

К. В. БАГРЯНСКИЙ, Г. С. КУЗЬМИН

# СВАРКА НИКЕЛЯ И ЕГО СПЛАВОВ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

*Москва 1963*

**6П4.3**  
**Б14**

В книге изложены основные сведения о свойствах никеля и некоторых его сплавов. Рассмотрены наиболее существенные физико-химические процессы и структурные изменения, происходящие при сварке этих металлов. Описаны конструктивные особенности сварных соединений из никеля. Приведены данные о применяющихся в настоящее время материалах для сварки никелевых изделий — составы присадочных проволок, покрытий электродов, флюсов и т. п. Рассмотрена технология существующих способов ручной и механизированной сварки, а также обобщен имеющийся отечественный опыт изготовления химической аппаратуры из никеля и его сплавов.

Книга предназначена для научных работников, инженеров и техников, работающих в области сварки.

Рецензент канд. техн. наук *В. И. Дятлов*  
Редактор *К. В. Сингоевский*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Сварка является одним из наиболее передовых и прогрессивных методов обработки металлов.

Именно поэтому партия и правительство уделяют огромное внимание развитию сварочной науки и техники. Состоявшийся в июне 1960 г. Пленум ЦК КПСС, обсудив вопросы развития сварки и внедрения ее в производство, утвердил программу дальнейшего ускоренного развития всех отраслей сварочной науки и техники, указал на необходимость дальнейшего изучения и совершенствования всех видов сварки.

За последние годы в Советском Союзе достигнуты большие успехи в создании новых видов сварочной техники и разработке высокопроизводительных методов сварки различных легированных сталей, цветных и редких металлов, а также их сплавов.

Дальнейшее внедрение в производство передовой сварочной техники и технологии открывает широкие возможности повышения производительности труда, значительной экономии металлов, улучшения качества и снижения себестоимости продукции.

При современном уровне развития производства к некоторым конструкциям предъявляются повышенные требования в отношении жаропрочности, стойкости против коррозии, постоянства механических свойств при пониженных и повышенных температурах и т. д. Одним из металлов, наиболее полно удовлетворяющих большинству перечисленных требований, является технически чистый никель и сплавы на его основе. Поэтому как конструкционный материал никель находит все большее применение в химической промышленности, авиации, энергетике, ракетной технике и других отраслях промышленности.

Однако при сварке никеля встречаются значительные затруднения — очень часто наблюдается большая склонность сварных швов к образованию пор, горячих трещин и других дефектов.

Относительно плохая свариваемость, отсутствие простого надежного, производительного и экономически выгодного способа сварки, обеспечивающего высокие качества сварных соединений, ограничивали возможность применения никеля в сварных конструкциях.

Сварка никеля до последнего времени выполнялась вручную в среде защитных газов, ацетилено-кислородным пламенем, реже — дугой с применением угольных или металлических электродов. При этом приходилось принимать специальные меры для получения удовлетворительного качества сварных соединений. В большинстве случаев эти меры оказывались недостаточными, а качество сварных соединений получалось низким.

Отсутствие в литературе технологических указаний по изготовлению никелевых конструкций и возникающие на ряде промышленных предприятий затруднения при сварке никеля приводят к производственным неудачам и большому расходу дорогостоящих материалов.

Настоящая работа написана в основном по материалам исследований теоретических и технологических основ сварки никеля, проведенных авторами в лаборатории сварки Ждановского металлургического института. В книге освещен также опыт промышленного применения новых методов сварки при изготовлении различной никелевой аппаратуры.

При исследованиях большая помощь авторам была оказана коллективами кафедры сварки Ждановского металлургического института, Бердичевского завода «Прогресс», Киевского завода «Большевик», НИИХИМ-МАШем и др.

Проблема сварки никеля и его сплавов достаточно многосторонняя и сложная, поэтому авторы не претендуют на полноту освещения всех ее вопросов и будут благодарны за критические замечания по существу темы.

---

## I. СВОЙСТВА НИКЕЛЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Физические, химические, механические и другие свойства никеля подвергались разносторонним и весьма глубоким исследованиям как в Советском Союзе, так и за рубежом. Слишком подробное изложение результатов этих исследований не вызывается необходимостью, а потому в настоящей главе приведены сведения только о таких физических и химических свойствах никеля, которые оказывают наибольшее влияние на его свариваемость, определяют выбор метода и технологических параметров сварки.

