

А.И. Ковтунов
С.В. Мямин



МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ СВАРКИ

Практикум

Тольятти
Издательство ТГУ
2013

Министерство образования и науки Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Институт машиностроения
Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением
и родственные процессы»

А.И. Ковтунов, С.В. Мямин

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ СВАРКИ

Практикум

Тольятти
Издательство ТГУ
2013

УДК 621.791(075.8)

ББК 30.61я73

К568

Рецензенты:

заместитель начальника управления лабораторно-испытательных работ ОАО «АВТОВАЗ» *А.Н. Чернышев*;

д-р техн. наук, профессор Тольяттинского государственного университета *Б.Н. Перевезенцев*.

К568 Ковтунов, А.И. Материаловедение сварки : практикум / А.И. Ковтунов, С.В. Мямин. — Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. — 32 с. : обл.

Практикум направлен на изучение взаимосвязи между структурой и свойствами сварных соединений, влияния легирующих элементов на свойства сварных соединений.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки (специальности) 150700.62 «Машиностроение», профиль «Оборудование и технология сварочного производства».

УДК 621.791(075.8)

ББК 30.61я73

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», 2013

Введение

Практикум по курсу «Материаловедение сварки» предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки (специальности) 150700.62 «Машиностроение», профиль «Оборудование и технология сварочного производства», и состоит из трех лабораторных работ, рассчитанных на 4 академических часа.

В процессе выполнения работ студенты определяют влияние углерода и легирующих элементов на структуру, механические и технологические свойства сварных соединений, знакомятся с режимами и условиями сварки теплоустойчивых и высоколегированных хромистых сталей, а также режимами термической обработки сварных соединений.

Лабораторная работа 1

Влияние углерода на свариваемость сталей

Цель работы — изучить влияние углерода на структуру и свойства сварных соединений из углеродистых сталей.

Краткие теоретические сведения

Свариваемость — это совокупность технологических характеристик основного металла, определяющих его реакцию на изменения, которые происходят при сварке, и способность при определенном технологическом процессе обеспечивать надежное в эксплуатации сварное соединение.

В зависимости от марки стали и условий эксплуатации сварной конструкции изменяется и совокупность показателей, определяющих свариваемость. К числу показателей, по которым оценивается свариваемость низко- и среднелегированных сталей, относятся сопротивление образованию горячих и холодных трещин в шве, стойкость к образованию трещин и закалочных структур в околошовной зоне и переходу в хрупкое состояние, необходимый уровень механических свойств характерных участков и соединения в целом, обеспечение специальных свойств при высоких и низких температурах. Чем выше прочность стали и сложнее условия эксплуатации сварной конструкции, тем больше показателей, характеризующих свариваемость.

Свариваемость оценивают не по абсолютным значениям величин, характеризующих свойства шва, а по их относительным значениям по сравнению со свойствами основного металла. Результаты испытания на свариваемость считаются удовлетворительными, если нет трещин и свойства соответствуют техническим условиям на данный вид сварной конструкции.

Многообразие показателей, по которым определяется свариваемость, не позволяет создать единую методику ее определения, поэтому необходим ряд испытаний. Выбор методов определения свариваемости обусловлен назначением конструкции и свойствами основного металла. Как правило, повышение уровня легирования и прочности стали приводит к ухудшению ее свариваемости. Первостепенная роль здесь принадлежит углероду.

Лучше всего сваривается сталь с низким содержанием углерода. Повышение содержания углерода (С) в нелегированной стали до 0,15 % несколько улучшает свариваемость за счет того, что при этом ограничивается рост зерна феррита. В нелегированной и низколегированной стали содержание углерода до 0,25 % несущественно ухудшает свариваемость. Заметное ухудшение свариваемости наступает при повышении содержания углерода сверх 0,3 %. Особенно плохо свариваются стали с содержанием 0,5 % С и более. Для сварки таких сталей нужны специальные технологические меры, обеспечивающие получение качественного сварного соединения.

Отрицательное влияние углерода на свариваемость связано с повышением склонности стали к образованию горячих и холодных трещин и хрупкости металла в зонах теплового влияния (элементы неравновесных структур). Увеличение содержания углерода в стали увеличивает объемные изменения при охлаждении, приводящем к образованию неравновесных структур.

По свариваемости стали подразделяют на четыре группы: первая – хорошо сваривающиеся, вторая – удовлетворительно, третья – ограниченно, четвертая – плохо сваривающиеся.

К первой группе относятся стали, у которых $C_{\text{экв}}$ не более 0,25 % и которые при обычных видах сварки не дают трещин. Эти стали сваривают без подогрева и после сварки не требуется последующей термообработки, получаются сварные соединения высокого качества. Ко второй группе относятся стали, у которых $C_{\text{экв}}$ находится в пределах 0,2–0,35 %. Для получения сварных соединений с хорошим качеством требуется строгое соблюдение режимов сварки, применение специального присадочного материала, особо тщательная очистка свариваемых кромок и нормальные температурные условия, а в некоторых случаях предварительный подогрев до 100–150 °С с последующей термообработкой.

К третьей группе относятся стали, у которых $C_{\text{экв}}$ в пределах 0,35–0,45 %. К этой группе относятся стали, которые в обычных условиях сварки склонны к образованию трещин. Эти стали сваривают с предварительным подогревом до 250–400 °С с последующим отпусканием. К четвертой группе сталей относятся стали, у которых $C_{\text{экв}}$ более 0,45 %. Такие стали трудно поддаются сварке и склонны к образованию трещин.

Влияние легирующих элементов на свариваемость может быть различным в низко- и высоколегированных сталях. Долю влияния каждого легирующего элемента можно отнести к доле влияния углерода. На этом основан эмпирический показатель – углеродный эквивалент, который позволяет дать предварительную оценку свариваемости сталей:

$$C_{\text{экв}} = C + \text{Mn}/6 + \text{Si}/24 + \text{Ni}/10 + \text{Cr}/5 + \text{Mo}/4 + \text{V}/14, \quad (1)$$

где вместо символов элементов подставляется их процентное содержание в стали.

