

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

# МЕТАЛЛУРГИЯ СВАРКИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов направления подготовки  
15.03.01 «Машиностроение»  
очной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 621.791  
ББК 34.611  
М54

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства»  
«3» февраля 2023 г., протокол № 9

Составитель канд. техн. наук, доц. А. Г. Лупачев

Рецензент канд. техн. наук, доц. Д. М. Свирепа

Методические рекомендации к лабораторным работам по дисциплине  
«Металлургия сварки» предназначены для студентов направления подготовки  
15.03.01 «Машиностроение» очной формы обучения.

Учебное издание

## МЕТАЛЛУРГИЯ СВАРКИ

Ответственный за выпуск	А. О. Коротеев
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	М. М. Дударева

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ № .

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2023

## Содержание

1 Лабораторная работа № 1. Определение механических свойств на основе измерения твердости .....	4
2 Лабораторная работа № 2. Оценка сопротивлению разрушению сварных соединений по результатам испытаний на ударный изгиб.....	12
3 Лабораторная работа № 3. Оценка влияния режимов сварки на структуру разнородного сварного соединения.....	20
4 Лабораторная работа № 4. Оценка влияния состава сварочных материалов на структуру разнородного сварного соединения.....	24
Список литературы.....	27

# 1 Лабораторная работа № 1. Определение механических свойств на основе измерения твердости

*Цель работы:* оценка механических характеристик стали или сварного соединения по результатам измерения твердости.

## 1.1 Общие теоретические сведения

По способу получения результата методы определения твердости подразделяются на прямые и косвенные.

В прямых методах значение твердости находится непосредственно из результата испытания. Все прямые методы стандартизованы. К ним относятся методы Бринелля, Виккерса, Роквелла, Шора.

К косвенным методам относятся не стандартизованные методы определения твердости: акустико-импедансный и немеханические.

Косвенные методы определения твердости применяются дополнительно к прямым для повышения статистической достоверности результатов либо для упрощения процедуры контроля в случаях, когда применение прямых методов затруднено или невозможно.

В косвенных методах значение твердости находится на основании корреляционных соотношений с результатами определения твердости, полученными прямыми методами.

По принципу действия методы определения твердости подразделяются на механические и немеханические (бездеформационные).

В ходе испытаний механическими методами производится деформация материала, а в ходе испытаний немеханическими методами измеряются его отличные от механических физические характеристики. Механические методы могут быть как прямыми, так и косвенными, немеханические – только косвенными.

Схематическое представление классификации методов определения твердости представлено на рисунке 1.

В зависимости от временного характера приложения нагрузки и измерения параметров вдавливания индентора механические методы определения твердости подразделяются на статические, динамические и кинетические.

Статические методы подразумевают медленное приложение нагрузки и выдержку под нагрузкой.

В динамических методах нагрузка прилагается быстро, а выдержка под нагрузкой не предусматривается,

В кинетических методах приложение нагрузки производится с ограниченной скоростью. В ходе испытаний производится непрерывная регистрация процесса вдавливания индентора с записью диаграммы «нагрузка на индентор – глубина вдавливания индентора».

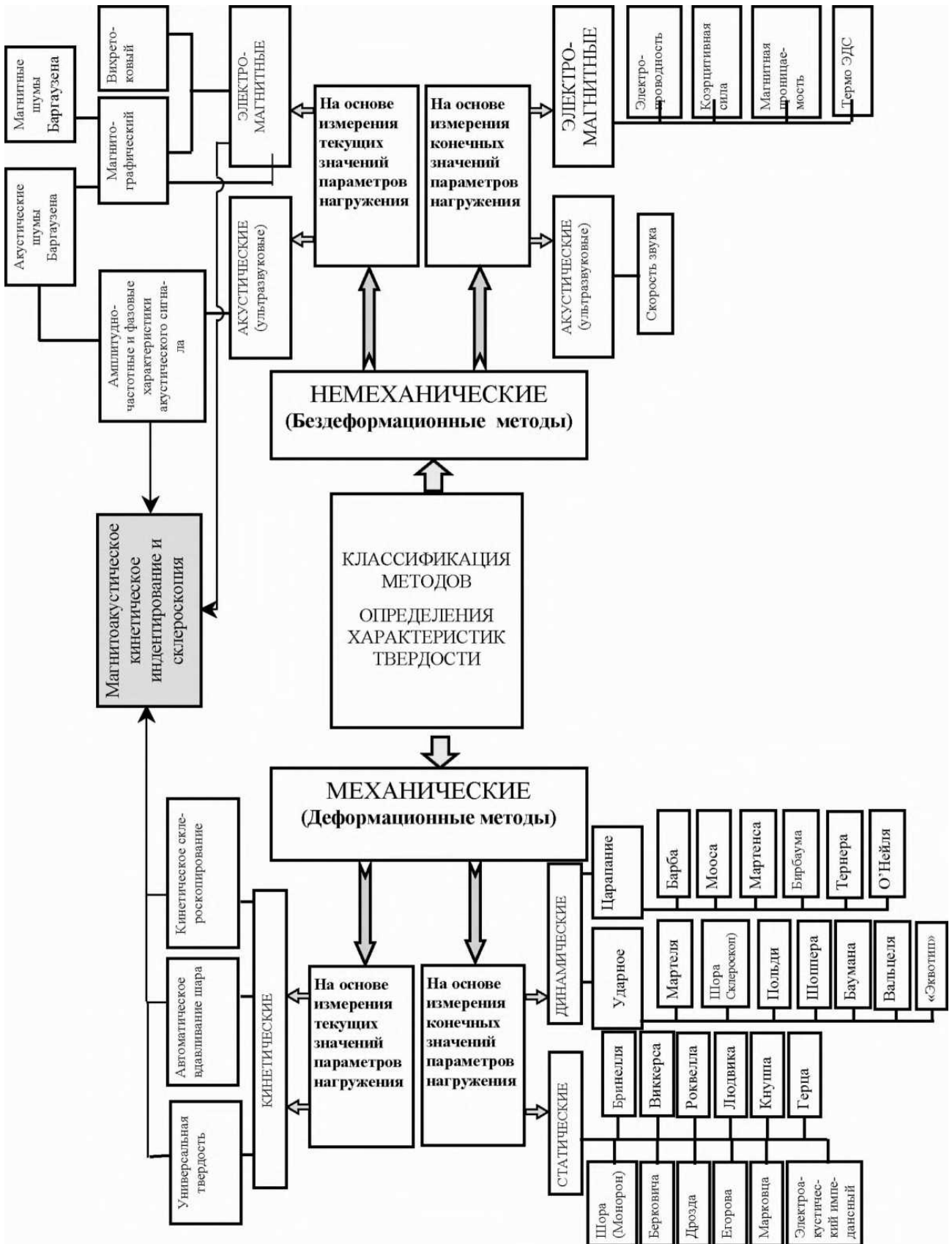


Рисунок 1 – Классификация методов испытания на твердость

По величине прикладываемой нагрузки при вдавливании статические методы определения твердости разделяются на испытания на микротвердость

(нагрузка менее 0,5 кгс), испытания на твердость при малых нагрузках (от 0,5 до 5 кгс) и испытания на макротвердость (свыше 5 кгс).

Испытания на микротвердость настоящей инструкцией не регламентируются в связи с тем, что для определения механических характеристик металла необходимо проведение испытаний материала на твердость таким образом, чтобы результат измерений не зависел от структурных неоднородностей тестируемого материала.

Немеханические методы определения твердости могут применяться только для предварительного обследования и выявления неоднородности свойств исследуемого материала.

