

УДК 669.187.2

## ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО НАГРЕВА НА СВОЙСТВА СТАЛЕЙ ПРИ ПАЙКЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ КОРПУСОВ ФЛАНЦЕВЫХ ЗАДВИЖЕК ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Г. М. Григоренко, А. Л. Пузрин, М. Г. Атрошенко,  
М. А. Полещук, В. Л. Шевцов

Оценено влияние нагрева при пайке в диапазоне температур 1000... 1300 °С на служебные свойства композиционных корпусов фланцевых задвижек высокого давления, изготовленных из высокопрочной конструкционной стали со стенками канала из коррозионноустойчивой нержавеющей стали способом автовакуумной пайки. Показано, что последующая стандартная для конструкционных сталей термическая обработка не только полностью восстанавливает прочностные характеристики всех исследованных марок сталей, но и существенно повышает их пластичность. В то же время склонность нержавеющей сталей к межкристаллитной коррозии после указанной термической обработки зависит от температуры нагрева при пайке и содержания в них углерода.

Effect of heating in brazing within the range of temperatures 1000... 1300 °C on service properties of composite high-pressure stop valve bodies, manufactured of high-strength structural strength with channel walls of corrosion-resistant stainless steel by the method of autovacuum brazing, was evaluated. It is shown that the subsequent standard heat treatment for structural steels not only recovers completely the strength characteristics, but also increases significantly their ductility. At the same time, the susceptibility of stainless steels to intercrystalline corrosion after the mentioned heat treatment depends on heating temperature in brazing and carbon content in them.

**Ключевые слова:** композиционные задвижки высокого давления; автовакуумная высокотемпературная пайка; механические свойства сталей; МКК

Для увеличения объемов добычи собственного природного газа в Украине необходимо осваивать новые месторождения, которые, как правило, залегают на больших глубинах. В некоторых из них природный газ включает вредные примеси в виде  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$ . Суммарное их количество может достигать 6 %.

Для разработки этих месторождений требуется специальное оборудование, способное работать при давлении до 70 МПа и выше. В ряде случаев оно должно быть коррозионноустойчивым.

Важнейшим элементом оборудования, применяемого для добычи природного газа фонтанным способом, являются прямоточные фланцевые задвижки (рис. 1, а) [1], корпуса которых полностью воспринимают давление добываемого продукта. Для надежной работы их следует изготавливать из металла с высокими прочностью и пластичностью. В соответствии с требованиями, приведенными в докумен-

те [2], механические свойства металла корпусов задвижек, работающих при давлении до 70 МПа, должны иметь категорию прочности не ниже КП-517.

Для обеспечения таких высоких значений свойств металла заготовки для корпусов задвижек получают с применениемковки или электрошлакового литья [3]. При отсутствии вредных примесей корпуса таких задвижек изготавливают из высокопрочных конструкционных сталей типа 38ХМ, 40Х и т. п.

При повышенном суммарном содержании  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{S}$  для корпусов фланцевых задвижек используют дорогостоящие высоколегированные хромоникелевые стали, например 12Х21Н5Т [1], поковки из которых наряду с высокой прочностью характеризуются необходимой коррозионной стойкостью. Применение заготовок из данных сталей значительно усложняет их механическую обработку. Все это резко повышает стоимость изделия.

Снизить стоимость изготовления корпусов задвижек, отличающихся высокой прочностью, одновременно с обеспечением коррозионной стойкости

