

# ПРИСАДОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ С 9 % ХРОМА\*

**В. Ю. СКУЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук, **С. И. МОРАВЕЦКИЙ**, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Описаны разработанные присадочные материалы для механизированной сварки под флюсом теплоустойчивой стали с 9 мас. % хрома. Показано, что механические свойства металла шва и сварных соединений указанной стали, полученных с использованием предложенных сварочных материалов, соответствуют установленным требованиям.

*Ключевые слова:* дуговая сварка под флюсом, теплоустойчивые стали, сварные соединения, мартенситная структура, порошковая проволока, высокоосновный флюс, механические свойства

В последние годы в энергомашиностроении увеличилось применение новых теплоустойчивых сталей мартенситного класса с массовой долей хрома 9 %, предназначенных для изготовления высокотемпературных узлов энергоблоков ТЭС [1, 2]. Их использование позволяет повысить рабочие параметры пара — температуру  $T$  до 610 °С и давление  $P$  до 25...30 МПа. При этом коэффициент полезного действия (КПД) энергоблоков может достигать 45 %.

Для традиционно используемых в теплоэнергетике сталей (12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 20ХМФЛ) предельные (критические) значения рабочих параметров пара не превышают  $T = 565$  °С и  $P = 24$  МПа при КПД до 36 %, что исключает их применение в высокотемпературных узлах установок нового поколения со сверхкритическими параметрами. В условиях исчерпания проектного ресурса фактические значения рабочих параметров снижаются ниже допустимых пределов, что приводит к понижению КПД, неэффективному использованию топлива и увеличению количества вредных атмосферных выбросов. Вследствие этого возникла необходимость в замене отработавшего энергооборудования в Украине новым, более совершенным. При этом особую актуальность приобретает проблема разработки отечественных сварочных материалов для сварки теплоустойчивых сталей с 9 мас. % хрома (типа стали Р91), имеющих следующий химический состав, мас. %: 0,06...0,12 С; 8,0...9,5 Cr; 0,85...1,05 Мо; 0,2...0,5 Si; 0,3...0,6 Mn; 0,1...0,4 Ni; 0,18...0,25 V; 0,06...0,10 Nb; 0,03...0,07 N; не более 0,02 S и P.

К сварным соединениям трубопроводов и толстостенного корпусного оборудования в энергомашиностроении

предъявляются высокие требования относительно качества сварных швов, показателей физико-механических свойств их металла, его стойкости против образования холодных трещин. При этом необходимо также обеспечить в наплавленном металле минимальную степень загрязненности неметаллическими включениями и максимально низкие содержания диффузионного водорода и вредных примесей.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона разработана система флюс-порошковая проволока (типа ПП-08Х9НМАФБ), позволяющая с помощью автоматизированной сварки под флюсом получать сварные соединения стали с 9 мас. % хрома, имеющие прочностные свойства не ниже основного металла. Применяемый высокоосновный флюс изготавливается способом, базирующимся на твердофазном синтезе исходных шихтовых компонентов [3]. Основу шихты составляют оксиды различных металлов и фторид кальция, образующие шлаковую систему  $MgO-CaF_2-Al_2O_3-SiO_2$ . Флюсу, разработанному для сварки сталей с 9 мас. % хрома, была присвоена марка СФТ-9.

Для оценки химического состава наплавленного металла, полученного с применением разработанных сварочных материалов, и определения его механических характеристик сваривали стыковые соединения пластин толщиной 16 мм с V-образной разделкой кромок. Сварку проводили с предварительным подогревом до 250 °С на режиме, приведенном в табл. 1. Свариваемая сталь соответствовала следующему составу, мас. %: 0,085 С; 8,85 Cr; 1,0 Мо; 0,33 Si; 0,43 Mn; 0,12 Ni; 0,25 V; 0,069 Nb; 0,045 N; 0,015 S; 0,013 P.

Сварные соединения подвергали послесварочной термообработке (высокий отпуск при 760 °С

**Таблица 1. Режим сварки стыковых соединений стали с 9 мас. % хрома\***

№ прохода	Способ сварки	$I_{св}$ , А	$U_{д}$ , В	$v_{св}$ , м/ч
1 (корневой)	Ручная неплавящимся электродом в аргоне	90	13	—
2–3	Автоматическая под флюсом	240...280	40...42	24,6
4–8		290...320	40...42	21,7

\* Диаметр присадочной и электродной проволоки составлял 2 мм.

\* По материалам доклада, заслушанного на III Международной конференции по сварочным материалам стран СНГ (г. Днепропетровск, 1–4 июня 2004 г.).