Измерение твердости металла на вырезках сварных соединений производится в соответствии с ГОСТ 6996.

При измерении твердости стандартизованными методами должны быть соблюдены требования соответствующих стандартов для этих методов.

#### *1.1.1 Общие требования к приборным средствам.*

Приборы измерения твердости классифицируются на стационарные и переносные.

Стационарные приборы предназначены для работы в условиях лаборатории.

Переносные приборы могут быть установлены на объекте измерения и быть использованы для безобразцового контроля оборудования и трубопроводов.

Прибор измерения твердости должен быть сертифицирован в органе по техническому регулированию и метрологии и внесен в Государственный реестр средств измерений, а также поверен в аккредитованной метрологической службе.

Приборы измерения твердости механическим методом проходят поверку в соответствии с ГОСТ 8.398 не реже одного раза в год с применением образцовых мер твердости не ниже второго разряда по ГОСТ 9031.

Подготовка прибора к проведению измерений производится в соответствии с руководством по эксплуатации или паспортом на прибор.

Для приборов измерения твердости косвенным механическим методом перед проведением измерений следует произвести контрольные испытания на образцовых мерах твердости по ГОСТ 9031, либо на аттестованных образцах металла, близкого по свойствам к испытываемому. Погрешность результатов контрольных испытаний не должна превышать нормативную для данного прибора.

#### *1.1.2 Требования предъявляемые к качеству испытываемой поверхности.*

Прежде чем приступить к проведению испытаний, необходимо подготовить поверхность испытываемого изделия в месте контроля:

– если металл, предназначенный для испытаний, работал в условиях радиационного облучения, то испытания производятся по дозиметрическому наряду-допуску;

– поверхность испытываемого изделия должна быть свободна от окалины и других посторонних веществ;

– на контролируемой поверхности изделия производится зачистка участка

измерения так, чтобы края отпечатка после вдавливания были достаточно отчетливы для измерения его размеров с требуемой точностью;

- при испытаниях на искривленных поверхностях радиус кривизны образца (изделия) должен быть не меньше величины  $5D$  в случае, когда проводится испытание шаровым индентором или 5 мм в случае вдавливания пирамиды или конуса;

- при подготовке поверхности к испытаниям необходимо снять поверхностный слой, чтобы исключить влияние наклепа, обезуглерожения или коррозионных повреждений металла;

- при подготовке поверхности испытуемого изделия необходимо принять меры предосторожности против возможного изменения твердости испытуемой поверхности, вследствие нагрева или наклепа поверхности в результате механической обработки;

- поверхность обрабатывается в два-три этапа со сменой направления обработки на  $90^\circ$  до удаления рисок от предыдущей обработки;

- число этапов зачистки поверхности испытуемого металла определяется требованиями к шероховатости этой поверхности согласно ГОСТ 2789;

- зачистка испытуемой поверхности проводится в следующем порядке:

- а) удаление дефектов поверхности с толщиной снимаемого слоя от 0,25 до 1,5 мм. Механическая зачистка производится шлифмашинкой с крупнозернистым кругом. Ручная зачистка производится драчевым напильником;

- б) шлифование с толщиной снимаемого слоя от 0,1 до 0,25 мм. Достижимый параметр шероховатости  $Ra$  находится в пределах от 0,15 до 3,2 мкм. Механическая зачистка производится шлифмашинкой с мелкозернистым кругом. Ручная зачистка производится шлифовальной шкуркой;

- в) полирование с толщиной снимаемого слоя до 0,05 мм. Достижимый параметр шероховатости  $Ra$  находится в пределах от 0,025 до 0,40 мкм. Механическая зачистка производится войлочным или фетровым кругом, половина цилиндрической поверхности которого покрывается алмазной пастой или пастой ГОИ. При ручном способе полировки на фетровую или суконную ткань последовательно наносятся алмазные пасты различной зернистости. После достижения зеркального состояния поверхности, поверхность очищается от пасты;

- рекомендуемая глубина снимаемого слоя при зачистке:

- а) кованно-штампованной поверхности – не более 2 мм;

- б) поверхности литых деталей – не более 4 мм;

- в) для труб – от 4 % до 5 % от толщины стенки, но не более 2 мм;

- место для проведения испытания на твердость должно располагаться на линии, проходящей через центр подготовленной площадки и параллельной оси трубы;

- в случае отсутствия ясно выраженных границ сварного шва, в местах зачистки провести травление зоны сварного шва.

### *1.1.3 Правила обработки результатов измерения.*

Обработка результатов измерений включает в себя следующие этапы:

- вычисление значений твердости, получаемых непосредственно в результате испытания материала на основании соответствующих методик и оценка погрешности полученного значения твердости;
- преобразование, если это необходимо, полученного значения твердости в значение твердости по более употребительной шкале (например, перевод в единицы по шкале Бринелля производится как промежуточный этап при расчете механических свойств);
- расчет значений механических свойств по характеристикам твердости и оценка погрешности полученных значений механических свойств.

### *1.1.4 Вычисление значения твердости и оценка погрешности.*

Вычисление твердости производится по серии испытаний.

Для каждого испытания в соответствии с руководством по эксплуатации или паспортом к прибору производится расчет значения твердости.

Статистическую обработку результатов испытаний производить в соответствии с ГОСТ 8.207. Считать при этом, что результаты испытаний принадлежат к нормальному распределению и принять доверительную вероятность равной 0,95.

### *1.1.5 Взаимосвязь значений твердости, определяемых различными методами.*

При сопоставлении значений твердости, полученных различными методами между собой необходимо помнить, что:

- зависимости для такого перевода являются эмпирическими;
- при одном и том же способе измерения твердости ее значение сильно зависит от нагрузки: при меньших нагрузках значения твердости получаются более высокими.

Перевод значений твердости, определяемых различными методами, для углеродистых конструкционных сталей приведен в таблице 1.

В таблице 2 даны уравнения перевода определяемых различными методами значений твердости в значение твердости по Бринеллю для сталей оборудования и трубопроводов атомных электростанций (АЭС). Используется поправочный коэффициент  $k_a$ , равный 1,0 – для перлитных сталей; 0,97 – для аустенитных сталей.



Таблица 1 – Перевод значений твердости, определяемых различными методами для сталей перлитного класса

Твердость по Виккерсу, HV	Твердость по Бринеллю, HB		Твердость по Роквеллу			Твердость по Виккерсу, HV	Твердость по Бринеллю, HB		Твердость по Роквеллу		
	Стальной шарик	Шарик из карбида вольфрама	HR C	HR A	HR B		Стальной шарик	Шарик из карбида вольфрама	HR C	HR A	HR B
1234	780	872	72	84	–	228	229	–	20	61	100
1116	745	840	70	83	–	222	223	–	19	60	99
1022	712	812	68	82	–	217	217	–	17	60	98
941	682	794	66	81	–	213	212	–	15	59	97
868	673	760	64	80	–	208	207	–	14	59	95
804	627	724	62	79	–	201	201	–	13	58	94
746	601	682	60	78	–	197	197	–	12	58	93
694	578	646	58	78	–	192	192	–	11	57	92
650	555	614	56	77	–	186	187	–	9	57	92
606	534	578	54	76	–	183	183	–	8	56	90
687	514	555	52	75	–	178	179	–	7	56	90
551	495	525	50	74	–	174	174	–	6	55	89
534	477	514	49	74	–	171	170	–	4	55	88
502	461	477	48	73	–	166	167	–	3	54	87
474	444	460	46	73	–	162	163	–	2	53	86
460	429	432	45	72	–	159	159	–	1	53	85
435	415	418	43	72	–	155	156	–	–	–	84
423	401	401	42	71	–	152	152	–	–	–	83
401	388	388	41	71	–	149	149	–	–	–	82
390	375	375	40	70	–	148	146	–	–	–	81
386	363	364	39	70	–	143	143	–	–	–	80
361	352	352	38	69	–	140	140	–	–	–	79
344	341	341	36	68	–	138	137	–	–	–	76
334	331	330	35	67	–	134	134	–	–	–	77
320	321	321	33	67	–	131	131	–	–	–	76
311	311	311	32	66	–	129	128	–	–	–	75
303	302	302	31	66	–	127	126	–	–	–	74
292	293	–	30	65	–	123	123	–	–	–	73
285	285	–	29	65	–	121	121	–	–	–	72
278	277	–	28	64	–	118	118	–	–	–	71
270	269	–	27	64	–	116	116	–	–	–	70
261	262	–	26	63	–	115	114	–	–	–	66
255	255	–	25	63	–	113	111	–	–	–	67
249	248	–	24	62	–	110	110	–	–	–	66
240	241	–	23	62	102	109	109	–	–	–	66
235	235	–	21	61	101	108	107	–	–	–	64