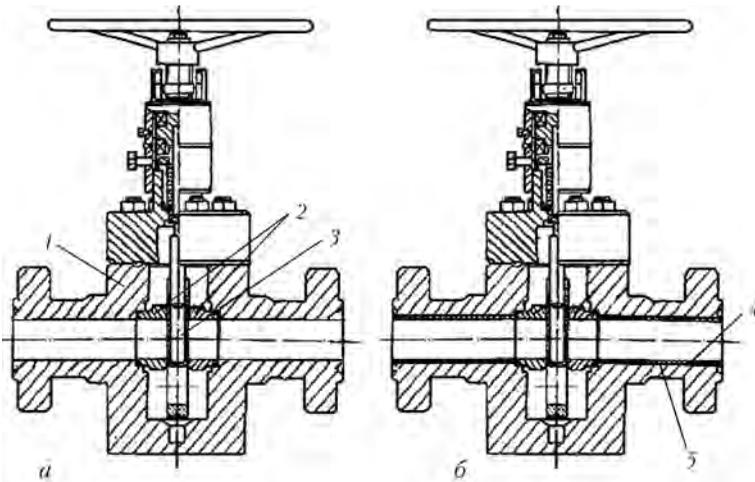


Рис. 1. Схема фланцевой задвижки высокого давления с электрошлаковым (*а*) и композиционным (*б*) корпусами: 1 – корпус; 2 – седла; 3 – штибель; 4 – коррозионностойкое покрытие канала; 5 – паяный шов

можно путем создания композиционного корпуса. В этом случае прочность обеспечивает наружный слой из конструкционной стали, а стойкость стенки канала, непосредственно контактирующей с коррозионной средой, – слой высоколегированной стали, нанесенный на ее поверхность (рис. 1, *б*).

Перспективным способом получения таких композиционных изделий считают высокотемпературную автовакуумную пайку (АВП) [4]. Надежное паяное соединение конструкционных и высоколегированных сталей с использованием этого способа можно получить при нагреве заранее собранной заготовки до температур 1000... 1300 °С в зависимости от марки используемого припоя.

С целью проверки возможности применения способа АВП для производства коррозионностойких фланцевых задвижек высокого давления изготовили макет корпуса задвижки с условным проходом диаметром 50 мм [5]. Основным металлом служил круглый прокат диаметром 130 мм из стали 40Х. В качестве коррозионностойкого слоя использовали нержавеющую сталь 12Х18Н10Т в виде трубы с внутренним диаметром 50 мм и толщиной стенки 5 мм. В качестве припоя выбрали порошок сплава системы никель–хром–кремний–бор с темпера-

турой плавления 1050 °С. Макет корпуса с загерметизированным паяльным зазором нагревали в термической печи с обычной атмосферой до температуры 1100 °С. Внешний вид готового макета после вырезки образцов для исследования приведен на рис. 2.

Однако при пайке в процессе нагрева свыше 1000 °С происходит интенсивный рост зерна. Это приводит к ухудшению прочностных и пластических характеристик металла, особенно ударной вязкости. Кроме того, у нержавеющих сталей при таком нагреве может снижаться коррозионная стойкость. Поэтому при изготовлении композиционных корпусов задвижек высокого давления способом АВП нужно принимать дополнительные меры, позволяющие получать требуемые в документе [2] служебные свойства обоих ис-

пользуемых металлов.

В связи с тем, что наиболее действенным способом восстановления служебных свойств металла является термическая обработка, нами проведены исследования ее влияния на характеристики некоторых сталей после их высокотемпературного нагрева.

На первом этапе исследовали микрошлифы паяного соединения макета корпуса композиционной задвижки (рис. 3), а также определяли механические свойства исходного проката стали 40Х, использованного при изготовлении макета корпуса задвижки, его механические свойства после пайки при температуре 1100 °С, а также после последующей термической обработки по стандартному режиму для стали 40Х (закалка 850 °С в масло, отпуск 650 °С, воздух) (табл. 1).

На микрошлифах четко выделяется паяный шов. Его толщина, измеренная в различных участках окружности паяного соединения, изменяется в пределах от 180 до 270 мкм. Такой разброс значений толщины шва обусловлен точностью изготовления и сборки макета корпуса задвижки. Испытания на срез металла паяного соединения показали, что его прочность составляет 295 МПа, что в два раза превышает требования стандарта [6].

