечения их прочности и коррозионной стойкости, но и значительно снизить стоимость производства, по сравнению с изготовлением корпусов целиком из дорогостоящих высоколегированных сталей.

1. ГОСТ 13846–89. Арматура фонтанная и нагнетательная. Типовые схемы, основные параметры и технические требования к конструкции. — Введ. 01.01.90. — 11 с.
2. Спецификация на устьевое и фонтанное оборудование БАР. 17-е изд.— Введ. 01.02.96.
3. Электрошлаковое литье заготовок корпусов задвижек, работающих при высоком давлении / М. А. Полещук, Л. Г. Пузрин, В. Л. Шевцов и др. // Современ. электрометаллургия. — 2009. — № 1. — С. 12–17.
4. Электрошлаковое литье заготовок корпусов фланцевых задвижек с приплавом патрубков / М. А. Полещук, Л. Г. Пузрин, В. Л. Шевцов и др. // Там же. — 2009. — № 2. — С.
5. Гуляниц Г. М. Противоводородное оборудование скважин, стойкое к сероводороду: Справ. пособие. — М.: Недра, 1991. — 348 с.
6. Пат. 36348 України, МПК G 01 N 17/00. Автоклав для корозійних досліджень матеріалів у агресивних середовищах / О. Радкевич, Р. Юркевич, Л. Карвацький, Г. Чумало. — Опубл. 27.10.2008; Бюл. № 20.
7. Пат. 25819 України, МПК G 01 N 27/26. Спосіб мікроелектрохімічних вимірювань в рухомій краплі електродіту / М. С. Хома, М. Р. Чучман, Г. М. Олійник. — Опубл. 27.08.07; Бюл. № 13.
8. ГОСТ 6032–2003. Межгосударственный стандарт. Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии. — Введ. 01.01.2005.
9. NACE Standard TM 0177-90. Standard Test Method Laboratory of Metals for Resistance to Sulfide Stress Corrosion Cracking in H2S Environments. — Houston: Tx. National Association of Corrosion Engineers (NACE), 1990. — 22 p.
10. Пузрин Л. Г., Бойко Г. А., Атрошенко М. Г. Автовакуумная высокотемпературная пайка. — Киев: О-во «Знання» Української ССР, 1975. — 16 с.
11. Автовакуумная пайка плакирующего слоя обечаек сосудов высокого давления / Л. Г. Пузрин, М. Г. Атрошенко, И. Г. Пешерин и др. // Проектирование технологического процесса пайки — основа повышения качества изделий и эффективности производства. — М.: Машпром, 1978. — С. 63–67.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев
Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины, Львов

Поступила 13.07.2009