Таблица 2 – Перевод значений твердости, определяемых различными методами

Твердость	Ограничение	Уравнение
По Виккерсу HV	$80 < HV < 250$	$HB = HV$
	$250 < HV < 500$	$HB = HV - 0,0002 HV (HV - 57)$
По Роквеллу HRA	$50 < HRA < 73$	$HB = k_a (0,43 HRA^2 - 41 HRA + 1125)$
По Роквеллу HRB	$40 < HRB < 102$	$HB = k_a (0,0007 HRB^3 - 0,1 HRB^2 - 5,8 HRB - 35)$
По Роквеллу HRC	$1 < HRC < 45$	$HB = k_a (0,1 HRC^2 + 1,3 HRC + 160)$
По Шору HSD	$20,5 < HSD < 70$	$HB = 7,02 HSD$

### 1.1.6 Определение характеристик механических свойств металла оборудования и трубопроводов по результатам испытаний на твердость.

Для определения характеристик механических свойств металла оборудования и трубопроводов применяются следующие методики:

- использование предварительно установленных корреляционных соотношений между значениями твердости и искомыми механическими свойствами;
- определение механических свойств по диаграмме вдавливания шарового индентора, регистрируемой приборами, реализующими кинетические методы определения твердости.

В таблице 3 приведены корреляционные соотношения, позволяющие по значениям твердость по Бринеллю HB определять значения характеристик механических свойств металла:

- предела текучести  $R_{p0,2}$  с погрешностью 15 % для основного металла, 20 % – для металла сварных швов;
- временного сопротивления  $R_m$  с погрешностью 10 % для основного металла, 15 % – для металла сварных швов;
- относительного удлинения  $\delta$  с погрешностью 20 %;
- относительного сужения  $\psi$  с погрешностью 30 %.

Представленная в таблице 3 зависимость между твердостью по Бринеллю HB и временным сопротивлением для углеродистых и легированных кремнемарганцовистых сталей выведена на основании рекомендации ГОСТ 22761. Для легированных сталей соотношение между твердостью на пределе текучести  $H_{0,2}$  и пределом текучести приведено в ГОСТ 22762.

Таблица 3 – Определение характеристик механических свойств металла по измеренным значениям твердости

Материал	Ограничение	Свойство	Единица измерения	Уравнение
1	2	3	4	5
Стали углеродистые и легированные кремнемарганцовистые	$HB > 140$	$R_{p0,2}$	МПа	$3,4 HB - 175$
	$HB < 140$	$R_{p0,2}$	МПа	$4,2 \cdot 10^4 / (2R_m + R_{p0,2})$
	–	$R_m$	МПа	$8,8 \cdot 10^{-4} HB^2 + 2,66 HB + 103$
		$\delta$	%	$3,0 \cdot 10^4 / (2R_m + R_{p0,2})$
		$\psi$	%	$1,9 \cdot 10^5 / (R_m + R_{p0,2} + 2000)$

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5
Стали легированные и легированные хромомолибденованадиевые перлитного класса	HB > 200	$R_m$	МПа	3,4 HB – 90
		$R_{p0,2}$	МПа	3,6 HB – 240
	HB < 200	$R_m$	МПа	2,5 HB + 90
		$R_{p0,2}$	МПа	2,4 HB
	–	$\delta$	%	$4,2 \cdot 10^4 / (2R_m + R_{p0,2})$
		$\psi$	%	$2,3 \cdot 10^5 / (R_m + R_{p0,2} + 2000)$
Стали аустенитного класса	–	$R_m$	МПа	1,9 HB + 250
		$R_{p0,2}$	МПа	1,7 HB
		$\delta$	%	$7,5 \cdot 10^4 / (2R_m + R_{p0,2})$
		$\psi$	%	$1,8 \cdot 10^5 / (R_m + R_{p0,2} + 2000)$
Сварные соединения аустенитных сталей	–	$R_m$	МПа	1,9 HB + 250
		$R_{p0,2}$	МПа	2,2 HB
		$\delta$	%	$6,8 \cdot 10^4 / (2R_m + R_{p0,2})$
		$\psi$	%	$1,8 \cdot 10^5 / (R_m + R_{p0,2} + 2000)$

## 1.2 Оборудование, приборы и материалы

1.2.1 Универсальный твердомер AFFRI.

1.2.2 Набор образцов из наплавленного металла: сталь 20, 09Г2С, 08Х18Н10Т (или основной металл толщиной 4 мм и более).

1.2.3 Маятниковая пила с абразивными кругами или лентопильный станок.

1.2.4 Станок для полировки шлифов.

1.2.5 Шлифовальная бумага № 3 до № 000 – по 0,06 м<sup>2</sup>.

## 1.3 Порядок проведения работы

1.3.1 Изучить порядок работы на универсальном твердомере AFFRI. Разрезать заготовки на образцы высотой 10...15 мм. (Пластины размером 20 × 20 мм.)

1.3.2 Подготовить образцы к измерению твердости.

1.3.3 Измерить твердость.

1.3.4 Рассчитать значения механических характеристик.

1.3.5 Оформить результаты работы.

## 1.4 Содержание отчета

1.4.1 Название и цель работы.

1.4.2 Химический состав исследуемых материалов.

1.4.3 Результаты измерения твердости.

1.4.4 Результаты расчета механических характеристик.

1.4.5 Выводы по работе.

## Контрольные вопросы

1 Какова сущность измерения твердости по Бринеллю?

- 2 Какова сущность измерения твердости по Виккерсу?
- 3 Какова сущность измерения твердости по Роквеллу?
- 4 Какие требования предъявляют к приборным средствам?
- 5 Каким требованиям должны удовлетворять испытываемые поверхности?

## 2 Лабораторная работа № 2. Оценка сопротивлению разрушению сварных соединений по результатам испытаний на ударный изгиб

**Цель работы:** освоение методики определения сопротивления разрушению сварных соединений по результатам анализа поверхности излома образцов после испытаний на ударный изгиб.

### 2.1 Общие теоретические сведения

*Ударная вязкость* – один из показателей сопротивления металла разрушению, определяемый при динамических испытаниях на ударный изгиб. Призматические образцы с концентратором (надрезом) посередине разрушаются одним ударом маятникового копра, наносимого со стороны, противоположной надрезу. Значения ударной вязкости определяют как отношение работы, затраченной на разрушение образца, к площади поперечного сечения в плоскости надреза до испытаний.