Исследование микрошлифов основного металла показало, что после высокотемпературного нагрева при пайке на границе шов–сталь 40Х (рис. 3, *а*) структура представляет собой крупные зерна перлита размером до 1 балла [7], который в приграничной зоне имеет твердость  $HV1^*$  1830... 1980 МПа. По границам зерен в металле околшововой зоны происходит фрагментарное выделение доэвтектоидного феррита ( $HV1$  1320... 1400 МПа). Ближе ко шву ширина ферритных оторочек составляет 60 мкм. По мере удаления от шва (до 600 мкм) их ширина уменьшается, на расстоянии 1600... 1800 мкм феррит практически исчезает. Начиная с этого расстояния от шва размер зерна перлита уменьшается до баллов 2–3 и далее

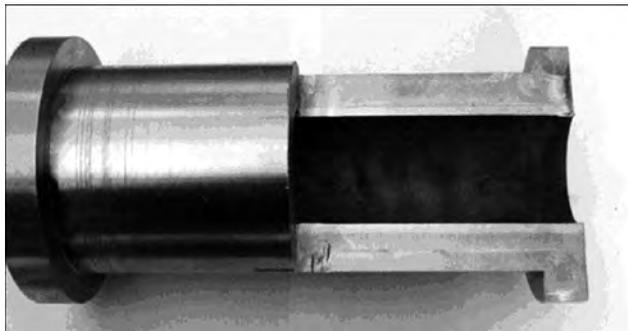


Рис. 2. Паяный макет рабочего канала композиционного корпуса с вырезанной частью

\* $HV1$  – твердость при нагрузке 1 Н.



**Таблица 1. Механические свойства основного металла корпуса из стали 40X паяного макета композитной задвижки**

Состояние металла	$\sigma_t$	$\sigma_b$	$\delta$	$\epsilon$	KCU	KCV
	МПа		%		Дж/см <sup>2</sup>	
Исходный прокат	573,0	876,0	17,8	59,8	96,7	–
После пайки	317,0	756,0	13,0	23,0	20,0	–
После пайки и термической обработки	707,6	874,1	21,7	64,0	163,8	105
Требования [2] (70 МПа)	$\geq 517$	$\geq 655$	$\geq 17$	$\geq 32$	–	$\geq 20$

не изменяется по всему объему. Твердость перлита здесь составляет HV1 2060 МПа.

После дополнительной термообработки паяного соединения на границе шов–сталь 40X (рис. 3, б, III) образуется мелкоигольчатая бейнитная структура с твердостью HV1 2360... 2380 МПа. Балл бывшего аустенитного зерна в этой зоне составляет около 4. По мере удаления от шва на расстоянии 1000... 1200 мкм происходит измельчение структуры. Такая структура сохраняется по всему объему образца. Твердость металла составляет HV 2360... 2380 МПа.

Исследование механических свойств стали 40X на различных этапах изготовления макета корпуса композиционной задвижки показали, что после пайки механические свойства металла резко ухудшаются по сравнению с исходным прокатом (табл. 1), что обусловлено ростом перлитного зерна при высокотемпературном нагреве до баллов 2–3. Металл с такими механическими свойствами соответствует требованиям документа [2] для изделий, работающих при давлении до 70 МПа.

После последующей термической обработки композиционного макета в стали 40X происходит зафиксированное на микрошлифах измельчение зерна и существенное повышение параметров механических свойств. При этом они не только полностью восстанавливаются до уровня проката, но и превышают его по показателям пластичности, особенно ударной вязкости. Механические свойства стали 40X после дополнительной термической обработки паяного макета корпуса композиционной задвижки полностью соответствуют требованиям документа [2].

Для изготовления прочной части корпуса композиционной задвижки высокого давления применяются не только сталь 40X, но и другие марки конструкционных сталей, а также припой с более высокой температурой плавления. Поэтому мы исследовали влияние различных значений температуры нагрева под пайку на пластические свойства сталей 38XM, 18X2H4BA, 15X2HM.

Нагрев до температуры выше 1300 °C приводит к пережогу сталей, что сопровождается безвозвратной потерей механических и коррозионных свойств [8]. В связи с этим темплеты из указанных сталей нагревали до значений температуры в интервале 1100... 1300 °C. Исследовали темплеты, подвергнутые термообработке по стандартным режимам; нагретые до различных температур в указанном интервале, а также после высокотемпературного нагрева с последующей термообработкой.

