

УДК 621.791: 621.311.2

А.К. ЦАРЮК, канд. техн. наук, В.Ю. СКУЛЬСКИЙ, канд. техн. наук, С.И. МОРАВЕЦКИЙ
(Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев)

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОУСТОЙЧИВОЙ СТАЛИ С 9% ХРОМА ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Для высокотемпературных узлов энергоблоков ТЭС, работающих на паре со сверхкритическими параметрами, применяется новая теплоустойчивая сталь с 9% хрома. Рассмотрены механические свойства, температуры фазовых переходов и структура этой стали. Приведены свойства сварных соединений стали с 9% хрома, полученных с использованием сварочных материалов, разработанных ИЭС НАН Украины им. Е.О. Патона.

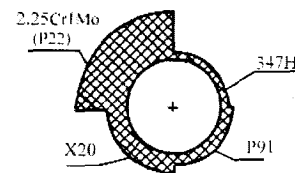
Современное котельное оборудование пылеугольных энергоблоков ТЭС требует качественного конструкционного и технологического усовершенствования, что обусловлено необходимостью использования высокозольных углей (до 50-60%), уменьшения вредных выбросов (моно- и диоксида углерода, оксидов азота и серы) в окружающую среду, а также повышения КПД самих блоков. Этим требованиям в большой степени отвечают методы сжигания топлива в циркулирующем кипящем слое с системами серо- и азотоочистки дымовых газов. Котлоагрегаты нового поколения должны работать в условиях, обеспечивающих более полное сжигание различных фракций топлива и исключение интенсивного окисления азота (оптимальные температуры составляют ~1327...1427°С) при повышении рабочих параметров теплоносителя (температуры T – до ~600°С, давления P – до 30 МПа) в трубных системах [1-6]. Коэффициент полезного действия (КПД) новых энергоблоков может достигать 45%, тогда как КПД действующих энергоустановок не превышает 36% [4-6].

Указанные параметры пара в паропроводных системах превышают максимально допустимые (критические) условия эксплуатации труб из применяемых до настоящего времени теплоустойчивых сталей (например, для стали 15X1M1Ф: $T \sim 833$ К (560°С), $P \leq 25,5$ МПа). Для трубопроводов, работающих под воздействием пара со сверхкритическими параметрами, за рубежом освоено производство новой сложнлегированной теплоустойчивой стали Р91 (X10CrMoVNb91), в которой содержание хрома увеличено до ~9 мас. % [4-11]. В настоящее время эта сталь признана в мире как новый высокофункциональный материал, предназначенный для работы при температурах от 833 К (560°С) до 873К (600°С). Сталь обладает большей длительной прочностью, чем ранее применявшиеся мате-

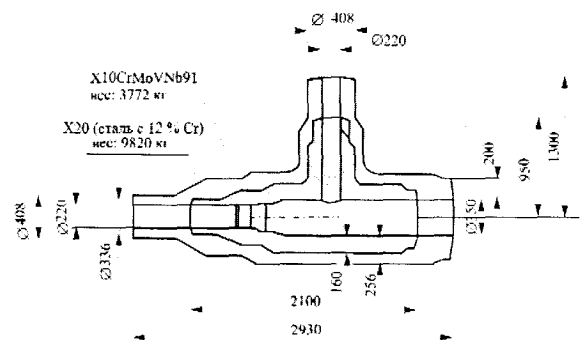
риалы, что позволяет повысить рабочие режимы пара при одновременном снижении толщины стенок труб и массы высокотемпературных компонентов котлоагрегатов (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1

| Сталь | Стандарт на сталь, страна | Допустимые параметры пара ТР | Длительная прочность при 600°С за 10 ⁵ ч., МПа |
|---------------------------------|--|------------------------------|---|
| 10CrMo910 (2.25Cr-1Mo) | DIN 17175 (Германия) ASTM A-533 (США) | 545°С / 28 МПа | 60 |
| 12X1MФ 11MoV63 15128CrMoV | ТУ 14-3-316-78 (СНГ) DIN 17175 (Германия) N415128 (Чехия, Словакия) | 550°С / 25 МПа | 60 |
| 15X1M1Ф 15CrMoV510 | ТУ 14-316-75 (СНГ) Vd15V-Wb506 (Германия) | 550°С / 25,5 МПа | 70 |
| X20CrMoV121 (12Cr-MoV) | DIN 17175 (Германия) | 560°С / 20 МПа | 70 |
| X10CrMoVNb91 (Р91 с 9% Cr) | ASTM A-530 (Германия) | 585-600°С / 27 МПа | 90...100 |