Испытания на ударный изгиб проводятся с целью выявления склонности металлов и сварных соединений к разрушению. При испытании на ударный изгиб так же, как и при другом способе нагружения, в металле возникают нормальные и касательные напряжения. Наиболее опасными с точки зрения разрушения являются нормальные напряжения, прикладываемые перпендикулярно к плоскости концентратора (надреза). Образцы для испытаний подготавливаются в соответствии с СТБ EN 10045, а испытывают по СТБ EN 875. Разрушение образцов проводится с помощью маятникового копра (рисунок 2).

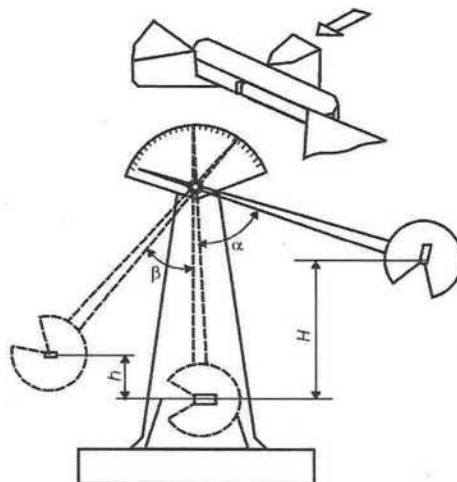


Рисунок 2 – Схема испытаний на ударный изгиб на маятниковом копре

Значения ударной вязкости ( $KC$ ) определяют по отношению работы  $A$ , затраченной на разрушение образца к площади его поперечного сечения в плоскости надреза  $F$  до испытания:

$$KC = A / F.$$

В зависимости от остроты надреза принимают, согласно СТБ EN 10045, следующие обозначения ударной вязкости: KCU – образец с U-образным надрезом (типа Менаже), радиус надреза –  $(1 \pm 0,07)$  мм; KCV – образец с V-образным надрезом типа Шарпи, радиус надреза –  $(0,25 \pm 0,025)$  мм; KCT – образец с V-образным надрезом типа Шарпи, который продолжен трещиной длиной не более 1 мм; DVTT – образец для определения доли волокна в изломе.

В зависимости от цели испытаний надрез в образце располагают по основному металлу, металлу шва или околошовному участку. Разметку для изготовления образца и нанесения надреза следует производить по макрошлифам, изготовленным из боковых граней заготовки в интересующем участке зоны термического влияния (ЗТВ).

Все образцы располагают поперек продольной оси испытуемого участка. При вырезке образцов не допускается нагрев или наклеп металла, которые могут повлиять на его механические свойства. Не допускаются к испытанию образцы со следами обработки на поверхности надреза, с искривлениями, закалочными и другими трещинами и с заусеницами.

Если материал должен работать в условиях низких температур, то испытания на ударный изгиб проводятся при отрицательных температурах. С этой целью образцы предварительно охлаждаются до температуры на  $2\text{ }^{\circ}\text{C} \dots 6\text{ }^{\circ}\text{C}$  ниже температуры испытания, например в смеси жидкого азота и эфира в криокамере. Температуры переохлаждения образцов указаны в ГОСТ 9454.

На основе опытных данных строят сериальные кривые и получают возможность оценить зависимость сопротивления разрушению металлов и сварных соединений от температуры эксплуатации конструкции.

Конструкционные стали, имеющие ОЦК-решетку, вследствие особенностей атомно-электронного строения обладают свойством изменять при определенной температуре механизм разрушения. Это свойство материала называется *хладноломкостью*, а температура, при которой осуществляется смена механизмов разрушения, – *температурой хрупкости*. Температура хрупкости материала является важнейшим критерием его надежности в работе и обязательно должна учитываться при выборе металла для конкретного назначения.

Различают два вида разрушения:

- 1) вязкое, которое сопровождается большой пластической деформацией, по размеру соизмеримой с поперечным сечением образца;
- 2) хрупкое, при котором размер зоны пластической деформации пренебрежительно мал по сравнению с поперечным сечением образца или размером трещины. Опасность хрупкого разрушения определяется большой скоростью распространения трещины, соизмеримой со скоростью распространения звука в металле (около 1800 м/с).

При хрупком разрушении человеку практически невозможно отреагировать на его опасность. Природа этого явления раскрыта А. Ф. Иоффе, предложившим весьма простую схему разрушения материала (рисунок 3).

Разрушение металла не будет происходить до тех пор, пока напряжения в образце не достигнут величины, равной сопротивлению отрыву  $S_{отр}$ , – величины, характеризующей предельный уровень напряжений в образце в момент его разрушения и определяемой по диаграмме истинных напряжений. При напряжениях в образце ниже этой величины металл деформируется без разрушения. В зоне I металл будет испытывать пластическое деформирование, в зоне II – упругое деформирование.

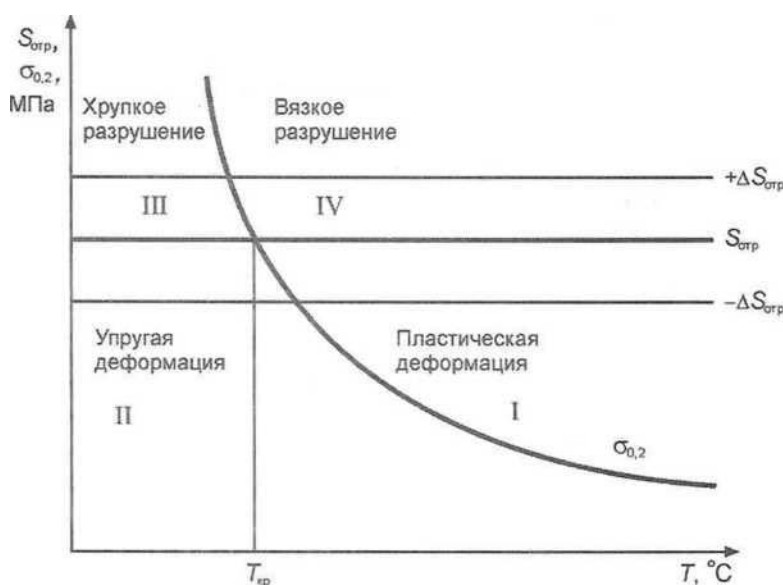


Рисунок 3 – Диаграмма разрушения металла

Достижение уровня напряжений, равного сопротивлению отрыва, приводит к разрушению образца. Механизм, по которому будет происходить это разрушение, значительным образом зависит от температуры. Изменение температуры практически не влияет на сопротивление отрыву, в то время как предел текучести изменяется весьма существенно. Достижение температуры, при которой  $\sigma_m = S_{отр}$ , определяет смену механизма разрушения. Критической температуре ( $T_{кр}$ ) соответствуют условия, при которых разрушение образца начинает происходить без пластической деформации, т. е. хрупко.

Такие условия, как правило, возникают при отрицательных температурах, когда металл не имеет площадки текучести. Область температур левее  $T_{кр}$  (зона III) соответствует условиям, когда хрупкое разрушение следует за упругой деформацией. Области вязкого разрушения (зона IV) при температуре больше  $T_{кр}$  предшествует пластическая деформация материала.

Изменение механизма разрушения, как правило, характеризуется не одним значением критической температуры, а протекает в некотором температурном интервале, называемом *температурным интервалом хрупкости*. Критический интервал хрупкости определяют по диаграммам изменения ударной вязкости в зависимости от температуры испытания (рисунок 4).

