

Е. С. АКЫЛБЕКОВ, А. О. БАЙКОНУРОВА, А. В. ЯРОВЧУК, Д. У. СМАГУЛОВ

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОТПУСКА НА МИКРОСТРУКТУРУ И ТВЕРДОСТЬ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОДОМ С ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИМ ПОКРЫТИЕМ

В последнее время для улучшения структуры и прочностных свойств сварных соединений в составы покрытий сварочных электродов вводят экзотермические смеси [1–3], что не только обеспечивает повышение стабильности дугового разряда, увеличение глубины проплавления основного металла, но и легирует сварной шов восстановленным из термитной смеси элементом [4]. При этом в сварном соединении возникают дополнительные напряжения, причиной которых является повышение градиента температуры на границе шва и околошовной зоны и формирова-

ние упрочняющих фаз на базе восстановленного из оксида элемента [5]. Для снятия структурных и термических напряжений сварную конструкцию подвергают высокотемпературному термическому отпуску [5, 6].

В настоящей работе приведены результаты исследований изменения структуры и твердости сварных швов в зависимости от температуры и времени отпуска теплоустойчивых сталей перлитного класса 15X1M5Ф после сварки электродами с экзотермическим покрытием. С этой целью были изготовлены сварочные электроды

Таблица 1. Составы покрытий электродов экзотермического и ЦЛ-27, вес. %

Электрод	Марка сварочной проволоки	Мрамор	Плави- ковый шпат	Рутил к - т	Ферро- марганец	Ферро- молиб- ден	Ферро- титан	Ферро- вана- дий	Ферро- ниобий	Полев. шпат	Пла- стифи- каторы	Термит- ная смесь (Al-Cr ₂ O ₃)
Экзотерм.	Св-08А	2,0-4,0	—	24,0-30,0	4,0	1,5-2,0	—	1,0	1,0	4,0	3-4	50
ЦЛ-27 [7]	Св-08ХМФБ	40,0-43,0	28,0	—	6,0	3,0	12,0	1,0	2,0	5,0	—	—

с покрытием рутилового типа, содержащие термитную смесь (Al – Cr₂O₃), 30 % рутилового концентрата, 4 % мрамора, 4 % ферромарганца, 1 % феррованадия, 1 % феррониобия, а также пластифицирующие компоненты (табл. 1). Стержнем электродов служила сварочная проволока марки Св-08А диаметром 4 мм. Сварку стальных пластин (сталь 15Х1М5Ф) толщиной 4 мм осуществляли в режиме постоянного тока величиной 160–180 А на прямой полярности. После сварки изделие помещали в среду с выбранной температурой отпуска и выдерживали в течение заданного промежутка времени. Температура отпуска была выбрана в диапазоне 993–1023 К с шагом в 10 градусов. Время отпуска варьировали от 15 мин до 2 ч. Качество сварного соединения оценивали по наличию или отсутствию трещин и по результатам испытаний на ударную вязкость, статический разрыв и твердость по Бринеллю (ГОСТ 6996, ГОСТ 9454, ГОСТ 14192-96) Для сравнения параллельно выполняли сварку пластин электродом марки ЦЛ-27, состав покрытия которого

приведен в табл. 1. В качестве металлического стержня в электродах ЦЛ-27 использовали легированную проволоку Св-08ХМФБ [7].

На рис. 1 приведены данные о влиянии режима отпуска сварного соединения на показатели твердости по Бринеллю. Из графика видна высокая чувствительность показателей твердости сварного соединения к скорости охлаждения металла.

Несмотря на одинаковый химический состав сварного шва, структура и свойства существенно изменяются в зависимости от времени и температуры отпуска. Сварное соединение имеет литую структуру. Как показали металлографические исследования, наиболее значительные структурные изменения наблюдаются в околошовной зоне. В результате высокотемпературного нагрева (выше точки А_{с3}) при сварке все карбиды, находящиеся в составе основного металла, в околошовной зоне переходят в твердый раствор.