Таблица 2. Химический состав наплавленного металла, мас. %\*

Сварочные материалы (порошковая проволока + флюс)	C	Cr	Mo	Si	Mn	Ni	V	Nb	N	S	P
ПП-08X9HMAФБ + флюс СФТ-9	0,07	8,5	0,8	0,28	0,8	0,65	0,20	0,057	0,048	0,009	0,019
С9MV-UP + флюс ВВ910	0,11	9,0	1,0	0,3	0,7	0,7	0,2	0,05	—	—	—
OK-Tubrod 15.23 S + флюс OK-FLUX 10.63	0,10	9,0	1,0	0,3	1,0	0,5	0,2	0,05	0,04	—	—

\* Два последних химических состава взяты из каталогов-справочников соответственно фирм Böhler и ESAB.

Таблица 3. Результаты механических испытаний при  $T = 20^\circ\text{C}$ 

Объект исследования	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	$KCV_{1,2}$ Дж/см <sup>2</sup>
Металл шва	709	600	17,7	52,4	$\frac{46,0...69,5}{57,0}$
Металл сварного соединения	641...652*	—	—	69,7...67,8	$\frac{138...177}{164}^{**}$
Основной металл	696	547	21,6	72,7	$\frac{217...224}{220}$
Требования по DIN 32525 [4]					
Металл шва	585...850	$\geq 415$	$\geq 17$	—	$\geq 51$

\* место разрушения образцов — основной металл на расстоянии 4...5 мм от линии сплавления. \*\* надрез по линии сплавления.

в течение 2 ч). После чего из металла сварного соединения вырезали образцы для механических испытаний по ГОСТ 6996-66 и шлифы для металлографических исследований.

В табл. 2 представлен химический состав наплавленного металла, полученного с использованием сварочных материалов с 9 мас. % хрома. Как видно из таблицы, разработанные сварочные материалы обеспечивают химический состав наплавленного металла практически такой же, как у сварочных материалов других производителей.

Содержание остаточных газов в металле шва следующее, мас. %: 0,042 [O]; 0,00035 [H]. Концентрация диффузионного водорода, определенная спиртовым методом [5] при выдержке проб в течение 24 ч, составила 0,22 см<sup>3</sup>/100 г наплавленного металла.

Как показал металлографический анализ, в наплавленном металле имеются неметаллические включения оксидного, оксисульфидного и силикатного типов, а также весьма мелкодисперсные нитриды. Относительная доля  $S$  неметаллических включений различных размеров  $d$  в наплавленном

металле, полученном с использованием разработанной системы проволока-флюс, представлена ниже:

$d$ , мкм	0,5...1,0	1,0...1,5	1,5...2,0	2,0...2,5	2,5...3,0	3,0...4,0
$S$ , мас. %	26,90	49,08	17,25	4,93	1,23	0,62

При этом общая объемная доля неметаллических включений составляет в металле шва 0,194, а в основном — 0,101. Из приведенных данных следует, что в металле шва преобладают мелкие ( $d = 0,5...1,5$  мкм) неметаллические включения.

Результаты механических испытаний, представленные в табл. 3, свидетельствуют о том, что показатели прочности и пластичности удовлетворяют требованиям, предъявляемым к сварным соединениям стали типа P91.

Таким образом, определено, что сварные соединения новых теплоустойчивых сталей мартенситного класса с массовой долей хрома 9 %, выполненные механизированной сваркой под синтетическим флюсом в сочетании с предлагаемой порошковой проволокой, отличаются высоким качеством и имеют требуемые механические свойства. При этом наплавленный металл характеризуется невысоким содержанием вредных примесей (менее 0,02 мас. % серы и фосфора), достаточной степенью чистоты по неметаллическим включениям (общая объемная доля 0,192 %) и низкой концентрацией диффузионного водорода (менее 1 см<sup>3</sup>/100 г наплавленного металла).

1. Ольховский Г. Технологии для тепловых электростанций // Газотурбин. технологии. — 1999. — № 2. — С. 4-7.
2. Скульский В. Ю., Царюк А. К. Проблемы выбора свариваемой стали для высокотемпературных компонентов энергоблоков ТЭС // Автомат. сварка. — 2004. — № 3. — С. 3-7.
3. Синтетические сварочные флюсы: изготовление и область применения / Б. С. Касаткин, А. К. Царюк, Ю. Н. Вахнин и др. // Там же. — 1994. — № 3. — С. 62-66.
4. Filler metals for the steel X10CrMoVNb91 W.-Nr.I.4903 and grade P91/T91 according to ASTM/ASME: Böhler welding. Product Informations. — Düsseldorf: Böhler Schweisstechnik GmbH, 1993. — 16 S.
5. Козлов Р. А. Сварка теплоустойчивых сталей. — Л.: Машиностроение, 1986. — 160 с.

Developed welding consumables for the mechanized submerged arc welding of heat-resistant steel with 9 % Cr are described. It is shown that mechanical properties of weld metal and welded joints of the mentioned steel produced using the above-mentioned consumables are in compliance with the established requirements.

Поступила в редакцию 27.12.2004