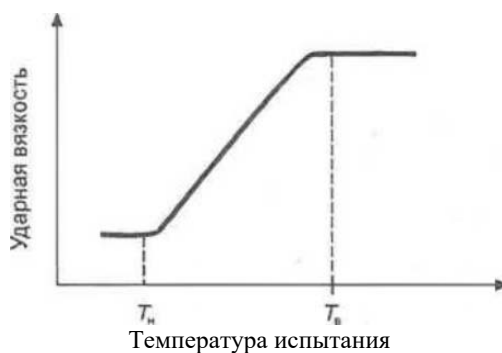


Рисунок 4 – Зависимость изменения ударной вязкости от температуры испытаний

На рисунке 4  $T_v$  – верхний температурный порог хрупкости. Он соответствует минимальной температуре, при которой происходит полностью вязкое разрушение. Температура  $T_n$  является нижним температурным порогом хладноломкости (хрупкости). Она соответствует практически полностью хрупкому разрушению материала.

Более точно температурные пороги устанавливают по изменению строения изломов. Вид излома является очень важным критерием вязкости металлов при ударных испытаниях. Наиболее общая черта практически всех изломов заключается в неоднородности их строения. Однородными изломами можно считать лишь весьма хрупкие изломы металлов (например, излом углеродистых сталей после разрушения при низких температурах).

В зависимости от механизма разрушения, который может быть вязким, хрупким или смешанным, его макро- и микроскопическое строение будет различным. Макроскопическое строение излома изучают при визуальном осмотре, а микроскопическое – специальными методами, например электронно-фрактографическими.

Макроскопический излом при вязком разрушении характеризуется волокнистостью, матовой, сильно шероховатой поверхностью (рисунок 5, а). При хрупком разрушении поверхность излома имеет кристаллическое строение и характерный блеск (рисунок 5, б). При смешанном строении – поверхность образца состоит из участков обоих типов (рисунок 5, в).

Чем больше доля вязкой составляющей в изломе, тем выше сопротивление металла разрушению, тем большая деформация предшествует разрушению.

Результаты анализов изломов образцов после серийных испытаний на ударный изгиб целесообразно представлять в виде графиков, построенных в координатах: «процент волокна в изломе», равный разнице между исходной площадью поперечного сечения образца и долей кристаллической составляющей, занятой блестящей поверхностью – «температура испытания» (рисунок 6).

С помощью таких кривых можно оценить минимальную критическую температуру эксплуатации материала или сварного соединения. Эта температура будет соответствовать нормативному количеству вязкой составляющей в изломе. Например, для целого ряда сварных конструкций процент волокна в изломе должен быть не менее 50 %, а критическая температура в этом случае обозначается как  $T_{50}$  и называется *критической*

температурой хрупкости. Положение  $T_{50}$  относительно температуры эксплуатации определяет запас вязкости материала.

Оценить критическую температуру хрупкости  $T_{50}$  расчетным путем можно, согласно ВРД 22-2826-98, на основании металлографического анализа металлов по следующей формуле:

$$T_{50} = -41 + 0,63HV - 65,8d_{эф}^{-1/2},$$

где  $d_{эф}$  – эффективный размер зерна, мм.

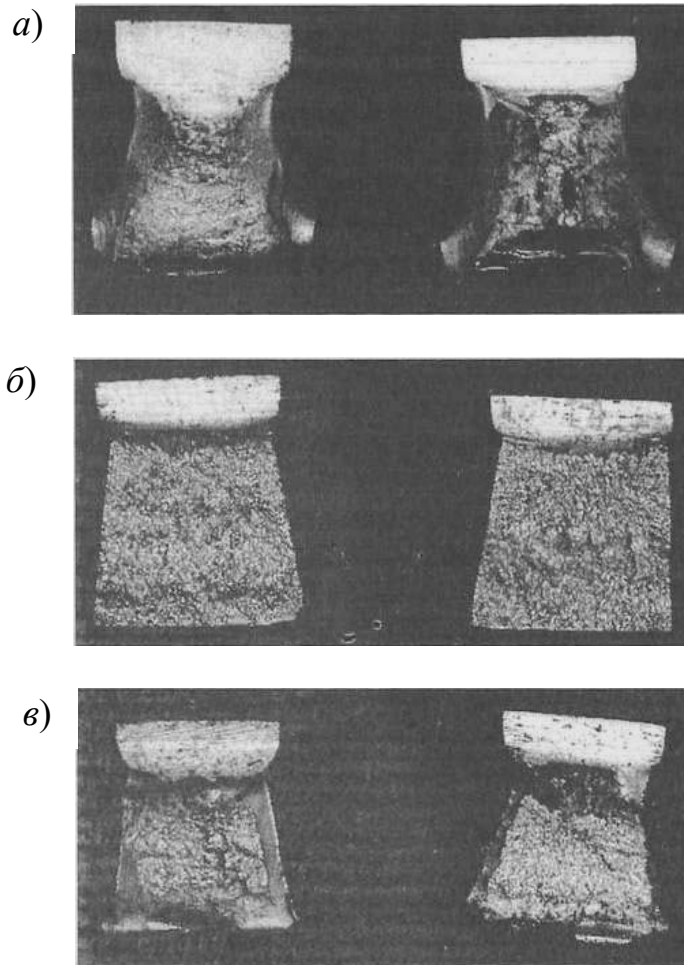
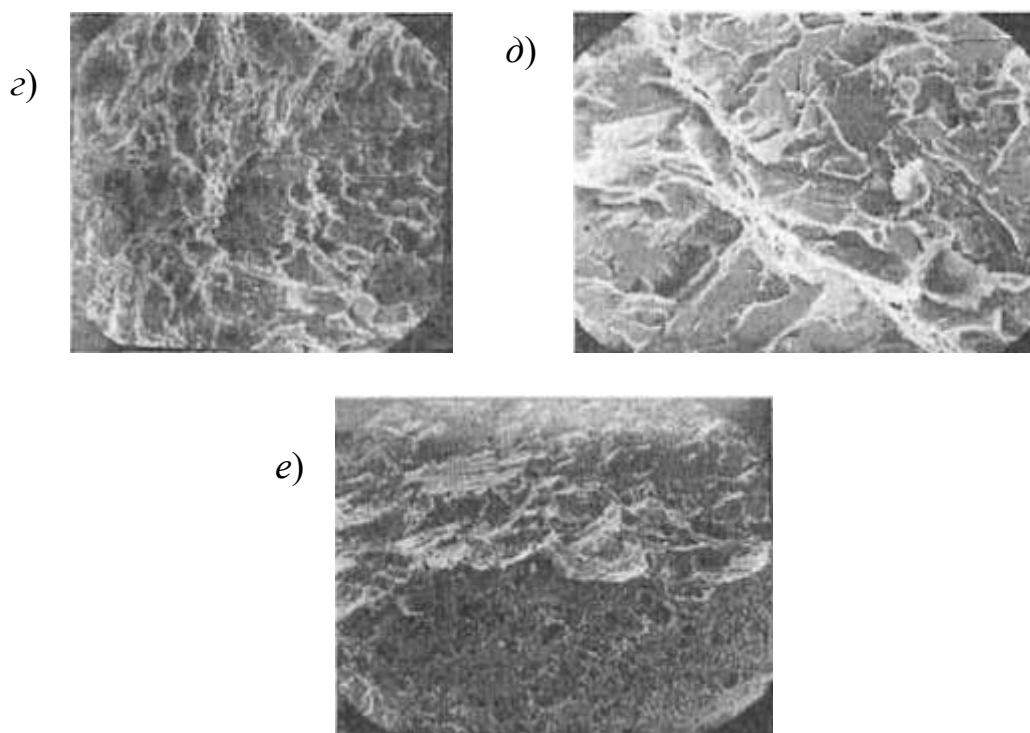


Рисунок 5 – Макроизломы поверхности образцов при вязком (а), хрупком (б) и смешанном (в) разрушениях и фрактограммы поверхности излома – области вязкого (г), хрупкого (д) и смешанного (е) разрушений