Из темплетов конструкционных сталей изготавливали стандартные образцы для определения механических свойств.

Результаты испытаний конструкционных сталей свидетельствуют о том, что их нагрев вплоть до 1300 °C с последующей стандартной термообработкой (за-

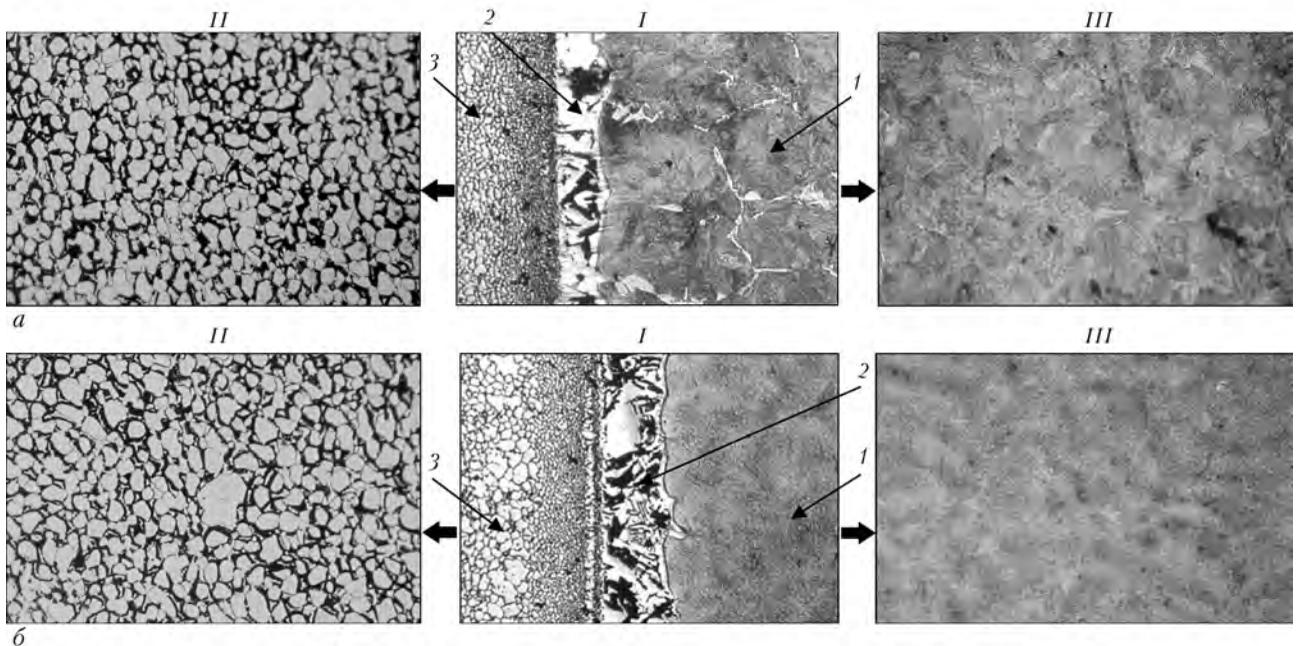


Рис. 3. Микрошлифы паяного соединения макета корпуса задвижки высокого давления после высокотемпературной пайки (а), пайки и термической обработки (б): 1 – основной металл; 2 – паяное соединение; 3 – коррозионностойкий слой; I –  $\times 50$ ; II, III –  $\times 100$



Таблица 2. Влияние термообработки на механические свойства сталей 38ХМ, 15Х2НМ, 18Х2Н48А