Изменение толщины паропровода в зависимости от марки стали [11]



Изменение размеров и массы парового фильтра при замене стали X20 (0,2C12CrMoV) на сталь P91 [6]

Рис. 1

Отметим, что по длительной прочности сталь Р91 уступает аустенитным сталям, применение которых позволяет еще больше уменьшить толщину трубной стенки (например, из аустенитной стали 347Н на рис. 1). Однако, аустенитные стали, по сравнению с обычными теплоустойчивыми сталями, обладают рядом недостатков (меньшей теплопроводностью, большей теплоемкостью и коэффициентом теплового расширения, склонностью к образованию горячих трещин, непригодностью к ультразвуковому и магнитному видам неразрушающего контроля, высокой стоимостью). Это делает их нетехнологичными и значительно усложняет создание трубных систем энергоблоков.

В настоящей работе представлены результаты изучения физико-механических свойств стали и ее сварных соединений, полученных по разработанной в ИЭС им. Е.О. Патона технологии автоматической сварки под флюсом.

В качестве основного металла использована трубная сталь X10CrMoVNb91 производства фирмы Mannesmann, химический состав которой в сопоставлении со стандартизованными пределами легирования стали Р91 представлен в табл. 2.

На основании исследования фазовых превращений при охлаждении от высоких температур (1573 К (1300°C)) установлено, что сталь Р91 обладает склонностью к закалке с образованием чисто мартенситной структуры с высокой твердостью (на уровне ~470 НВ5). Закалка стали происходит в широком диапазоне скоростей охлаждения в естественных условиях остывания на воздухе без применения специальных охлаждающих сред при температуре $M_s = 653$ К (380°C). Критическая температура, перегрев выше которой приводит при последующем охлаждении к образованию закалочной структуры, составляет $A_{c1} = 1078...1083$ К (805...810°C). Выше 1573 К (1480°C) сталь переходит в жидкое состояние.

Из представленных результатов следует, что в сварных соединениях стали Р91 прилежащий ко

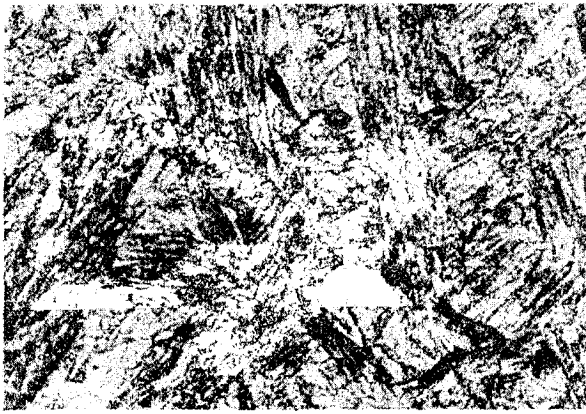
шву металл зоны термического влияния (ЗТВ), нагреваемый до температур выше A_{c1} , и сам шов (аналогичного легирования) в процессе сварки будут претерпевать закалку. В таком состоянии металл проявляет склонность к образованию холодных трещин, что требует применения предварительного и сопутствующего многопроходному сварочному процессу подогрева свариваемой стали. Данная мера направлена на замедление остывания металла в зоне сварки и обеспечение прохождения в нем металлургических изменений, способствующих снижению предрасположенности сварных соединений к трещинообразованию. После сварки обязательно требуется выполнение высокого отпуска при температурах ниже A_{c1} . Обычно применяется температура 1023...1033 К (750...760°C).

Высокая длительная прочность стали Р91 (~90 МПа при $T = 873$ К (600°C) за 10^5 ч) обеспечивается за счет реализации механизмов упрочнения кристаллической решетки легирующими элементами и микродисперсными фазами. Дисперсные карбидные и карбонитридные частицы образуются на стадии отпуска предварительно нормализованной – закаленной на воздухе – стали (рис. 2а) и располагаются по границам первичных аустенитных зерен и в теле зерна вдоль мартенситных реек (рис. 2б). Предполагается возможным также образование мелких тугоплавких нитридных частиц на стадии кристаллизации стали.