Описание лабораторной установки, оборудования и материалов

Работа выполняется с использованием установки для автоматической аргодуговой сварки, разработанной в ТГУ.

Установка состоит из рамы с наплавляющими рельсами, механизма позиционирования, оборудования для подачи присадочной проволоки, источника питания (рис. 1).

Передвижение по осям осуществляется шаговыми двигателями при зацеплении зубчатой рейки, установленной на оси, и зубчатой шестерни, установленной на валу двигателя. Управление шаговыми двигателями осуществляется специализированными приводами, собранными в едином блоке управления, состоящими из программируемого контроллера SMC-3, программируемого блока управления SMSD-3.0 и блока питания. Механизм позиционирования позволяет регулировать длину дуги, угол ввода присадочных проволок, высоту ввода присадочных проволок.

Для регулировки положения сварочной горелки применяли механизм, состоящий из специализированного исполнительного механизма линейного перемещения с низким люфтом передвижения. Его рабочий ход составляет 150 мм. К данному механизму крепится кронштейн для регулировки положения горелки с двумя осями, который позволяет в процессе подготовки выставить длину сварочной дуги и положение горелки относительно точки ввода присадочных проволок.

В качестве источника питания использовали универсальный сварочный источник Migatronic BDH 550.

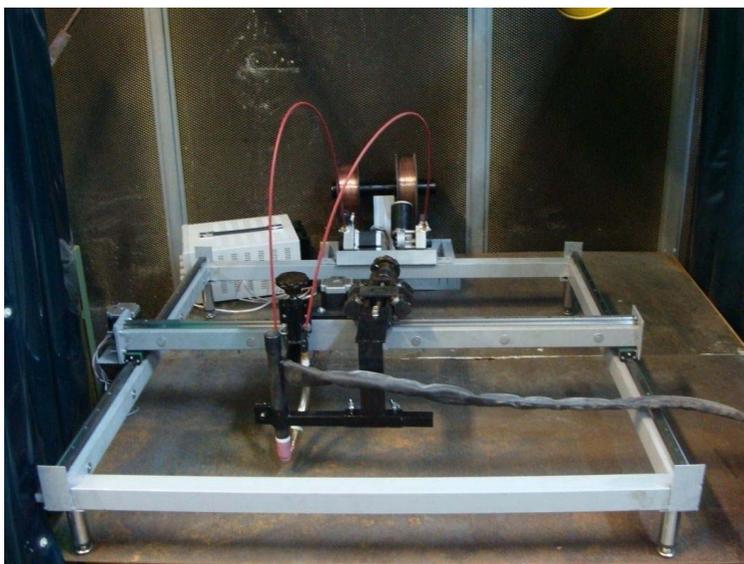


Рис. 1. Установка для автоматической аргодуговой сварки

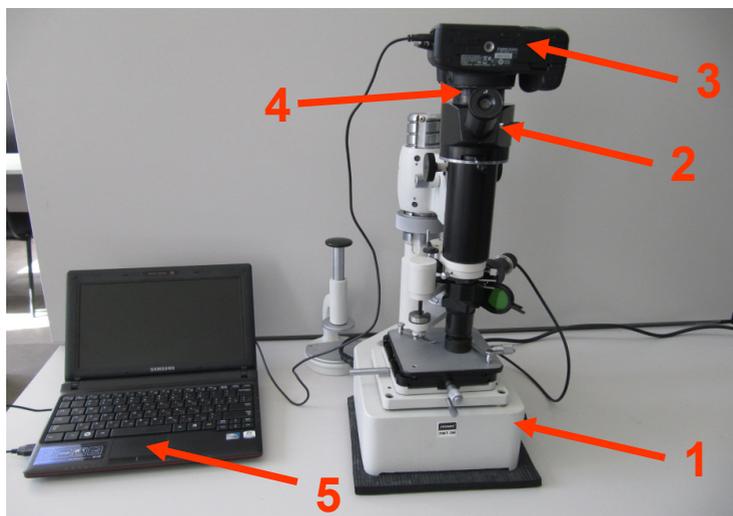


Рис. 2. Внешний вид комплекса для металлографических исследований и измерения микротвердости

Для измерения твердости используется твердомер HBRV-187.5. Металлографические исследования проводят с помощью комплекса на базе микротвердомера ПМТ-3М, состоящего из микротвердомера ПМТ-3М (1), микрофотонасадки (2), цифровой фотокамеры (3), переходного кольца (4) и ПК (5) (рис. 2).

Для исследования свариваемости углеродистых сталей взяты образцы размером 200×100×3 мм из сталей 10, 20, 40, У7. Химический состав сталей приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сталей 10, 20, 40 и У7

Сталь	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
10	0,07–0,14	0,17–0,37	0,35–0,65	до 0,25	до 0,04	до 0,035	до 0,15	до 0,25	до 0,08
20	0,17–0,24	0,17–0,37	0,35–0,65	до 0,25	до 0,04	до 0,04	до 0,25	до 0,25	до 0,08
40	0,37–0,45	0,17–0,37	0,5–0,8	до 0,25	до 0,035	до 0,035	до 0,25	до 0,3	до 0,08
У7	0,66–0,73	0,17–0,33	0,17–0,33	до 0,25	до 0,028	до 0,03	до 0,2	до 0,25	–

Примечание: содержание элементов приведено в %. Содержание железа в сталях в таблице не указано.

Механические свойства сварного соединения исследуются на разрывной машине по ГОСТ 1497–84.

Программа работы

1. Ознакомиться с лабораторным оборудованием и материалами.
2. Рассчитать углеродный эквивалент, используя формулу (1), и оценить свариваемость на основе этих расчетов.
3. Выполнить наплавку на образцы стали на лабораторной установке на режимах, обеспечивающих полное проплавление стального образца.
4. Измерить твердость наплавленного и основного металлов и околошовной зоны, используя твердомер МЕТ-У1.
5. Построить график зависимости твердости металла шва и околошовной зоны от содержания углерода в стали в поперечном сечении сварного шва.