### Физические свойства никеля

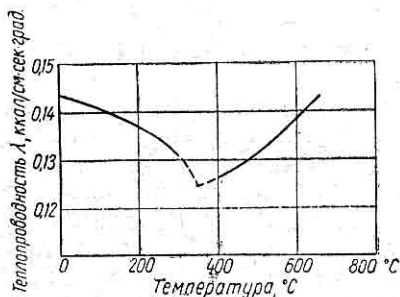
Атомный вес 58,69. Для никеля свойственна гранецентрированная кристаллическая решетка с параметром  $a = 3,5168 \text{ \AA}$  и межатомным расстоянием  $2,486 \text{ \AA}$ . Удельный вес технических марок никеля с содержанием 98,5—99,5% составляет 8,7—8,84 г/см<sup>3</sup>.

Температура плавления никеля в зависимости от степени его чистоты лежит в пределах 1452—1455° С, а температура кипения при атмосферном давлении по различным данным равна 2730—3080° С.

Средняя удельная теплоемкость никеля в интервале температур 20—1630° С несколько меньшая, чем у железа, и равна 0,1783 кал/г·град.

Теплопроводность технического никеля в интервале температур 20—100° С равна 0,1428 кал/см·сек·град. С повышением температуры до 360° С (точка Кюри) теплопроводность никеля плавно понижается. При этой температуре кривая теплопроводности имеет точку минимума, от которой начинается возрастающая ветвь кривой при дальнейшем повышении температуры (фиг. 1). Коэффициент линейного расширения никеля тем больше, чем выше чистота металла. Численные значения

коэффициента линейного расширения технического никеля (чистотой 99,1%) при различных температурах приведены в табл. 1. Чем выше чистота никеля, тем резче проявляется неправильность в ходе изменения коэффициента линейного расширения вблизи точки магнитного превращения.



Фиг. 1. Теплопроводность никеля в зависимости от температуры.

При низких температурах никель (чистотой 99,8%) не обнаруживает ненормальностей в изменении линейных размеров с изменением температуры. Данные, характеризующие изменение длины образца такого никеля в зависимости от температуры, приведены в табл. 2.

Таблица 1

**Коэффициент линейного расширения никеля в зависимости от температуры [1]**

Температура, °C	Средний коэффициент, 10 <sup>6</sup>	Температура, °C	Средний коэффициент, 10 <sup>6</sup>
25—100	13,3	350—400	16,4
25—300	14,4	400—500	15,9
25—600	15,5	500—600	16,9
25—900	16,3	600—700	17,1
100—200	14,4	700—800	17,7
200—300	15,4	800—900	18,6
300—350	17,2		

Таблица 2

**Изменение коэффициента линейного расширения никеля при низких температурах [1]**

Температура, °C	Изменение длины, мм/м	Температура, °C	Изменение длины, мм/м
0 до — 20	0,2466	—100 до —120	0,2002
—20 до — 40	0,2405	—120 до —140	0,1849
—40 до — 60	0,2317	—140 до —160	0,1638
—60 до — 80	0,2234	—160 до —183	0,1549
—80 до —100	0,2135	—183 до —195	0,0629

Удельное электросопротивление с повышением степени чистоты никеля уменьшается, а температурный коэффициент электросопротивления увеличивается. Данные об электрических свойствах никеля (чистотой 99,35%) при различных температурах приведены в табл. 3.

Таблица 3

Изменение электрических и термоэлектрических свойств никеля в зависимости от температуры [2]

Температура, °С	Удельное электросопротивление, $\frac{\text{мм}^2}{\text{ом} \cdot \text{м}}$	$\frac{f_t}{P t_0}$	Температурный коэффициент электросопротивления	Термоэлектродвижущая сила в паре с платиной при холодном спае, 0° С
0	0,082	1,000	—	0
100	0,120	1,463	0,004630	—1,85
200	0,175	2,140	0,004580	—3,43
300	0,258	3,150	0,003220	—4,86
400	0,330	4,030	0,002790	—5,77
500	0,370	4,520	0,001210	—6,50
600	0,405	4,840	0,000946	—7,30
700	0,440	5,370	0,000865	—8,30
800	0,473	5,740	0,000750	—9,65
900	0,510	6,220	0,000780	—
1 000	0,550	6,740	0,000785	—

Никель относится к ферромагнитным материалам. Одним из его важных магнитных свойств является магнитострикция, т. е. относительное изменение длины ферромагнитного тела при намагничивании. В зависимости от напряженности магнитного поля никель соответственно укорачивается. Магнитострикция никеля чистотой 99,95% равна  $32 \cdot 10^{-6}$ .

### Механические свойства никеля

Заводами Советского Союза по ГОСТ 849-56 и 492-52 изготавливаются пять марок никеля чистотой от 97,6 до 99,99%. Такой никель предназначается для дальнейшей переработки на полуфабрикаты (листы, ленты, полосы, прутки и проволоку), изготовления сплавов на никелевой основе и т. д. Химический состав различных марок никеля приведен в табл. 4 и 5.