Окончание рисунка 5

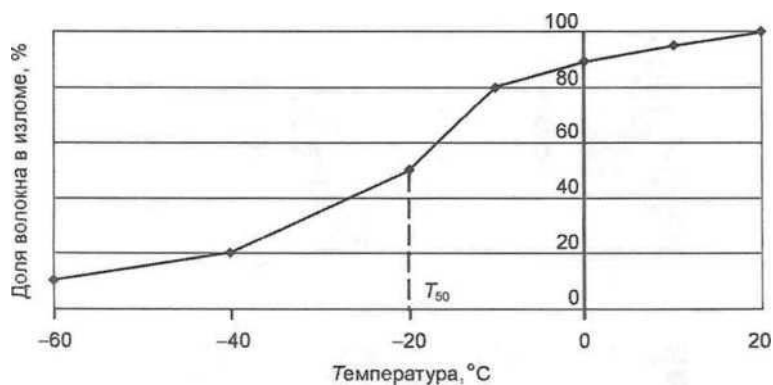


Рисунок 6 – График зависимости доли волокна в изломе от температуры испытания

Удар по образцу наносится со стороны, противоположной надрезу. После удара по образцу маятник, падающий под действием собственного веса, отклоняется на некоторый угол  $\beta$ .

Зная массу маятника  $P$ , его длину  $L$ , величину угла  $\alpha$  (см. рисунок 2) подъема перед ударом, можно рассчитать работу разрушения образца  $A$ , Дж, по формуле

$$A = P \cdot (H - h),$$

где  $H$  – первоначальная высота подъема маятника, м;  $H = L (1 - \cos \alpha)$ ;  $h$  – остаточная высота подъема маятника, м;  $h = L (1 - \cos \beta)$ .

Как правило, значения работы разрушения образца фиксируются на шкале

установки. Если материал должен работать в условиях низких температур, то испытания на ударный изгиб проводятся при отрицательных температурах. С этой целью образцы предварительно охлаждаются до температуры испытания, например в смеси жидкого азота и эфира. На основе опытных данных строят кривые и получают возможность оценить зависимость сопротивления разрушению металлов и сварных соединений от температуры эксплуатации конструкции.

Различают вязкое, хрупкое и смешанное разрушения. Критический интервал хрупкости определяют по диаграммам изменения  $KC$  в зависимости от температуры испытания. Результаты анализов изломов образцов после испытаний на ударный изгиб целесообразно представить в виде графиков, построенных в координатах: «процент волокна в изломе – температура испытания». С помощью таких кривых можно оценить минимальную критическую температуру эксплуатации материала или сварного соединения  $T_{50}$ . Эта температура будет соответствовать нормативному количеству вязкой составляющей в изломе ( $B = 50\%$ ).

Анализ поверхностей изломов ударных образцов также позволяет оценить их сопротивление распространению трещины. Известно, что полная работа разрушения  $KC$  состоит из работы зарождения  $KC_3$  и распространения  $KC_P$  трещины. Необходимо учитывать, что в реальных сварных соединениях всегда имеются так называемые структурные концентраторы напряжений (неметаллические включения, микротрещины и др.). Эти дефекты следует рассматривать как острые трещины. Поэтому показатель  $KC_P$  в наибольшей степени характеризует сопротивление металла динамическим нагрузкам. Существуют различные способы разделения ударной вязкости на составляющие. В данной лабораторной работе воспользуемся методикой, предусматривающей изучение поверхностей разрушения ударных образцов.

На рисунке 7 схематически представлено строение поверхности, полученной после испытания на ударный изгиб.

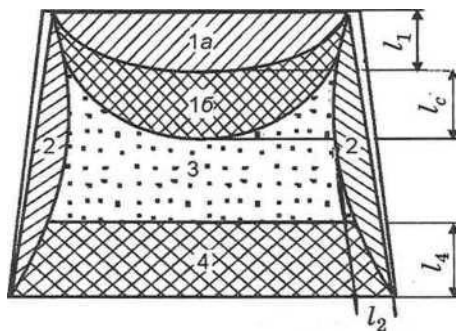


Рисунок 7 – Строение поверхности излома образца после испытания на ударный изгиб

В связи с действием разных микромеханизмов разрушения и формированием различного напряженно-деформированного состояния по сечению образца можно выделить зоны:

- 1а – зарождения трещины;
- 1б – стабильного роста трещин;

- 2 – зарождения трещины (боковая);
- 3 – хрупкого разрушения;
- 4 – долома.

Зоны 1а и 2 образованы по сдвиговому типу (под действием касательных напряжений), зоны 1б, 3 и 4 – в условиях нормального отрыва (под действием нормальных напряжений). Обычно в зонах 1а, 1б, 2 и 4 разрушение идет по вязкому, а в зоне 3 по хрупкому механизмам.

Работу зарождения и распространения трещины в общем виде можно представить следующим образом:

$$KC_3 = KC_3^B + KC_3^X, KC_p = KC_p^B + KC_p^X,$$

где  $KC^B$ ,  $KC^X$  относятся к вязкому и хрупкому типу разрушения соответственно.

Поскольку значения  $KC_3^X$  и  $KC_p^X$  низкоуглеродистых и низколегированных сталей малы ( $\ll 0,02$  МДж/м<sup>2</sup>) и достоверность их замеров невелика, а  $KC_3^B \gg KC_3^X$ ,  $KC_p^B \gg KC_p^X$ , этими составляющими можно пренебречь.

Тогда

$$KC \approx KC_3^B + KC_p^B.$$

Работу  $KC_p^B$  определяют по выражению

$$KC_p^B = KC_p^{B(V)} B,$$

где  $B$  – доля вязкой составляющей в изломе;

$KC_p^{B(V)}$  – удельная работа распространения вязкой трещины в условиях нормального отрыва, т. е. работа, затраченная на образование единицы поверхности вязкого разрушения.

Суммарная площадь зон вязкого разрушения  $S_B$  может быть определена визуально или по формуле (если пренебречь криволинейной формой этих зон)

$$S_B = (l_1 + l_c + l_4)b + 2l_2h - 2l_2(l_1 + l_c + l_4),$$

где  $b$  и  $h$  – толщина и ширина образца в сечении под надрезом соответственно. Величина  $S_B$  связана с  $B$  соотношением

$$B = S_a / (bh).$$

Удельная работа распространения вязкой трещины является характеристикой структурного состояния материала, формирующегося в зависимости от его химического состава, исходного состояния, параметров процесса сварки и термической обработки. Она не зависит от температуры испытания. Значения  $KC_p^{B(V)}$  определяют, как тангенс угла наклона касательной к кривой зависимости  $KC = KC(B)$ .

## **2.2 Порядок проведения работы**

2.2.1 Изучить теоретическую часть работы.

2.2.2 Получить у преподавателя набор изломов и результаты испытаний ударных образцов исследуемой стали или сварных соединений.

2.2.3 Построить зависимость изменения ударной вязкости от температуры испытания и определить температуру перехода от вязкого к хрупкому разрушению.

2.2.4 Оценить долю вязкой составляющей  $B$  в изломах изучаемых образцов.

2.2.5 Построить зависимость изменения процента волокна в изломе от температуры испытаний и определить  $T_{50}$ .

2.2.6 Построить зависимость изменения ударной вязкости от доли волокна в изломе.

2.2.7 Рассчитать по графикам значения  $KC$ ,  $KCI$ ,  $KC^*$ .

2.2.8 Сопоставить значения  $KC^{*(v)}$  и  $T_{50}$  для исследованных сварных соединений и оценить, какие из них обладают большим сопротивлением разрушению.