6. Вырезать из сварного соединения образцы для испытаний на статическое растяжение. Размеры образцов $e = 100$ мм, $l = 115$ мм, $b = 10$ мм, $a = 4$ мм (рис. 3).

7. Провести механические испытания образцов сварного соединения, результаты испытаний занести в таблицу.

8. Подготовить микрошлифы образцов.

9. Исследовать микроструктуры образцов, сделать фотографии структуры и измерить микротвердость.

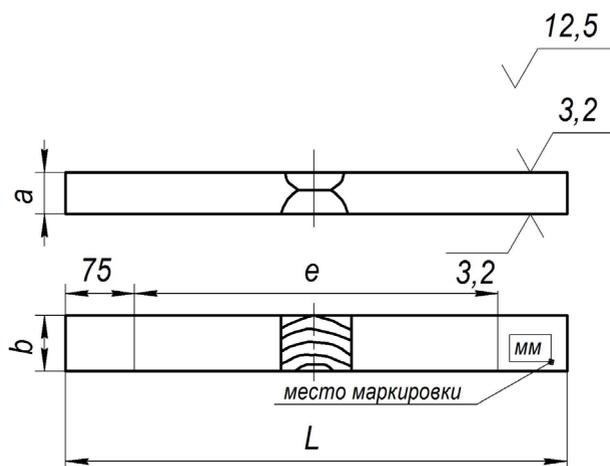


Рис. 3. Образец для испытания на статическое растяжение

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Описание лабораторной установки.
4. Методика исследований.
5. Распределение твердости металла сварного соединения по сечению шва.
6. Зависимости твердости металла шва и околошовной зоны от содержания углерода.
7. Фотографии микроструктуры поперечного сечения сварных соединений.

8. Значения микротвердости металла шва и ОШЗ, сведенные в таблицу.
9. Выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Что понимается под свариваемостью металлов?
2. Как влияет углерод на свариваемость сталей?
3. Как рассчитывается углеродный эквивалент сталей?
4. Какое значение углеродного эквивалента соответствует хорошей свариваемости стали?
5. Какое значение углеродного эквивалента соответствует плохой свариваемости?
6. Как влияет содержание углерода на распределение твердости по сечению шва и околошовной зоны?

Лабораторная работа 2

Свариваемость теплоустойчивых сталей

Цель работы — исследовать влияние тепловых процессов при сварке на структуру и свойства теплоустойчивых сталей.

Краткие теоретические сведения

Теплоустойчивые стали — стали, предназначенные для длительной работы при температурах до 600 °С. К теплоустойчивым сталям относят стали, используемые в энергетическом машиностроении для изготовления котлов, сосудов, паронагревателей, паропроводов и др.

Рабочие температуры теплоустойчивых сталей достигают 600–650 °С, а давление газовых или жидких сред 20–30 МПа. Так, рабочие температуры в паросиловых установках составляют 585 °С при давлении 25,5 МПа, а в наиболее мощных установках достигают 650 °С и 31,5 МПа, соответственно.

Детали таких установок должны работать длительное время без замены (до 100000–200000 ч), поэтому основным требованием является заданное значение длительной прочности и сопротивление ползучести за весь ресурс эксплуатации.

В зависимости от условий работы деталей в качестве теплоустойчивых используют углеродистые, низколегированные и хромистые стали.

Низко- и среднелегированные, хромомолибденовые и хромомолибденованадиевые стали способны сохранять механические свойства в условиях эксплуатации при повышенных температурах (550–570 °С).

Теплоустойчивость этих сталей обусловлена тем, что легирование хромом и молибденом в количествах выше критического отношения Me/C (а стали эти, как правило, низкоуглеродистые) приводит к увеличению доли этих элементов в твердом растворе. Такое легирование феррита вызывает его упрочнение и затрудняет процессы диффузии и самодиффузии при повышенных температурах, что определяет устойчивость свойств при нагреве. С другой стороны, при легировании хромом, а особенно молибденом и ванадием, образуются специальные карбиды этих элементов или комплексные карбиды на основе этих элементов. Такие карбиды имеют повышенную устойчивость против коагуляции при нагреве. Этот фактор также влияет на сохранение свойств

низкоуглеродистых хромомолибденовых и хромомолибденованадиевых сталей при повышенных рабочих температурах до 570 °С (табл. 2).

В табл. 3 приведены пределы отношения Me/C для некоторых теплоустойчивых сталей, соответствующих пределам содержания в стали углерода и карбидообразующих элементов, и свойства этих сталей при повышенных температурах. С увеличением отношения Me/C сверх критического повышается прочность стали при высоких температурах. Особенно это заметно по показателям кратковременных испытаний. Для длительных испытаний помимо величины отношения имеет значение индивидуальная роль легирующего элемента. Для этой характеристики свойств влияние ванадия на раствор и карбиды более эффективно, чем хрома и даже молибдена.

Ошибочно считать, что увеличение отношения Me/C сверх критического будет непрерывно увеличивать показатели жаропрочности. По-видимому, влияние отношения Me/C на кратковременные свойства при высокой температуре, длительную прочность и сопротивление ползучести может быть различным. При длительном воздействии нагрева и напряжений повышение легирования феррита сверх определенной величины может оказывать отрицательное влияние в связи с ухудшением пластических свойств и повышением хрупкости. Этот порог перехода от положительного влияния на жаропрочность к отрицательному для кратковременных и длительных испытаний может происходить при разной величине закритического отношения Me/C .

Низко- и среднелегированные теплоустойчивые стали, как правило, низкоуглеродистые. Только стали типа 34ХМ имеют среднее содержание углерода. Низкое содержание углерода в основных теплоустойчивых сталях оказывает большое влияние на их свариваемость и создающиеся свойства ЗТВ. В то же время у этих сталей отношение Me/C является закритическим, и феррит содержит значительное количество легирующих элементов. Это приводит к тому, что при быстропротекающем сварочном нагреве образующийся аустенит может быть неомогенным по содержанию углерода, но он не имеет резкой неоднородности по содержанию легирующих элементов, хотя в местах, где до нагрева были карбиды, содержание легирующих элементов может быть несколько более высоким, чем в бывших ферритных участках.