В состоянии поставки (после нормализации от 1313...1353 К (1040... 1080°C) и отпуска) сталь имеет механические свойства (временное сопротивление $\sigma_a = 696$ МПа, предел текучести $\sigma_{0,2} = 548$ МПа, относительное удлинение $\delta = 21,6\%$, относительное сужение $\psi = 72,6\%$), обеспечивающие ее достаточно высокую прочность и технологичность при операциях механической обработки (резании, сверлении, гибке). Металл при комнатной и пониженных температурах весьма вязкий ($KCV = 220$ Дж/см², $KCV_{273(0)} = 171$ Дж/см²).

Таблица 2

| Массовая доля элементов, % | | | | | | | | | | |
|---|---------|-----------|---------|---------|---------|-----------|----------|-----------|----------|-------|
| C | Cr | Mo | Si | Mn | Ni | V | Nb | N | S | P |
| Стандартизованное легирование стали Р91 | | | | | | | | | | |
| 0,06-0,12 | 8,0-9,5 | 0,85-1,05 | 0,2-0,5 | 0,3-0,6 | 0,1-0,4 | 0,18-0,25 | 0,06-0,1 | 0,03-0,07 | не более | |
| | | | | | | | | | 0,02 | 0,02 |
| Состав исследуемой стали | | | | | | | | | | |
| 0,085 | 8,85 | 1,0 | 0,33 | 0,43 | 0,12 | 0,25 | 0,069 | 0,045 | 0,015 | 0,013 |



x1600 а



x2000 б

Рис. 2. Микроструктура сталі Р91 в стані закалки (а, x1600) і отпуску (б, x2000)

Характер изменения ударной вязкости стали от температуры представлен на рис. 3. Как видно из показанной зависимости, допустимый уровень минимальной ударной вязкости $KCV\ 50\ \text{Дж/см}^2$, устанавливаемый для ряда теплоустойчивых сталей, соответствует температуре приблизительно равной $(-15...-17)^\circ\text{C}$, что значительно расширяет диапазон температур выполнения возможных технологических операций с этой сталью и изделиями из нее.

Вместе с тем, характерная для данной стали реакция на сварочный термический цикл, проявляющаяся в неизбежной закалке металла швов и ЗТВ и опасности хрупкого разрушения сварных соединений, переводит ее в разряд трудносвариваемых материалов и обуславливает определенные технологические сложности при сварке.

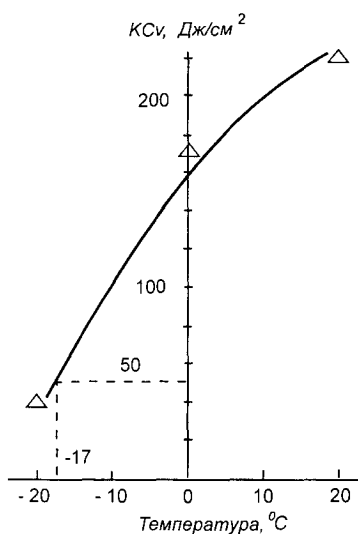


Рис. 3

При разработке процесса сварки стали Р91 предусматривалось выполнение следующих условий:

1. Для обеспечения однородности в уровне физико-механических свойств сварных соединений при эксплуатации в условиях ползучести металл швов должен иметь систему легирования, аналогичную свариваемой стали.

2. Сварные соединения должны удовлетворять предъявляемым требованиям (обычно используются международные нормы DIN 32252) к уровню механических свойств: $\sigma_B = 585...850\ \text{МПа}$, $\sigma_{0,2} \geq 415\ \text{МПа}$, $\delta \geq 17\ \%$, ударная вязкость металла шва $KCV \geq 51\ \text{Дж/см}^2$, (относительное сужение ψ не регламентируется).

3. Образование холодных трещин при сварке должно исключаться.