Резкое охлаждение с температуры плавления, которое наблюдается при охлаждении шва на воздухе, способно вызвать высокую неоднородность как по составу, так и по микростроению. Обычно структура литых перлитных сталей состоит из обособленных и довольно крупных включений феррита и скоплений перлита. В связи с этим для выравнивания структуры и свойств наплавленного металла и основного наиболее приемлем режим высокого отпуска.

Отпуск изделий при сварке электродами марки ЦЛ-27 обычно проводят в интервале температур 680–720 °С. Ввиду низкого коэффициента перехода элементов из состава покрытий в качестве стержня применяют высоколегированную проволоку марки Св-08ХМФБ. При этом коэффициенты перехода элементов (ванадия, ниобия, молибдена) не достигают максимальных величин. В случае сварки экзотермическим электродом значительно повышаются коэффициенты усвоения ванадия и молибдена. В табл. 2 при-

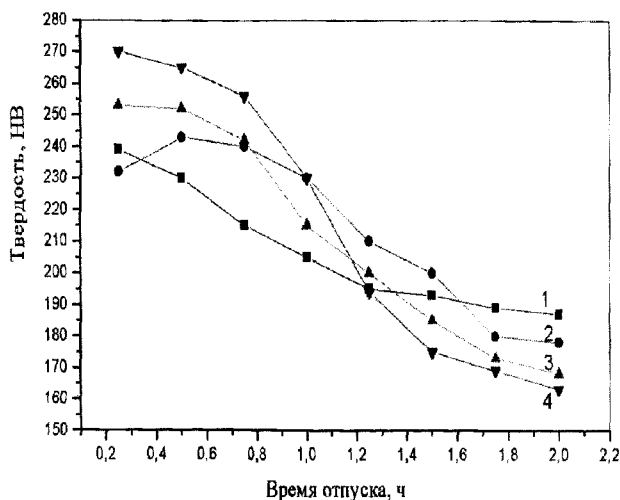


Рис. 1. Изменение твердости сварного соединения от температуры отпуска (К):
1 – 993; 2 – 1003; 3 – 1013; 4 – 1023

Таблица 2. Химический состав и механическая прочность сварного соединения стали 15X1M5Ф, полученного при сварке экзотермическими электродами и электродами марки ЦЛ-27

Показатели	Состав наплавленного металла, %							Предел прочности, $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Ударная вязкость, а, Дж/см ²	Твердость, НВ	α_n , г/Ач
	С	Mn	Si	Cr	Mo	V	Nb				
Экзотермический э-д	0,11-0,13	0,9-1,2	0,19-0,3	2,0-2,5	0,8-0,9	0,7-0,8	0,3				
Отпуск (К); 0,5 ч.											
993								370	–	230	
1003								450	5,0–6,0	243	8-9,5
1013								570	8,0–10,0	253	
1023								780	3,5	265	
1013 К; 0,8 ч.								630	15,5	240	
Марка ЦЛ-27 [7]	0,11-0,13	0,6-0,7	0,3-0,35	1,0-1,19	0,5-0,7	0,1-0,21	0,13-0,2	530-580	10,8	240	6-7

ведены данные о составах сварных соединений, выполненных экзотермическим электродом с нелегированной проволокой и электродом ЦЛ-27 с легированным стержнем. Видно, что наличие экзотермической смеси в покрытии электрода позволило получить более высокую насыщенность шва легирующими элементами: хромом, ванадием, молибденом. Металлографические исследования выявили равномерное распределение упрочняющих фаз в объеме шва при сварке электродом с экзотермической смесью в покрытии. Можно предположить, что это обусловлено поступлением дополнительного количества тепловой энергии в шов при развитии экзотермического синтеза. Механические испытания показали, что наблюдаются более высокие значения прочностных характеристик наплавленного металла при сварке экзотермическим электродом.

В процессе отпуска важную роль играет не только температура, но и время процесса. Полученные данные по твердости шва после отпуска при 993 К с достаточно высокой скоростью охлаждения позволили установить, что данный режим обработки обеспечивает невысокую твердость (см. рис. 1, кривая 1). Микроструктурные исследования свидетельствуют о проявлении высокой неоднородности структуры сформированного соединения, что способно вызвать высокую склонность его к образованию трещин.