Таблица 2

Состав и свойства низко- и среднелегированных теплоустойчивых сталей

Марка стали	Содержание* в % легирующих элементов						Ас ₁	Ас ₃	Аг ₃	Аг ₁	σ _в кгс/мм ²	δ	ψ	с _{нп} , кгс.м/см ²	Термообработка
	С	Cr	Mo	V	W	°С									
12ХМ	≤0,16	0,8-4,1	0,4-0,55	-	-	785	870	-	-	45	24	19	35	5-6	Горючая
12Х1МФ	0,08-0,15	0,9-1,2	0,25-0,35	0,15-0,3	-	740-780	880-900	820-830	720-740	48	26	21	55	10	таная нормализация с высоким отпуском
15Х1М1Ф	0,1-0,16	1,1-1,4	0,9-1,1	0,2-0,35	-	770-800	875-920	-	-	58	35	18	50	5	Закалка с высоким отпуском
34ХМ	0,3-0,4	0,9-1,3	0,2-0,3	-	-	755	800	750	700	80	60	-	40	6	Закалка с высоким отпуском
15Х5М	≤0,15	4,5-6	0,45-0,6	-	-	815	848	775	718	40	22	22	50	12	Отжиг
15Х5МФ	≤0,15	4,5-6	0,45-0,6	0,4-0,6	-	-	-	-	-	60	42	16	65	10	Нормализация с высоким отпуском
15Х5ВФ	≤0,15	4,5-6	-	0,4-0,6	0,4-0,7	830	910	845	775	40	22	22	50	12	Отжиг
12Х2МФСР	0,08-0,15	1,6-1,9	0,5-0,7	0,2-0,35	0,4-0,7	775-825	865-925	770-820	715-765	48	26	21	-	-	Нормализация с высоким отпуском

* Содержание Si, Mn, S, P в пределах, допустимых для качественных сталей.

Таблица 3

Пределы отношения Me/C для теплоустойчивых сталей и свойства этих сталей при повышенных температурах. Усредненная величина критического отношения Me/C при 550 °С – 10,4, при 700 °С – 5,6

Марка сталей	Me/C	Кратковременные испытания		Длительные испытания*		Термообработка**
		σ_{02} , кгс/мм ²	°С	$\sigma_{10}^4 / \sigma_{10}^5$, кгс/мм ²	°С	
12ХМ	10–23,5	27	500	16,5/12	510	Н – 900–920° О – 630–650°
		25	550	11/7,3	540	
		23	600	–	–	
12Х1МФ	11,3–31,8	33	500	19/16	520	Н – 960–1030° О – 680–760°
		32	550	14/10,5	560	
		27	600	–	–	
15Х1М1Ф	16,2–35,5	34,4	500	/17	525	Н – 1020–1050° О – 740–760°
		30,7	550	/13	550	
		28,7	595	–	–	
15Х5М	35,6–73	47	500	21/18	500	Н – 1000° О – 700°
		40	550	11/7,5	550	
		30,7	600	6,2/4,2	600	

* Длительная прочность – числитель при 10⁴ ч, знаменатель при 10⁶ ч.

** Н – нормализация, О – отпуск

Легированный аустенит в зоне термического влияния (ЗТВ) имеет повышенную устойчивость даже в зонах, обедненных углеродом, и при охлаждении после сварки может претерпевать превращение при пониженных температурах, образуя либо смешанные продукты высокотемпературного и низкотемпературного распада, либо только продукты распада при пониженных температурах. Это обстоятельство и то, что в сталях содержится небольшое количество углерода, определяет получаемые свойства ЗТВ. Как правило, у низкоуглеродистых сталей в ЗТВ сохраняется высокая вязкость и относительно невысокая твердость, уровень которых зависит от степени легирования. У сталей типа 34ХМ вязкость ЗТВ, естественно, значительно ниже, а твердость выше, чем у низкоуглеродистых сталей.

Различная температура превращения и различные продукты распада аустенита определяют склонность теплостойких сталей к образованию холодных трещин при сварке и необходимость принятия технологических мер по их предупреждению. Как правило, все эти стали

свариваются без ограничения всеми видами сварки. Ограничения связаны с температурой внешнего воздуха, при которой может происходить сварка, необходимостью подогрева и условиями проведения термообработки (табл. 4).

Таблица 4

Условия сварки основных теплоустойчивых сталей, термообработка сварных соединений и свойства ЗТВ

Марка стали	Температура воздуха при сварке, °С	Подогрев, °С	Свойства ЗТВ после сварки			Термообработка	Свойства ЗТВ после термообработки	
			НВ	σ_H , кгс/мм ²	Основные составляющие микроструктуры		НВ	σ_H , кгс/мм ²
12ХМ	-20	150–250	200	8	Сорбит	При толщине до 20 мм не проводится. Свыше 20 мм – отпуск при 680–700 °С 2 ч	200	10
12Х1МФ (15Х1М1Ф)	-10	300–350	230	5	Сорбит + мартенсит	Отпуск 710–740 °С 2–3 ч	240	8
15Х5М (12Х5ВФ)	0	300–350	380	6	Мартенсит	Отпуск 740–760 °С 3–5 ч	240	8
34ХМ	0	300–350	440	3	То же	Отпуск** 630–650 °С 2–3 ч	200	6

* Термообработка указана для сварки с получением металла шва, близкого по составу к свариваемой стали.

** Проводится сразу после сварки.

Описание лабораторной установки, оборудования и материалов

Сварка проводилась на специально разработанной установке. Установка для исследования процесса сварки элементов трубопровода предназначена для исследования влияния режимов аргонодуговой сварки труб с различного рода присадочными проволоками на химический состав и структуру сварного соединения. Установка обладает следующими техническими характеристиками:

- применяемые способы сварки – автоматическая аргонодуговая плавающимся электродом;
- диаметры сварных образцов 10–300 мм;
- диапазон частоты вращения об/мин 1,25–25 об./мин;
- высота подъема горелки 0–200мм;
- перемещение горелки вдоль образца 300 мм;
- напряжение питания блока управления 220 В.