Различные полуфабрикаты из никеля находят все более широкое применение во многих отраслях техники и промышленности.

Таблица 4

## Химический состав металлургического никеля по ГОСТ 849-56 [3]

Марка никеля	Содержание элементов, %								
	Ni	Co	C	Mg	Al	Si	P	S	Mn
H-0	99,99	0,005	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
H-1	99,93	0,10	0,01	0,001	—	0,002	0,001	0,001	—
H-2	99,8	0,15	0,02	—	—	0,002	—	0,003	—
H-3	98,6	0,7	0,1	—	—	—	—	0,03	—
H-4	97,6	0,7	0,15	—	—	—	—	0,04	—

Продолжение табл. 4

Марка никеля	Содержание элементов, %								
	Fe	Cu	Zn	As	Cd	Sn	Sb	Pb	Bi
H-0	0,002	0,001	0,001	0,001	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
H-1	0,01	0,02	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
H-2	0,04	0,04	0,005	—	—	—	—	—	—
H-3	—	0,6	—	—	—	—	—	—	—
H-4	—	1,0	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 5

## Химический состав полуфабрикатного никеля по ГОСТ 492-52 [3]

Марка никеля	Содержание элементов, %								
	Ni+Co	C	Mg	Al	Si	P	S	Mn	Fe
НП-0	99,98	0,005	0,003	—	0,003	0,001	0,001	0,002	0,007
НП-1	99,9	0,01	0,01	—	0,03	0,001	0,001	0,002	0,04
НП-2	99,5	0,10	0,10	—	0,15	0,002	0,005	0,05	0,10
НП-3	99,3	0,15	0,10	—	0,15	—	0,015	0,20	0,15
НП-4	99,0	0,20	0,10	—	0,15	—	0,015	0,20	0,30

Продолжение табл. 5

Марка никеля	Содержание элементов, %								
	Cu	Zn	As	Cd	Sn	Sb	Pb	Bi	Всего
НП-0	0,001	0,002	0,001	0,0003	0,001	0,0003	0,0003	0,0003	0,02
НП-1	0,015	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,1
НП-2	0,10	0,007	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,5
НП-3	0,15	—	—	—	—	—	—	—	0,7
НП-4	0,15	—	—	—	—	—	—	—	1,0

Сортамент, назначение и свойства технического никеля приведены в табл. 6.



Таблица 6  
Сортамент, назначение и свойства технического никеля [3]

Виды полуфабрикатов	ГОСТ	Размеры, мм	Назначение	Состояние материала	Свойства, не менее	
					$\sigma_b$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %
Ленты	2170-49	Толщина 0,05—1,2, ширина 10—300	Для изготовления деталей электротехнических машин и приборов, деталей различных устройств во многих отраслях машиностроения	Мягкий, толщиной в мм: 0,1—0,25 0,3—0,50 0,6—1,2 Твердый	40 35 40 55	35 35 35 2
Листы горячекатаные	6235-52	Толщина 5—10, ширина 500—710, длина 500—2000	Для изготовления аппаратов и других устройств в химической, пищевой, медицинской и других отраслях промышленности	Горячекатаный	40	15
Полосы горячекатаные	6235-52	Толщина 5—20, ширина 100—300, длина 400—2000	То же и деталей электрических машин и приборов	То же	40	15
Полосы холоднокатаные	6235-52	Толщина 1—4,5, ширина 30—400, длина 400—2000	То же	Мягкий Твердый	38 55	35 2
Проволока	2179-59	Диаметр 0,03—12,0	Для изготовления деталей в различных отраслях техники	Мягкий, диаметром в мм: 0,1—0,2 0,21—0,45 0,5—0,1 1,1—12,0 Твердый, диаметром в мм: 0,03—0,09 0,10—0,50 0,53—1,00 1,05—5,00 5,3—12,0	43 43 40 38	18 20 25 26
					90—135 80—110 75—100 70—80 60—80	

Основные механические свойства никеля при комнатной температуре приведены в табл. 7.