На рис. 2, а приведена фотография структуры соединения после отпуска при 993 К. Структура шва смешанная и состоит из крупных областей бейнита, феррита и мартенсита, причем феррит-

ная составляющая обособлена и имеет довольно грубые очертания. Кое-где наблюдается видманштеттовая ориентация феррита. Известно, что степень неоднородности литых теплоустойчивых сталей при сварке очень высока [5]. Именно поэтому сравнительно низкие температуры и малое время отпуска не снимают ликвационные явления. Для максимального выравнивания концентрации легирующих элементов в объеме шва и релаксации остаточных напряжений необходимо либо увеличить время отпуска, либо повысить температуру. Как показали измерения, твердость соединения после отпуска во всем исследованном диапазоне выдержки при 993 К изменилась всего на 50 единиц, при этом показания минимальны. Наряду с низкими показателями прочности пластичность и ударная вязкость такого материала также небольшие. В табл. 2 приведены сведения по пределу прочности, твердости и ударной вязкости соединения. Видно, что наилучшие значения ударной вязкости получены после отпуска при 1013 К в течение 0,5–0,8 ч.

После отпуска при 1023 К с выдержкой 12 мин шов имеет максимальную твердость (см. рис. 1, кривая 4), однако ударная вязкость недостаточная. Для соединения характерны холодные трещины в околошовной зоне. Исследования микроструктуры шва позволили установить, что после отпуска при высокой температуре шов преимущественно состоит из мартенситной фазы (рис. 2, г). В этом случае различие в структуре основного и наплавленного металла вызывает появление высоких термических и структурных напряжений