Установка (рис. 4) состоит из основания 1, двигателя постоянного тока 2, планшайбы 3, блока питания 4, держателя горелки 5, зубчатой передачи 6.

Установка устроена таким образом, что на основании 1 жестко закреплены двигатель постоянного тока 2, блок питания 4, основание держателя горелки 5. На валу двигателя постоянного тока 2 жестко закреплена малая шестерня зубчатой передачи 6. Большая шестерня зубчатой передачи 6 жестко закреплена на планшайбе 3. Планшайба 3 с большой шестерней зубчатой передачи 6 установлена на основание через элемент, обеспечивающий свободное вращение последней. Большая и малая шестерни зубчатой передачи 6 находятся в зацеплении. Блок питания 4 соединен с двигателем постоянного тока 2 электрически.

Установка работает следующим образом. В планшайбу 3 устанавливается собранный стык трубопровода. Горелка сварочного аппарата посредством держателя горелки 5 выставляется под требуемым углом точно по оси стыка, так как установка предусматривает выполнение сварки ниточным швом без колебаний. Далее по соотношению требуемой скорости вращения (скорости сварки) выставляется напряжение блока питания 4, после чего он подключается к двигателю постоянного тока 2. Последний приводит в движение планшайбу 3 с зажатым сварным образцом посредством зубчатой передачи 6.



Рис. 4. Установка для полуавтоматической сварки в среде защитных газов

Основание выполнено сварным из уголков 15×15 мм. Вертикальная стенка выполнена из листа толщиной 6 мм. В ней предварительно вырезаны крепежные отверстия под двигатель с редуктором и корпус подшипника, а также для вала редуктора и подшипникового узла.

В качестве источника питания использовали универсальный сварочный источник Migatron BDH 550.

Для измерения твердости используется твердомер HBRV-187.5. Для металлографических исследований используется комплекс на базе микротвердомера ПМТ-3М.

Механические свойства сварного соединения исследуются на разрывной машине по ГОСТ 1497–84.

В качестве образцов для сварки используется теплоустойчивая сталь 15Х5М. Данная сталь предназначена для работы при температурах

550–600 °С. При сварке сталей данного класса рекомендуется применять предварительный подогрев, а после сварки – последующую термообработку. Режимы предварительной и последующей термообработки приведены в табл. 2. Сталь данного класса сваривается присадочной проволокой Св-08ХМФА автоматической сваркой в среде аргона.

Программа работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
 2. Подготовить образцы для сварки.
 3. Провести процесс сварки труб:
 - без подогрева (один образец);
 - с предварительным подогревом (два образца).
- Режимы сварки: $I = 70–100$ А, $V_{п.пр} = 1,4$ м/мин, $V_{св} = 0,28$ м/мин.
4. Провести отпуск сварного соединения, выполненного с предварительным подогревом. Температура отжига 750 °С, время отпуска 4 ч.
 5. Замерить твердость сварных образцов (сварной шов и околошовная зона).
 6. Построить кривые, характеризующие изменения твердости металла шва и околошовной зоны в поперечном сечении образца на расстоянии 20 мм от центра шва.
 7. Из сварного соединения необходимо изготовить согласно ГОСТ 6996–66 образцы для испытания на растяжение, чтобы определить временное сопротивление и относительное удлинение.
 8. Подготовить микрошлифы образцов.
 9. Исследовать микроструктуры образцов, сделать фотографии структуры и измерить микротвердость.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Описание лабораторной установки.
4. Методика исследования.
5. Кривые распределения твердости в поперечном сечении металла шва и околошовной зоны при различных режимах сварки и термообработки.

6. Значения прочности сварного соединения при механических испытаниях, занесенные в таблицу.
7. Фотографии микроструктуры металла зоны термического влияния и металла шва.
8. Значения микротвердости металла шва и ОШЗ, сведенные в таблицу.
9. Выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Укажите область применения теплоустойчивых сталей.
2. Укажите рабочие температуры теплоустойчивых сталей.
3. Какие стали используются в качестве теплоустойчивых?
4. Чем обусловлена повышенная теплоустойчивость хромомолибденовых и хромомолибденованадиевых сталей?
5. Как оценивается свариваемость теплоустойчивых сталей?
6. С какой целью проводится предварительный подогрев теплоустойчивых сталей перед сваркой?
7. С какой целью проводится отжиг теплоустойчивых сталей?
8. Как влияет хром на свариваемость сталей?
9. Как влияет молибден на свариваемость сталей?

Лабораторная работа 3

Свариваемость высоколегированных хромистых сталей

Цель работы – исследовать влияние тепловых условий сварки на свариваемость хромистых сталей, их структуру и свойства.

Краткие теоретические сведения

Хром – основной легирующий элемент, используемый в коррозионно-стойких и жаропрочных сталях; широко применяется и для легирования жаростойких, окалиностойких сталей.

В коррозионно- и кислотостойких сталях хром (Cr) играет двоякую роль. При содержании Cr более 12 % резко повышается – смещается в положительную сторону электрохимический потенциал стали, сталь «облагораживается» и становится более устойчивой в растворах электролитов. В то же время хром способствует образованию на поверхности металла плотной и достаточно прочной окисной пленки, защищающей металл от воздействия коррозионно-активной среды. Эта же стойкая окисная пленка хрома защищает сталь от окисления при высоких температурах – повышает ее жаростойкость. Таким образом, высокохромистые стали оказываются стойкими против химической и электрохимической коррозии в окислительных средах.

Хром относится к легирующим элементам, стабилизирующим в железных сплавах α -фазу и уменьшающим область существования γ -фазы. Введение в железохромистые сплавы других ферритостабилизирующих элементов (Mo, W, V, Ti, Si и др.) еще больше сужает γ -область, в то же время аустенитостабилизирующие (C, Mn, Ni, Cu) ее расширяют. Углерод, кроме того, приводит к образованию карбидов хрома, обедняя хромом твердый раствор.