2.2.9 Оформить отчет.

## **2.3 Содержание отчета**

2.3.1 Цель работы.

2.3.2 Теоретические аспекты исследуемых вопросов.

2.3.3 Результаты испытаний на ударную вязкость.

2.3.5 Выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

1 Что такое температурный интервал хрупкости?

2 Теоретические аспекты исследуемых вопросов.

3 Какова сущность метода испытания на ударный изгиб?

4 Чем отличается энергия удара от ударной вязкости?

5 Какой внешний вид вязкого разрушения?

## **3 Лабораторная работа № 3. Оценка влияния режимов сварки на структуру разнородного сварного соединения**

**Цель работы:** оценка влияние погонной энергии сварки на структуру разнородного сварного соединения.

### **3.1 Общие теоретические сведения**

Одной из главных характеристик свариваемости сталей перлитного класса (углеродистых и низколегированных) является их склонность к закалке и образованию трещин в зоне влияния термического цикла сварки, которая зависит в первую очередь от химического состава стали.

Основным элементом, определяющим склонность перлитных сталей к закалке при сварке, является углерод. Поэтому оценка влияния химического состава на свариваемость углеродистых сталей производится по содержанию в них углерода.

Углеродистые стали, содержащие до 0,25 % углерода, практически не закаляются при всех известных способах сварки с использованием режимов в широких пределах, т. е. обладают хорошей свариваемостью. Однако при сварке сталей больших толщин это не исключает необходимости подогрева или отпуска, а иногда совместно того и другого.

При более высоком содержании углерода начинает проявляться склонность стали к закалке при сварке тем интенсивнее, чем больше содержание углерода в ней и чем больше скорость охлаждения околошовной зоны при выбранных режимах сварки.

Для предотвращения образования хрупких мартенситных прослоек в зоне термического влияния, которые могут привести к образованию трещин, требуется применение специальных технологических мер (разработка оптимальных режимов и последовательности сварки, предварительный подогрев и т. д.).

Дополнительное легирование перлитных сталей хромом, никелем, марганцем, молибденом и другими элементами повышает их склонность к образованию в околошовной зоне неравновесных структур вследствие закалки, поэтому для оценки влияния химического состава низколегированных перлитных сталей на их свариваемость, кроме содержания углерода, необходимо учитывать также содержание остальных легирующих элементов, снижающих скорость распада аустенита. Это учитывается путем пересчета содержания каждого легирующего элемента в стали в эквивалентное по действию на ее закаляемость количество углерода с использованием переводных коэффициентов, подобранных экспериментально. Суммарное содержание в низколегированной стали углерода и пересчитанных эквивалентных ему количеств легирующих элементов получило название эквивалента углерода.

Для расчета эквивалента углерода предложено большое количество эмпирических формул, позволяющих оценивать влияние химического состава низколегированных сталей на их свариваемость и устанавливать необходимость подогрева стали перед сваркой или даже вычислять требуемую температуру предварительного подогрева.

Подогрев обеспечивает снижение скорости охлаждения металла шва и околошовной зоны, что оказывает решающее влияние на образование их конечных структур и свойств при сварке закаляющихся сталей.

Определение критических скоростей охлаждения сталей при термической обработке производят обычно по диаграммам изотермического и термокинетического распада переохлажденного аустенита. Для наиболее широко распространенных в промышленности марок углеродистых и низколегированных сталей такие диаграммы построены и опубликованы.

Более точные значения критических скоростей – охлаждения при сварке и соответствующих им структур в зоне термического влияния – могут быть определены по кривым анизотермического превращения данной стали, построенным по результатам скоростных дилатометрических испытаний при непрерывном быстром охлаждении, соответствующем условиям сварки.

Для ряда закаливающихся сталей расчетные и экспериментальные значения скоростей охлаждения околошовной зоны, обеспечивающие отсутствие трещин и получение оптимальных механических свойств, приведены в СТБ ЕН 1011-2.

Производственный опыт показывает, что при сварке сталей повышенной прочности отсутствие трещин достигается, если скорость охлаждения обеспечивает образование мартенсита в структуре околошовной зоны не более 25 %...30 %.

Наиболее эффективным и технологичным способом уменьшения скорости охлаждения околошовной зоны при сварке является предварительный подогрев свариваемого металла, которым широко пользуются на практике.

При выборе температуры предварительного подогрева закаливающихся сталей необходимо учитывать, что если пониженный подогрев приводит к образованию большого количества мартенсита в структуре металла околошовной зоны и возможности появления холодных трещин, то излишне высокий подогрев может вызвать резкое снижение пластичности и особенно ударной вязкости стали вследствие чрезмерного роста зерен. Этому способствуют длительные выдержки при температурах выше температуры начала интенсивного роста зерен аустенита  $A_{c3} + 100$  °С.

Конструкционные и теплоустойчивые стали перлитного класса разделены на шесть групп, которые могут комбинироваться в сварных соединениях в 21 сочетании.

При выборе электродов для сварки различных сочетаний углеродистых и низколегированных сталей основным требованием является обеспечение необходимого уровня механических свойств соединений при нормальной температуре, а для теплоустойчивых хромомолибденовых и хромомолибденовых, дополнительно легированных различными карбидообразующими элементами, – обеспечение требуемого уровня жаропрочных свойств.

Рекомендации по выбору электродов для комбинированных соединений из сталей перлитного класса приведены исходя из условий равнопрочности металла шва с наименее прочной сталью, входящей в данное соединение (по пределу прочности на растяжение).

При отсутствии необходимости соблюдения условий равнопрочности металла шва и основного металла, для сварки любого сочетания перлитных сталей могут применяться электроды других типов (марок) как более, так и менее прочные.

Сварку закаливающихся сталей следует выполнять, как правило, с предварительным подогревом во избежание образования околошовных трещин.

Сварку без подогрева можно производить только в тех случаях, когда при принятых режимах сварки обеспечивается максимальная твердость околошовной зоны до НВ 260 включительно.

Практически при обычных режимах ручной дуговой сварки это достигается при величине эквивалента углерода указанных сталей не более 0,35 %. Важным условием для применения сварки закаливающихся сталей без подогрева является также отсутствие в конструкции жесткого контура и концентраторов напряжений.

Для сварки без подогрева перлитных закаливающихся сталей, работающих при нормальных температурах, целесообразно применение аустенитных электродов типов ЭА-3Мб, ЭА-1Гб и ЭА-2Гб, обеспечивающих отсутствие трещин в швах и околошовной зоне за счет повышенного запаса аустенитности наплавленного металла, что позволяет сохранить пластичную аустенитную структуру металла шва даже при значительном перемешивании перлитной стали с расплавленным электродным металлом.

Наличие пластичного аустенитного шва обеспечивает также большую деформационную способность сварного соединения, что уменьшает возможность образования холодных околошовных трещин в закаленной перлитной стали.

Применение аустенитных электродов для сварки перлитных закаливающихся сталей рекомендуется также в тех случаях, когда после сварки конструкция не может быть подвергнута отпуску для снятия остаточных сварочных напряжений и снижения твердости подкаленных участков околошовной зоны.

### ***3.2 Оборудование, приборы и материалы***

3.2.1 Пост ручной дуговой сварки.

3.2.2 Ленточнопильный станок.

3.2.3 Электроды типа 08Х21Н10Гб.

3.2.4 Сталь 45.

### ***3.3 Порядок проведения работы***

3.3.1 Выполнить контрольное сварное соединение.

3.3.2 Сделать шлиф.

3.3.3 Измерить твердость зоны термического влияния.

3.3.4 Оформить результаты работы.