Как показывает практика, при сварке подобных сталей определенные сложности возникают при обеспечении регламентируемого уровня ударной вязкости металла швов. Этот показатель является весьма чувствительным к структурному состоянию металла и присутствию в нем неметаллических включений (НВ) – обычно сульфидов и оксидов металлических компонентов, сформировавшихся за счет кислорода, вносимого в сварочную ванну из сварочных материалов. Для снижения количества НВ в швах сварочные материалы (в данном случае – сварочный флюс) должны иметь минимальную окислительную способность по отношению к металлам в составе сварочной проволоки и стали. С этой целью при сварке теплоустойчивых сталей обычно применяют нейтральные – так называемые "основные" флюсы. Для повышения стойкости против образования холодных трещин в сварных соединени-

ях и предотвращения развития повреждений в швах в процессе высокотемпературной ползучести сварочные материалы должны также обеспечивать низкий переход в сварочную ванну водорода и вредных примесей (серы, фосфора).

Рассмотренным металлургическим требованиям удовлетворяют разработанные в ИЭС им. Е.О. Патона порошковая проволока и флюс, предназначенные для автоматической сварки стали типа Р91 с 9% хрома. Сварочный флюс относится к категории высокоосновных флюсов и изготавливается по технологии твердофазного синтеза при высокотемпературном спекании исходных порошкообразных компонентов [12, 13]. Низкое содержание примесей и влаги – как источника водорода – достигается благодаря применению чистых исходных компонентов и сухой грануляции флюса после спекания. Химический состав металла, наплавленного с использованием разработанного сочетания **порошковая проволока-флюс**, приведен в табл. 3. Подобное легирование обеспечивают также сварочные материалы, разрабатываемые зарубежными производителями (для примера в табл. 3 представлен состав металла, наплавленного материалами фирм Böhler (Австрия) и Esab (Швеция)).

При использовании разработанных в ИЭС материалов швы имеют низкое содержание неметаллических включений (НВ), близкое к их количеству в стали. Так, объемная доля НВ в швах составляет 0,194%, в стали – 0,101%. При этом достигается соответствие показателей механических свойств металла швов действующим международным нормам (табл. 4). Швы имеют более высокую прочность, чем основной металл; при испытании поперечных образцов разруше-

ние, как правило, происходит по основному металлу на некотором удалении от шва. Испытания выполнены после высокотемпературного отпуска сварных соединений при 760°C в течение 2 ч.

Как отмечалось выше, проблема образования холодных трещин может быть решена за счет применения предварительного и сопутствующего подогрева при уменьшении содержания влаги в сварочных материалах и соответствующем снижении перехода в шов водорода. При использовании разработанной композиции проволока – флюс количество диффузионного водорода в наплавленном металле невелико и составляет ~0,22 см³ в 100 г металла (данный показатель получен при спиртовом анализе содержания водорода в "карандашных" пробах, наплавленных в медный водоохлаждаемый кокиль). При отработке тепловых режимов сварки стали Р91 установлено, что высокая стойкость сварных соединений против образования холодных трещин достигается при скоростях охлаждения металла ЗТВ в диапазоне 600...500°C не более ~10°C/с. При этом трещиностойкость обеспечивается при использовании предварительного/сопутствующего подогрева в диапазоне 200...300°C.

В качестве заключения можно отметить следующее. Благодаря комплексному легированию Cr, Mo, V, Nb и относительно низкому содержанию углерода и вредных примесей новая сталь с 9% хрома обладает высокими физико-механическими свойствами, в том числе – более высокой длительной прочностью по сравнению с ранее используемыми теплоустойчивыми сталями. Сталь склонна к закалке, что создает опасность образо-

Таблица 4

| Механические свойства металла шва | | | | |
|---|----------------------|--------------|------------|-------------------------|
| σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | ψ , % | KCV, Дж/см ² |
| 709 | 600 | 21,7 | 52,4 | 121 |
| Механические свойства сварного соединения | | | | |
| 646 | - | 68,8 | - | - |