Температура нагрева, °С	38ХМ	15Х2НМ		18Х2Н48А	
	δ, %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>	δ, %	KCU, Дж/см <sup>2</sup>	δ, %
Исходный	<u>17,3...20,3</u> 18,4	<u>167...190</u> 177	<u>13,6...16,5</u> 14,4	<u>71...91</u> 88	<u>12,6...15,6</u> 14,2
1200	<u>10,0...13,0</u> 11,5	<u>36...42</u> 39	<u>15,3...16,3</u> 15,8	–	–
1230	<u>11,3...13,0</u> 12,0	<u>38...40</u> 39	<u>12,7...13,7</u> 13,2	–	–
1270	<u>9,3...12,3</u> 10,7	<u>29...34</u> 32	<u>9,3...10,0</u> 9,8	–	–
1300	<u>10,0...10,7</u> 10,3	<u>19...34</u> 28	<u>7,3...9,3</u> 8,0	<u>79...81</u> 80	<u>11,6...13,3</u> 12,3
1200 + T	<u>17,6...17,6</u> 17,6	<u>244...229</u> 236	<u>20,3...20,6</u> 20,4	–	–
1230 + T	<u>15,6...18,6</u> 17,2	<u>273...281</u> 279	<u>17,0...20,0</u> 17,9	–	–
1270 + T	<u>17,6...19,0</u> 18,4	<u>256...266</u> 262	<u>17,6...23,3</u> 21,0	–	–
1300 + T	<u>18,3...20,0</u> 19,1	<u>273...281</u> 278	<u>19,3...20,6</u> 20,0	<u>87...95</u> 91	<u>14,3...14,6</u> 14,5

Примечание. 1. Здесь буквой T обозначено наличие после нагрева стандартной термообработки (для стали 34ХМ – 860 °С, вода; 650 °С, 1 ч, воздух; 15Х2НМ – 860 °С, вода; 650 °С, 1 ч, воздух; 18Х2НЧВА – 920 °С, 1 ч, воздух; 220 °С – 1 ч, воздух. 2. В числителе указан разбег значений, в знаменателе – среднее.

калка с отпуском) позволяет не только полностью восстановить пластичность, но даже способствует увеличению ударной вязкости, как это видно на образцах из стали 15Х2НМ (табл. 2). По-видимому, в процессе длительного высокотемпературного нагрева при пайке происходит не только укрупнение зерен металла, но и их гомогенизация. Последующая закалка с отпуском позволяет получить мелко-

зернистую более гомогенную структуру металла. Все это благоприятно сказывается на его пластических свойствах.

Высокотемпературный нагрев при пайке макета композиционной задвижки оказывает влияние на структуру не только металла прочной части корпуса, но и коррозионностойкой стали. Сравнение микрошлифов коррозионностойкой части паяного соединения, приведенное на рис. 3, а, б, II), показывает, что после дополнительной термообработки происходит небольшое увеличение зерна. Так, после нагрева при пайке до температуры 1100 °С размер зерна стали 12Х18Н10Т соответствовал баллу 8. После закалки при 850 °С в масло и отпуска при 550 °С на воздухе, необходимых для достижения механических свойств прочной части корпуса, балл зерна составил 6–7.

Исследование влияния технологии АВП на межкристаллитную коррозию (МКК) сталей 12Х18Н10Т и 08Х18Н10Т производили путем изгиба согласно документу [9] после различных видов нагрева.

Темплеты, вырезанные из холоднокатаного листа, исследовали в исходном состоянии; после нагрева в диапазоне температур 1100... 1300 °С; а также после последующей термической обработки, необходимой для обеспечения требуемых свойств основного металла (закалка 860 °С + отпуск 650 °С). При каждом температурном режиме исследовали по три образца. Результаты испытаний на МКК сведены в табл. 3.

Таблица 3. Влияние различных режимов термической обработки на склонность нержавеющей сталей к МКК

Режим термообработки	12Х18Н10Т	08Х18Н10Т
1100 °С, 1 ч, воздух	–	–
1200 °С, 1 ч, воздух	–	–
1300 °С, 1 ч, воздух	–	–
Исходное состояние	–	–
1300 °С, 1 ч, воздух + + 860 °С, 1 ч, вода + + 650 °С, 5 ч, воздух	+	+
1200 °С, 1 ч, воздух + + 860 °С, 1 ч, вода + + 650 °С, 5 ч, воздух	+	–
1100 °С, 1 ч, воздух + + 860 °С, 1 ч, вода + + 650 °С, 5 ч, воздух	–	–

Примечание. Здесь «+» – обозначает проявление МКК; «–» – отсутствие проявления МКК.