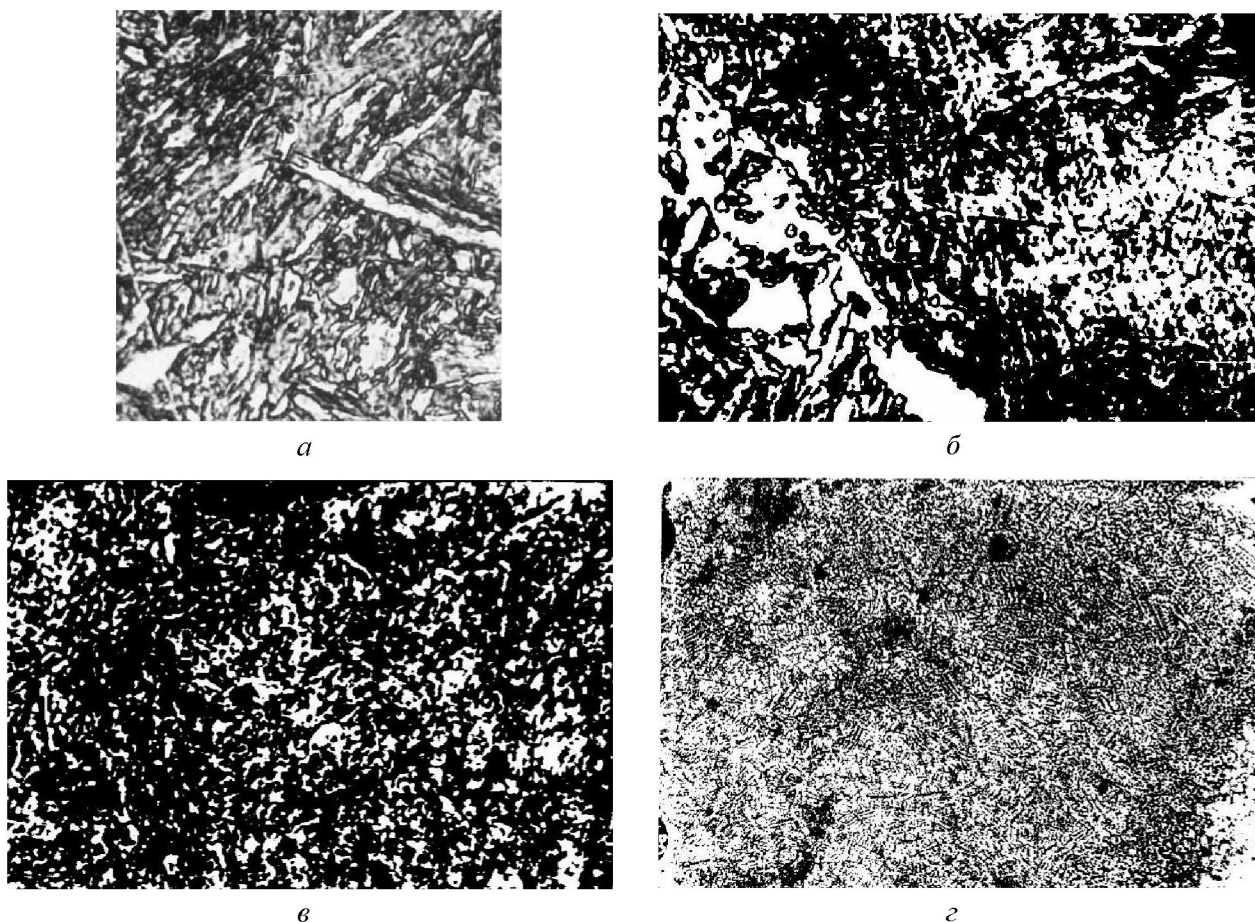


Рис. 2. Структура сварного соединения, выполненного экзотермическим электродом после отпуска: а – при 993 К в течение 1,4 часов; б – при 1003 К; в – при 1013; г – при 1023 К в течение 24–48 мин. $\times 500$

в околошовной зоне. Увеличение времени выдержки приводит к резкому падению твердости, что связано с провоцированием роста аустенитного зерна и изменением кинетики распада аустенита. Использование времени выдержки при высоком отпуске более 0,5 ч вызывает замедление превращения $\gamma \rightarrow \alpha'$, структура в результате представляет собой смесь мартенсита и крупнокристаллического бейнита. Такая структура тоже неоднородная, и вероятность появления холодных трещин в околошовной зоне очень высокая. Присутствие крупных пластин мартенсита с преимущественной ориентационной направленностью отрицательно сказывается на прочностных свойствах соединения. Видно, что использование отпуска конструкции при температуре 1023 К сопровождается резким снижением твердости шва с увеличением продолжительности отпуска. Уже при выдержке сварного соединения в течение 1,4 ч твердость упала на 35 % по сравнению со значением, полученным после отпуска

при той же температуре в течение 12 мин (см. рис. 1, кривая 4). Структурные составляющие имеют довольно крупные размеры, что определяет повышенный риск возникновения трещин в околошовной зоне при остывании шва (рис. 2, б).

Отпуск при 1003 К с выдержкой в течение 15 мин дает аналогичный рассмотренному выше эффект неоднородной структуры сварного шва. Увеличение времени выдержки до 36 мин вызывает повышение твердости материала шва до 240 НВ (см. рис. 1, кривая 1). При этом ударная вязкость, составляющая 5–6 Дж/см² (см. табл. 2), также недостаточна.

На рис. 2 приведены фотографии структуры сварного соединения после отпуска при различных температурах. Видно, что после отпуска с 993 и 1003 К структура крупнокристаллическая. На первом снимке отмечается наличие преимущественной направленности ферритной фазы, размеры отдельных ферритных составляющих достигали 150 мкм.

Отпуск при 1013 К в течение 24–48 мин позволяет получить довольно стабильную структуру, состоящую из перлита и мелкодисперсного мартенсита (рис. 2, в). Высокая дисперсность структуры обеспечивается присутствием карбидов ванадия, хрома и молибдена. Твердость шва при этом составляет 240–253 НВ, ударная вязкость – 8,0–15,5 Дж/см². Как видно из полученных результатов, данный режим термической обработки сварного соединения наиболее приемлем.

Сравнение режимов отпуска сварных соединений, выполненных экзотермическим электродом и электродом марки ЦЛ-27, показало, что при использовании электродов с экзотермической смесью в покрытии необходимо использовать повышенный температурный режим. Можно предположить, что это обусловлено более высокой насыщенностью сварного соединения карбидными фазами и более высокими температурами сварочной ванны. В результате термической обработки в найденном режиме удается достичь хорошего сочетания значений прочности, ударной вязкости и твердости.