Хромистые стали, претерпевающие $\gamma \leftrightarrow \alpha$ превращение, т. е. находящиеся в пределах концентраций существования γ -фазы, относятся к мартенситным в связи с очень небольшой критической скоростью охлаждения у сталей, содержащих более 5 % Cr, даже при небольшом содержании углерода. Мартенситные высокохромистые стали – это основная группа высоколегированных хромистых сталей. Эти стали содержат 8–14 % Cr и 0,06–0,4 % C, а также для придания специальных свойств – другие легирующие элементы. Наличие в сталях углерода

при высоком содержании хрома позволяет получать сочетание коррозионной стойкости и различной степени упрочнения при мартенситном превращении.

В связи с наличием полиморфного превращения стали эти термически обрабатываемы. Чем выше в стали содержание углерода, тем более высокую прочность можно получить как после закалки, так и после нормализации. Только сталь с содержанием менее 0,05 % С практически не закаливается и является ферритной. Твердость стали после нагрева выше Ас₃ (до γ -состояния) как после охлаждения в масле, так и на воздухе — одинаковая, что свидетельствует о том, что при охлаждении в широком интервале скоростей структура стали в основном мартенситная, хотя при более медленном охлаждении определенное количество феррита в стали может сохраняться.

Помимо рассмотренных, наиболее распространенных высокохромистых сталей, содержащих 10–14 % Cr, находят применение как коррозионно-стойкие стали с более высоким легированием хромом — это ферритно-мартенситные на базе 17 % Cr и ферритные на базе 25–28 % Cr.

Структурное состояние и свойства 17 %-х хромистых сталей зависят от содержания в них углерода и других легирующих элементов. Чистый сплав железа с 17 % Cr — однофазный ферритный. Практически однофазное α -состояние сохраняется при содержании в стали до 0,04 % С. На таких сталях нагрев и закалка с температур вплоть до 1200 °С не связаны с перекристаллизацией.

Сварка высокохромистых сталей всех трех рассматриваемых групп связана с рядом трудностей, определяемых их свойствами и особенностями процессов, протекающих при нагреве и охлаждении, их фазовым и структурным состоянием.

Высокохромистые стали, как и другие высоколегированные, имеют значительно более низкую теплопроводность, чем углеродистые и низколегированные. Это приводит к возникновению в зоне сварки более высокого градиента температур и вследствие этого повышенного уровня временных и остаточных сварочных напряжений.

Стали, содержащие 12–14 % Cr, являются мартенситными. Мартенситное превращение в этих сталях имеет две особенности, отрицательно влияющие на образование холодных трещин при сварке. При охлаждении сталей с температур нагрева полностью или даже частично

до аустенитного состояния мартенситный распад происходит в широком интервале скоростей охлаждения, что обуславливает обязательное образование в ЗТВ полностью мартенситной структуры, иногда даже с некоторым количеством аустенита (повышенное содержание углерода, легирование никелем) или феррита (стали с низким содержанием углерода, легированные ферритообразующими элементами).

Другая особенность мартенситного превращения, обуславливающая повышенную склонность к образованию холодных трещин в ЗТВ, состоит в том, что мартенситный распад происходит при пониженных температурах ($\sim 150^\circ\text{C}$), исключающих протекание процессов самоотпуска. Образующийся в этих условиях мартенсит имеет повышенный уровень микронапряжений, повышенную плотность дислокаций, оказывающихся заблокированными, поэтому имеет повышенную хрупкость.

Еще одна особенность сталей мартенситного класса осложняет технологические условия сварки. В связи с тем что мартенситные, и в том числе жаропрочные, высокохромистые стали являются термически улучшаемыми и используются после закалки и высокого отпуска, участки ЗТВ, нагревавшиеся при сварке до температуры, близкой к A_1 , разупрочняются. Такое разупрочнение не может быть ликвидировано последующей после сварки простой термообработкой (отпуском) и требует сложной, двойной, термообработки – нормализации с отпуском. Однако не во всех случаях такое разупрочнение оказывается недопустимым. Так же как и при сварке термически улучшенных углеродистых и низколегированных сталей при определенных размерах оно может не сказаться на агрегатной прочности в связи с эффектом контактного упрочнения.

На степени разупрочнения при сварке участков ЗТВ термически улучшенных мартенситных сталей сказывается температура отпуска, которому подвергался после закалки свариваемый металл. Поскольку для этих сталей применимы разные отпуска ($250\text{--}300$, $600\text{--}700$ и $740\text{--}760^\circ\text{C}$) в зависимости от требуемой твердости, прочности и вязкости, для сварных изделий следует предпочитать наиболее высокоотпущенную сталь, так как в этом случае будет наименее заметным разупрочнение ЗТВ.

Для 17 %-х, и особенно 25 %-х, хромистых полуферритных и ферритных сталей сильно ограничивает возможность и усложняет технологию сварки быстропротекающий рост ферритного зерна при нагреве в ЗТВ и отсутствие практической возможности каким-либо путем

измельчить это зерно после сварки, поскольку ферритные стали не претерпевают перекристаллизации в связи с отсутствием $\alpha \leftrightarrow \gamma$ – превращения. Сильный рост ферритного зерна приводит к значительному охрупчиванию ЗТВ ферритных сталей при сварке.

Повышение хрупкости ЗТВ у высокохромистых сталей может быть связано и с другими явлениями – развитием хрупкости в участках, нагретых до температуры 450–500 °С, и выделением по границам зерен карбидов. Выделение карбидов хрома по границам зерен в участках ЗТВ, нагретых до температуры 900 °С и несколько выше, обуславливает понижение их стойкости против межкристаллитной коррозии. Устранение этого недостатка достигается использованием для сварки высокохромистых сталей, легированных титаном или ниобием, которые связывают углерод в стойкие карбиды. При сварке сталей, не содержащих титана или ниобия, устранение склонности сварных соединений к межкристаллитной коррозии достигается термообработкой, восстанавливающей стабильное состояние участков границ зерен.