При нагреве на 1100 °С с последующей термообработкой МКК на всех образцах не обнаружена. В то же время нагрев на 1300 °С с последующей термообработкой вызывает проявление МКК у всех испытанных образцов. При нагреве на 1200 °С с последующей термообработкой МКК проявляется только у стали с более высоким содержанием углерода.

Полученные результаты объясняются небольшим увеличением размера зерен при технологическом процессе АВП, вследствие чего уменьшается поверхность их границ [10]. Это приводит к повышению плотности карбидов, выделившихся на единицу поверхности. Мелкодисперсные карбиды связываются в сплошную цепочку, что вызывает снижение коррозионной стойкости нержавеющей стали. Сокращение содержания углерода в исходной стали способствует уменьшению плотности выделившихся карбидов на границах зерен, что в свою очередь приводит к повышению стойкости против МКК.

Таким образом, нагрев при пайке композитных корпусов задвижек до температуры 1100 °С с последующей термообработкой позволяет гарантированно обеспечить требуемые служебные характеристики изделия при любых комбинациях исследованных материалов прочного корпуса и антикоррозионного слоя.

1. *Гулянец Г. М.* Противовибросовое оборудование скважин, стойкое к сероводороду: Справ. пособие. — М.: Недра, 1991. — 348 с.
2. *Спецификация* на устьеовое и фонтанное оборудование 6АР1. 17-е изд. — Введ. 01.02.96.
3. *Электрошлаковое* литье вместоковки в производстве фонтанной арматуры высокого давления // В. Л. Шевцов, М. Л. Жадкевич, В. Я. Майданник, Л. Г. Пузрин // Современ. электрометаллургия. — 2003. — № 3. — С. 3–9.
4. *Пузрин Л. Г., Бойко Г. А., Атрошенко М. Г.* Автовакуумная высокотемпературная пайка. — Киев: О-во «Знання», 1975. — 18 с.
5. *Выбор* способа изготовления литых электрошлаковых корпусов фланцевых задвижек высокого давления в коррозионно-стойком исполнении // М. А. Полищук, В. Л. Шевцов, Л. Г. Пузрин и др. // Современ. электрометаллургия. — 2009. — № 3. — С. 15–19.
6. *ГОСТ 10885–85.* Сталь листовая горячекатаная двухслойная коррозионно-стойкая. — Введ. 01.07.86.
7. *ГОСТ 6032–2003.* Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытаний на стойкость к межкристаллитной коррозии. — Введ. 05.12.2003.
8. *Гуляев А. П.* Металловедение. — М. Металлургия, 1986. — 542 с.
9. *ГОСТ 5639–82.* Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. — Введ. 01.01.1983.
10. *Чигал В.* Межкристаллитная коррозия нержавеющей стали. — Л.: Химия, 1969. — С. 62, 81–90.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 10.05.2012

## НОВАЯ КНИГА

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РЕНОВАЦИИ:

Тематическая подборка статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» в 2009–2011 гг. — Киев: Международная ассоциация «Сварка», 2012. — 172 с. Мягкий переплет, 200×290 мм.

Сборник включает 38 статей, опубликованных в журнале «Автоматическая сварка» за период 2009–2011 гг., по проблемам ремонта, восстановления и реновации изделий ответственного назначения. Авторами статей являются известные в Украине ученые и специалисты в области сварки, наплавки, упрочнения, металлизации и других технологий ревитализации.

Предназначен для научных сотрудников, инженеров, технологов, конструкторов и аспирантов, занимающихся проблемами сварки и других родственных технологий обработки материалов.

Стоимость сборника 160 грн /800 руб. (стоимость указана с учетом стоимости доставки заказной бандеролью соответственно для Украины и России).

#### Заказы на сборник просьба направлять:

Международная ассоциация «Сварка»

03680, г. Киев, ул. Боженко, 11, Украина

тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-54-84, 200-81-45

E-mail: journal@paton.kiev.ua