Таблица 3

| Массовая доля элементов в наплавленном металле, % | | | | | | | | | | |
|--|-----|-----|------|-----|------|------|-------|-------|-------|-------|
| C | Cr | Mo | Si | Mn | Ni | V | Nb | N | S | P |
| Порошковая проволока, флюс ИЭС | | | | | | | | | | |
| 0,07 | 8,5 | 0,8 | 0,28 | 0,8 | 0,65 | 0,20 | 0,057 | 0,048 | 0,009 | 0,019 |
| Проволока (сплошная) C9MV-UP, флюс ВВ 910 фирмы Böhler | | | | | | | | | | |
| 0,11 | 9,0 | 1,0 | 0,3 | 0,7 | 0,7 | 0,2 | 0,05 | - | - | - |
| Порошковая проволока ОК-Tubrod 15.23 S, флюса ОК-FLUX 10.63 фирмы ESAB | | | | | | | | | | |
| 0,10 | 9,0 | 1,0 | 0,3 | 1,0 | 0,5 | 0,2 | 0,05 | 0,04 | - | - |

вания холодных трещин при ее сварке. Показано, что следование принципам обеспечения пониженного перехода из сварочных материалов в шов кислорода, водорода, примесей серы и фосфора при идентичности системы легирования швов и стали, а также применение предварительного подогрева в интервале 200...300°С в сочета-

нии с послесварочным высоким отпуском позволяют получить качественные сварные соединения с удовлетворительными свойствами металла швов. Разработанные материалы и технология сварки могут применяться при ремонте и реконструкции энергетических блоков тепловых электростанций.

1. Ольховский Г. Технологии для тепловых электростанций // Газотурбинные технологии. – 1999. – № 2. – С. 4-7.
2. Организация горения в низкоэмиссионной камере сгорания ГТУ АЛ-13СТ / В. М. Чепкин, Е. Ю. Марчуков, В. В. Курпик, С. А. Федоров. – Газотурбинные технологии. – 1999. – № 2. – С. 14-17.
3. Гастайгер Г., Стамателопулос Г.- Н. Угольные электростанции – современный уровень техники и перспективы развития на будущее // Черные металлы. – 2002. – № 10. – С. 26 – 35.
4. The Success of New Material // Mannesmann Rohr. Reprint from "Report" Issue S28/29. – 5 p.
5. Welding on new types of steel for power plant construction/ W. Adam, W. Mischok, G. Wellnitz et al. // Welding and Cutting: Welding Conference in Bremen (28th-30th September 1994) – Böhler Welding, Special Edition, 1994. – 11 p.
6. Current and Future Use of the 9 % Cr Steel X10 CrMoVNb 9 1 for Power Plant Applications // W. Arnswald, B. Kempkes, G. Wellnitz, M. Zschau / VGB Kraftwerkstechnik. Separate print from English issue. – 73, N3. – 1994. – P.203-208.
7. Hennhoffer K., Jakobova A. Properties of Welded Joints in 9 % Cr Creep Resistant Steel // Zvaranie-Svarovani (Welding). – 1999. – 48, № 11. – P.106 – 108.
8. Use of P91 in Europe and overseas / W. Bendick, K. Ullmann, K. Harmann, M. Zschau // ASME Joint International Power Generation Conference, Phoenix, Az., (October 2-6, 1994). – ASME, 94-IPGC-PWR-35, 1994. – 6 p.
9. Haarmann K. New Material Grades for Tubing and Piping as Replacement of T22 and P22// Power-Gen '95 – Asia: Mannesmann Workshop (Sept. 29, 1995, Singapur) – Mannesmann Rohr, 1995. – 13 p.
10. Hiroaki Kawasaki, Takaaki Toyooka, Mitsuo Kimura. High Performance Tube and Pipe Contributing to Preservation of the Global Environment // Kawasaki Steel Tech. Rep. – 2001. – № 44. – P. 92 – 101.
11. Bergquist E.-L. Consumables and Welding Modified 9Cr-1Mo Steel // Svetsaren. -1999. – 54, № 1-2. – P. 22 – 25.
12. Синтетические сварочные флюсы: изготовление и область применения / Б. С. Касаткин, А. К. Царюк, Ю. Н. Вахнин и др. // Автомат. сварка. – 1994. – №3. – С. 62-66
13. А. с. 1620255 СССР, МКИЗ В 23 К 35 / 40 Способ изготовления синтетического флюса для дуговой сварки / Б. С. Касаткин, Л. М. Лобанов, В. П. Логинов и др. – Оpubл. 15.01.91; Бюл. №2.