3.3.5 По диаграмме Шеффлера определить структуру сварного шва при доле участия основного металла 40 % и 60 %.

### ***3.4 Содержание отчета***

3.4.1 Название и цель работы.

3.4.2 Химический состав исследуемых материалов.

3.4.3 Результаты измерения твердости.

3.4.4 Выводы по работе.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Какова доля участия основного металла в металле сварного шва?
- 2 Какова сущность измерения твердости по Виккерсу?
- 3 Как пользоваться диаграммой Шеффлера для определения структуры сварного шва?
- 4 Как рассчитать эквивалент углерода?
- 5 Как рассчитать эквивалент никеля?

## **4 Лабораторная работа № 4. Оценка влияния состава сварочных материалов на структуру разнородного сварного соединения**

***Цель работы:*** оценка влияние химического состава сварочных материалов на структуру разнородного сварного соединения.

### ***4.1 Общие теоретические сведения***

Металл шва сварного соединения, выполненного из сталей разных структурных классов, всегда отличается по составу и структуре хотя бы от одной из сваренных сталей, и гетерогенность сварного соединения существенно влияет на его технологическую и эксплуатационную прочность. Допустимая доля участия в шве проплавленного основного металла зависит от сочетания увариваемых сталей и состава используемых сварочных материалов.

При сварке сталей разных структурных классов необходимо всегда выбирать режимы сварки, обеспечивающие минимальное проплавление и перемешивание основного металла с наплавленным. Степень проплавления одной из кромок относительно другой ( $K$ ) в разнородном соединении зависит от теплопроводности свариваемых металлов. Например, проплавление аустенитных сталей на 30 %...40 % больше, чем перлитных и ферритных (при одинаковых режимах сварки), поэтому для аустенитных сталей  $K = 0,6$ .

Предварительная оценка структуры и свойств различных участков шва при определенных степенях проплавления основного металла и использований различных сварочных материалов может производиться по структурной диаграмме Шеффлера.

В пределах одного валика состав шва достаточно однороден вследствие интенсивного перемешивания металла в сварочной ванне, кроме узкого слоя шириной 0,2...0,4 мм, примыкающего к линии сплавления шва с основным металлом.

В зоне сплавления разнородных сварных соединений наряду с кристаллизационными прослойками могут образовываться и развиваться диффузионные прослойки в процессе сварки, термической обработки и эксплуатации изделий при повышенных температурах, что часто приводит к разрушениям разнородных соединений вблизи зоны сплавления. В стали наиболее



подвижным легирующим элементом является углерод, перераспределение которого и определяет в основном образование диффузионных прослоек в зоне сплавления сварных соединений. Скорость диффузии углерода в ферритной фазе значительно больше, чем в аустенитной. Вследствие диффузии углерода образуются обезуглероженные и науглероженные зоны вблизи линии сплавления, что легко устанавливается металлографическим анализом, измерением твердости и методом радиоактивных изотопов.

Диффузия углерода начинает проявляться при воздействии температуры от 425 °С, а при температуре выше  $A_{c3}$  образовавшиеся диффузионные прослойки начинают исчезать.

Диффузия углерода наблюдается при его содержании выше предела растворимости и для многокомпонентных систем определяется не градиентом концентрации, а градиентом химического потенциала системы, т. к. всякая система стремится к минимальной свободной энергии. Поэтому диффузия элемента не всегда направлена в область меньших концентраций.

Отклонение от поведения идеальных растворов может быть настолько велико, что градиент концентрации и градиент химического потенциала или градиент активности могут быть различного знака, что приводит к отрицательной «восходящей» диффузии.

Образование диффузионных прослоек происходит: в процессе сварки при контакте жидкого металла с твердым основным вследствие большой растворимости углерода в жидком растворе железа; при охлаждении с высоких температур затвердевшего металла после сварки; при термической обработке сварных соединений или при их эксплуатации при температуре выше 425 °С.

Процессы диффузии в твердом состоянии обусловлены «реактивной» диффузией при различном содержании карбидообразующих элементов в основном и наплавленном металлах, а также различной растворимостью углерода в ферритной и аустенитной фазах при контакте перлитной или ферритной стали с аустенитной.

Снижение концентрации углерода на границе сплавления перлитных и ферритных сталей происходит за счет его перехода в аустенитную сталь, где термодинамическая активность углерода ниже. Разность концентраций углерода в растворе на границе сплавления и в слоях перлитных и ферритных сталей, удаленных от границы сплавления, служит движущей силой образования обезуглероженной и науглероженной зон, ухудшающих свойства разнородных сварных соединений при длительном нагреве их выше температуры 425 °С. При длительных выдержках выше 650 °С в обезуглероженной зоне происходит сильный рост ферритных зерен вследствие процесса собирательной рекристаллизации.

Чем более сильные карбидообразующие элементы содержит металл шва (Cr, W, V, Nb, Ti), тем сильнее обезуглероживается околошовная зона и тем быстрее происходит рост зерен в обезуглероженной зоне вследствие собирательной рекристаллизации и, наоборот, если шов легирован слабыми карбидообразователями (например, Mn), то даже при содержании углерода в обезуглероженной прослойке около 0,02 %, собирательная рекристаллизация

значительно замедляется. Термические напряжения и деформации в околошовной зоне оказывают большое влияние на процесс собирательной рекристаллизации. Поэтому в сварных соединениях аустенитной стали с перлитной или ферритной вследствие большой разности коэффициентов теплового расширения рост зерен в обезуглероженной зоне происходит интенсивнее, чем в сварных соединениях перлитной стали с высокохромистой ферритной или в соединениях перлитной стали, выполненных электродами на никелевой основе, т. е. в случаях когда различие в коэффициентах теплового расширения минимально.

Для сварных соединений разных структурных классов, эксплуатирующихся при повышенных температурах (выше 350 °С) важно, чтобы швы были удалены от участков повышенной жесткости и максимальных рабочих напряжений. В шве и околошовной зоне разнородных сварных соединений должны быть сведены к минимуму концентраторы напряжений, для чего целесообразна механическая обработка наружной и внутренней поверхностей швов с обеспечением плавных переходов от шва к основному металлу.

## ***4.2 Оборудование, приборы и материалы***

4.2.1 Пост ручной дуговой сварки.

4.2.2 Ленточнопильный станок.

4.2.3 Электроды типа 07Х23Н13, 04Х16Н25АМ6.

4.2.4 Сталь 40Х.

## ***4.3 Порядок проведения работы***

4.3.1 Выполнить два контрольных сварных соединений.

4.3.2 Сделать шлифы.

4.3.3 Измерить твердость зоны термического влияния.

4.3.4 Оформить результаты работы.

4.3.5 По диаграмме Шеффлера определить структуру сварных швов при доле участия основного металла 40 % и 60 %.

## ***4.4 Содержание отчета***

4.4.1 Название и цель работы.

4.4.2 Химический состав исследуемых материалов.

4.4.3 Результаты измерения твердости.

4.4.4 Ожидаемая структура сварных соединений.

4.4.5 Выводы по работе.

## ***Контрольные вопросы***

1 Какова доля участия основного металла в металле сварного шва?

2 Какова схема измерения микротвердости?

- 3 Как пользоваться диаграммой Шеффлера для определения структуры сварного шва?
- 4 Как рассчитать эквивалент углерода?
- 5 Как рассчитать эквивалент никеля?
- 6 Какие химические элементы являются графитизаторами?

### **Список литературы**

- 1 **Куликов, В. П.** Технология сварки плавлением и термической резки: учебник / В. П. Куликов. – Минск: Новое знание, 2019. – 463 с.: ил.