Таким образом, использование экзотермической смеси в покрытии электрода позволяет получить сварной шов, соответствующий по химическому составу соединению, типичному для теплоустойчивых сталей. Использование экзотермических смесей в составе покрытия сварочного электрода позволяет применять в качестве электродного стержня нелегированную сварочную проволоку Св-08А, что дает ощутимый экономический эффект и способствует повышению коэффициентов усвоения легирующих элементов швом. Высокий отпуск при 1013 К в течение 24–48 мин обеспечивает формирование сравнительно однородной структуры шва, повышает ударную вязкость и снижает вероятность образования холодных трещин.

Исходя из изложенного можно сделать следующие выводы:

сварка теплоустойчивых сталей электродами с экзотермической смесью в покрытии позволяет получить качественное сварное соединение с высокими механическими характеристиками;

наличие экзотермической смеси в покрытии повышает коэффициенты перехода легирующих элементов в шов и обеспечивает более равномерное распределение упрочняющих фаз в объеме соединения;

осуществленный подбор режима термической обработки сварной конструкции, полученной

экзотермическим электродом, заключающийся в высоком отпуске при 1013 К в течение 0,8 ч, обеспечивает твердость соединения 240 НВ и ударную вязкость 15,5 Дж/см², снижает вероятность образования трещин в околошовной зоне, обеспечивает перлитно-мартенситную структуру.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпенко В.М., Власов А.Ф., Билик Г.Б. Показатели плавления сварочных электродов с экзотермической смесью в покрытии // Сварочное производство. 1980. № 9. С. 23-25.
2. Потапов М. Г., Левашов Е. А., Шалота В. И., Кожарский С. П. Применение модифицированных СВС-электродов для электроискрового легирования материалов // Сварочное производство. 1997. № 12. С. 30-31.
3. Акылбеков Е.С., Смагулов Д.У., Байконурова А.О., Яровчук А.В., Хасанова Р.А. Металлургия сварки электродами рутилового типа при введении в покрытия экзотермической смеси (Al-Cr₂O₃) // Труды международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в металлургии», 2-3 октября 2003 г. Темиртау, 2003. С. 61.
4. Яровчук А.В., Ксандопуло Г.И. Особенности легирования наплавленного металла при сварке электродами с экзотермической смесью в покрытии // Автоматическая сварка. 1997. № 7. С. 8–13.
5. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. М.: Машиностроение, 1981. С. 248.
6. Козлов Р.А. Сварка теплоустойчивых сталей. Л.: Машиностроение, 1996. 160 с.
7. Герман С.И. Электродуговая сварка теплоустойчивых сталей перлитного класса. М.: Машиностроение, 1972. 202 с.

Резюме

Экзотермиялық қоспалы (Al-Cr₂O₃) электродпен жылу тұрақты болған құрылымды пісіру кезінде жікпен қоспалау элементтердің игерілу коэффициенттерінің жоғарылау әсері алынды, бұл жік аумағындағы аймақта суық сызаттың пайда болу ықтималдығын төмендететін пісіру құрылымының термиялық өңделеу режимін іріктеуді жүргізуді талап етті. Жұмыста босату режимінің жік аумағындағы аймаққа және пісірме қосылыстың микроқұрылымына әсері бойынша зертеулер нәтижелері келтірілген.

Summary

It has been proved that welding heat-resisting steel structures using electrodes containing heat-producing mixtures (Al-Cr₂O₃) gives noticeably higher factors of recovery of alloying elements by the weld. The research was held on the basis of selecting a welded structure heat treatment mode that would reduce probability of cold cracks in the zone adjacent to the weld. This article describes the results of the research as to the effect the tempering mode may have on the temper of the zone adjacent to the weld and on the weld microstructure.

УДК 621.791.75:539.14

Казахский национальный технический университет им. К.И. Сатпаева,
г. Алматы

Поступила 28.03.06г.