Хотя высокохромистые стали можно сваривать различными способами, общим условием является использование технологии с наименее интенсивным тепловым воздействием сварочного источника теплоты на участки ЗТВ. При сварке мартенситных сталей это уменьшает размер мартенситной зоны. При наличии в этих сталях феррита и сварке полуферритных и ферритных сталей – ограничивает рост зерен феррита и снижает эффект охрупчивания ЗТВ.

Низкая теплопроводность хромистых сталей и вредное влияние повышенного градиента температур в ЗТВ – фактор неблагоприятный. Чтобы уменьшить температурный градиент в ЗТВ, который может быть особенно заметным при сварке с малым тепловложением, хромистые стали перед сваркой, как правило, необходимо подогревать. Температура подгрева хромистых сталей перед сваркой должна быть разной для разных сталей. При сварке мартенситных сталей для уменьшения опасности возникновения холодных трещин подогрев должен быть высоким (до 360 °С). Такой подогрев уменьшает скорость охлаждения после сварки, снижает уровень сварочных напряжений и способствует протеканию мартенситного распада в более благоприятных условиях. Однако этого мероприятия при сварке мартенситных высокохромис-

тых сталей может оказаться недостаточно для предотвращения образования холодных трещин.

Вследствие особенностей мартенситного превращения у этих сталей холодные трещины могут возникать сразу же после сварки или даже в процессе охлаждения. Чтобы предотвратить их появление, охлаждение после сварки следует задержать на уровне температуры мартенситного превращения – при 100–150 °С и выдержать при этой температуре определенное время, определяемое составом стали, прежде всего содержанием в ней углерода и массой (толщиной) сваривавшегося изделия. В этом случае не только мартенситное превращение протекает в более благоприятных условиях и мартенсит оказывается менее хрупким, но также уменьшается количество остаточного аустенита. Уменьшение количества остаточного аустенита при таком режиме охлаждения может снизить несколько вязкость металла в ЗТВ в состоянии после сварки.

Все сварные соединения мартенситных сталей после сварки обязательно подвергают высокому отпуску для снятия напряжений, распада мартенсита и общего повышения вязкости. Сохранение перед этой операцией отпуска остаточного аустенита может привести к его распаду при отпуске и ухудшению вязкости. Отпуск сварных соединений высокохромистых сталей назначают (до температуры 680–760 °С) в зависимости от состава свариваемой стали: более низкая температура отпуска – для сталей без дополнительного легирования карбидообразующими элементами, более высокая – для сталей со значительными количествами молибдена, вольфрама, ванадия.

Как правило, мартенситные жаропрочные стали сваривают с присадочными материалами, обеспечивающими металл шва, по составу и свойствам близкий к основному. В этом случае должны соблюдаться все отмеченные выше условия сварки. Иногда для монтажных или ремонтных условий, где проведение термообработки связано с большими трудностями, для сварки можно применять аустенитные присадочные материалы.

Сварка ферритных и полуферритных высокохромистых сталей с содержанием хрома 25 и 17 %, а также стали 08X13 имеет особенности, связанные с ростом ферритного зерна в ЗТВ и значительным охрупчиванием этих участков. Пониженная теплопроводность, требующая подогрева для уменьшения температурного градиента, с одной стороны,

и необходимость ограничения тепловложения — с другой, приводят к тому, что при сварке ферритных и полуферритных высокохромистых сталей температура подогрева существенно ниже, чем при сварке мартенситных и ограничивается 150 °С. При малых толщинах свариваемого металла и положительных температурах окружающего воздуха сварка возможна иногда и вовсе без подогрева.

Рост ферритного зерна в ЗТВ при сварке ферритных и полуферритных высокохромистых сталей и охрупчивание этих участков неизбежны. Для их ограничения следует максимально уменьшать тепловложение при сварке.

Одновременно с ростом зерна в ЗТВ у сталей, не содержащих титана или ниобия, снижается устойчивость против межкристаллитной коррозии. В связи с этим сварные изделия, работающие в условиях воздействия коррозионно-активных сред, для восстановления устойчивости против межкристаллитной коррозии должны подвергаться термообработке — длительному нагреву (отжигу) при температуре 760–780 °С с последующим ускоренным охлаждением. Такой нагрев приводит к выравниванию концентрации хрома по зерну, восстановлению концентрации хрома в приграничных участках зерен. Ускоренное охлаждение предотвращает возможность образования карбидов и развития 475-градусной хрупкости. Если изделие работает в условиях отсутствия коррозионно-активных сред, достаточен обычный высокий отпуск при 700–750 °С.

Сварка ферритных и полуферритных высокохромистых сталей, содержащих титан и ниобий в указанных количествах, не связана с развитием склонности к межкристаллитной коррозии. В этом случае после сварки даже для изделий, работающих в условиях воздействия коррозионно-активных сред, применяют указанный высокий отпуск. Снижение вязкости металла ЗТВ за счет роста ферритного зерна происходит и в этих сталях.

Условия сварки мартенситных, полуферритных и ферритных высокохромистых сталей приведены в табл. 5. Рассмотренные трудности сварки высокохромистых сталей, низкая вязкость металла ЗТВ ограничивают применение этих материалов в сварных конструкциях и изделиях.

Условия сварки высокохромистых сталей

Марка стали	Температура воздуха при сварке, °С	Толщина металла, мм	Подогрев, °С	ЗТВ после сварки		Термообработка	ЗТВ после термообработки	
				НВ	a_n , кгс м/см ²		НВ	a_n , кгс м/см ²
08X13	+5	≤10	—	250	1	Отпуск при 660–770 °С	200	1
	+5	≥10	150					
20X13		все толщины	300	500	2	Отпуск при 660–770 °С	200	3
	+10	все толщины						
30X13	+10	все толщины	300	500	2	Отпуск при 200–300 °С	500	3
40X13	+10	все толщины	300	500	2	Отпуск при 200–300 °С	500	3
15X11МФ	+10	все толщины	300–350	500	2	Отпуск при 650–750 °С	250	4
15X12ВНМФ	+10	все толщины	300–350	500	2	Отпуск при 650–750 °С	250	4
18X11МНФБ	+10	все толщины	300–350	500	2	Отпуск при 650–750 °С	250	4
14X12В2МФ	+10	все толщины	300–350	500	2	Отпуск при 650–750 °С	250	4
12X17	+10	≤10	—	300	1	Отпуск при 700–750 °С	200	1
	+10	≥10	150–250	300	1	Отпуск при 700–750 °С	200	1
15X28	+10	≤10	—	300	1	Отпуск при 700–750 °С	200	1
	+10	≥10	150–250	300	1	Отпуск при 700–750 °С	200	1
08X17Т	+10	≤10	—	350	1	Отпуск при 700–750 °С	200	1
	+10	≥10	150–200	350	1	Отпуск при 700–750 °С	200	1
15X25Т	+10	≤10	—	350	1	Отпуск при 700–750 °С	200	1
	+10	≥10	150–200	350	1	Отпуск при 700–750 °С	200	1

Описание лабораторной установки, оборудования и материалов

Работа выполняется на установке, описание которой приведено в лабораторной работе 1.

В качестве присадочного материала используется присадочная проволока 40X13 диаметром 1,2 мм.

Для измерения твердости применяется твердомер HBRV-187.5. Для металлографических исследований используется комплекс на базе микротвердомера ПМТ-3М.

Для исследования свариваемости хромистых высоколегированных сталей взяты образцы размером 200×100×3 мм из стали 40X13. Химический состав и физические свойства стали приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Химический состав стали 40X13

Элемент	C	Cr	Fe	Mn	P	S	Si
Содержание, %	0,36–0,45	12–14	осн.	до 0,8	до 0,03	до 0,025	до 0,8

Таблица 7

Физические свойства стали 40X13

T, °C	E 10 ⁻⁵ (МПа)	α 10 ⁶ (1/град)	λ , (Вт/(м·град))	ρ (кг/м ³)	C (Дж/(кг·град))	R 10 ⁹ (Ом·м)
20	2,18		25	7650	461	590
100	2,14	10,8	26	7630	482	650
200	2,06	11,9	27,2	7600	523	710
300	1,98	12,3	28,3	7570	565	790
400	1,88	13	29,1	7540	607	860
500	1,76	13,6	29,1	7510	674	940
600	1,63	13,5	29,1	7480	775	1000
700	1,48	13,8	28,3	7450	988	1120
800	1,4	14,6	27,9	7420	825	1180
900			28,5		691	1160

Механические свойства сварного соединения испытываются на разрывной машине по ГОСТ 1497–84.

Программа работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Подготовить образцы для сварки.
3. Провести процесс сварки образцов.
 - без подогрева (один образец);
 - с предварительным подогревом (два образца).
4. Провести отжиг сварного соединения, выполненного с предварительным подогревом. Температура отжига 760–780 °С.
5. Замерить твердость сварных образцов (сварной шов и околошовная зона).
6. Построить кривые, характеризующие изменение твердости металла шва и околошовной зоны в поперечном сечении образца на расстоянии 20 мм от центра шва до основного металла.
7. Вырезать из сварного соединения образцы для испытаний на статическое растяжение. Размеры образцов указаны на рис. 3.
8. Провести механические испытания образцов сварного соединения, результаты испытаний занести в таблицу.
9. Подготовить микрошлифы образцов.
10. Исследовать микроструктуры образцов, сделать фотографии структуры и измерить микротвердость.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Программа работы.
3. Описание лабораторной установки.
4. Методика исследования.
5. Кривые распределения твердости в поперечном сечении металла шва и околошовной зоны при различных режимах сварки и термообработки.
6. Значения механической прочности сварных соединений, занесенные в таблицу.
7. Фотографии микроструктуры металла зоны термического влияния и металла шва.
8. Значения микротвердости металла шва и ОШЗ, сведенные в таблицу.
9. Выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Основное назначение высокохромистых сталей?
2. В чем заключается влияние хрома на эксплуатационные свойства высокохромистых сталей?
3. Как влияет хром на область существования полиморфных модификаций железа?
4. На какие структурные классы делится высокохромистая сталь?
5. С какой целью проводится предварительный подогрев хромистых высоколегированных сталей перед сваркой?
6. С какой целью проводится отпуск хромистых высоколегированных сталей?
7. Чем обуславливается выбор присадочных материалов при сварке хромистых высоколегированных сталей?

Библиографический список

1. Гуляев, А.П. *Металловедение : учеб. для вузов / А.П. Гуляев.* – М. : *Металлургия*, 1986. – 544 с.
2. *Цветное литье : справочник / Н.М. Галдин [и др.] ; под общ. ред. Н.М. Галдина.* – М. : *Машиностроение*, 1989. – 528 с.
3. *Лахтин, С.Б. Металловедение : учеб. для вузов / С.Б. Лахтин, Н.Е. Леонтьев.* – М. : *Машиностроение*, 1972. – 280 с.
4. *Теория сварочных процессов / под ред. В.В. Фролова.* – М. : *Высш. шк.*, 1988. – 559 с.
5. *Металловедение для сварщиков / Л.С. Лившиц.* – М. : *Машиностроение*, 1979. – 253 с.
6. *Мальцев, М.В. Модифицирование структуры металлов и сплавов М.В. Мальцев.* – М. : *Металлургия*, 1964. – 214 с.
7. *Смирнов, И.В. Сварка специальных сталей и сплавов : учеб. пособие / И.В. Смирнов – Тольятти : ТГУ, 2007.* – 301 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа 1. Влияние углерода на свариваемость сталей.....	4
Лабораторная работа 2. Свариваемость теплоустойчивых сталей.....	11
Лабораторная работа 3. Свариваемость высоколегированных хромистых сталей.....	20
Библиографический список.....	30

Учебное издание

Ковтунов Александр Иванович
Мямин Сергей Владимирович

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ СВАРКИ
Практикум

Редактор *Е.Ю. Жданова*
Технический редактор *З.М. Малявина*
Вёрстка: *Л.В. Сызганцева*
Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 04.12.2013. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 1,86.

Тираж 50 экз. Заказ № 1-22-13.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14