Таблица 7

Основные механические свойства никеля при комнатной температуре [1], [2]

Состояние металла	Предел прочности, кг/мм <sup>2</sup>	Предел текучести, кг/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Твердость по Бринеллю, кг/мм <sup>2</sup>
Чистый никель (в отожженном состоянии) . . . . .	28—30	—	40—50	—
Литой никель . . . . .	35—42	14—21	20—30	60—80
Кованый никель . . . . .	54—61	28—33	31—37	127—158
Кованый и отожженный . . .	50—55	19—24	42—44	90—110
Листы:				
холоднокатаные . . . . .	63—77	59—74	1—2	130—160
отожженные . . . . .	42—53	10—18	35—45	90—100
Проволока:				
холоднокатаная . . . . .	67—77	59—74	—	—
отожженная . . . . .	45—53	14—21	—	—

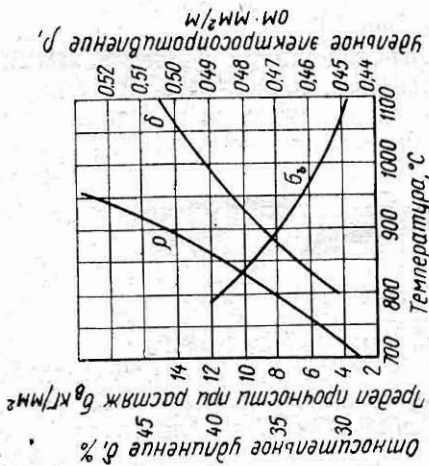
Модуль нормальной упругости никеля (при растяжении) почти такой же, как у стали, и колеблется в пределах 21 000—23 000 кг/мм<sup>2</sup>, а модуль упругости при скручивании принимается равным 7300 кг/мм<sup>2</sup>.

В связи с применением никеля в качестве основы для жаропрочных сплавов особое значение имеют механические свойства никеля при высоких температурах. Зависимость механических свойств и удельного электросопротивления технического никеля от температуры показана на фиг. 2.

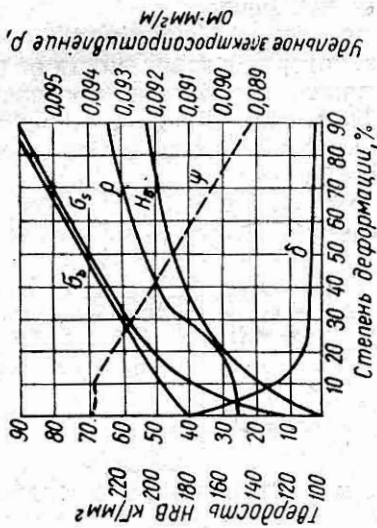
Как видно из кривых, при всех температурах испытания никель имеет высокую пластичность, а предел прочности его с ростом температуры понижается.

Характерной особенностью чистого никеля является способность сохранять свои пластические свойства при высоких и очень низких температурах. Из табл. 8 видно, что при понижении температуры до —253°С происходит некоторое повышение предела прочности при сохранении высокой пластичности никеля.

Никель хорошо обрабатывается в горячем и холодном состояниях, причем после деформации в холодном состоянии он приобретает наклеп и сильно упрочняется. Механические свойства чистого никеля в зависимости от степени деформации значительно изменяются (фиг. 3). Предел



Фиг. 2. Изменение свойств технического никеля при высоких температурах.



Фиг. 3. Механические свойства технического никеля в зависимости от степени деформации.

прочности, а также текучести и твердость с увеличением степени деформации повышаются, а относительное удлинение и сужение поперечного сечения резко снижаются. Путем отжига при температурах выше температуры рекристаллизации, которая в зависимости от степени чистоты и состояния никеля колеблется в пределах 200—600° С, наклеп может быть снят. Диаграмма рекристаллизации технического никеля в зависимости от степени деформации показана на фиг. 4.

Таблица 8

**Механические свойства никеля при низких температурах [1]**

Температура испытания, °С	Предел прочности, кг/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Сужение поперечного сечения, %
+ 17	45	35	77
— 196	63	46	89
— 253	79	48	69

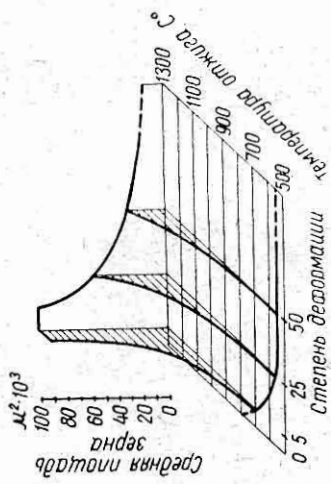
В зависимости от температуры отжига, как показано на фиг. 5, изменяются и механические свойства никеля. Так, предел прочности и предел текучести с увеличением температуры отжига снижаются, а относительное удлинение увеличивается.

В последнее время большое значение приобрел вопрос влияния радиоактивного облучения на свойства металлов и сплавов. Многочисленными исследованиями установлено, что длительное радиоактивное облучение значительно повышает предел прочности и твердость чистых металлов и резко снижает их пластичность.

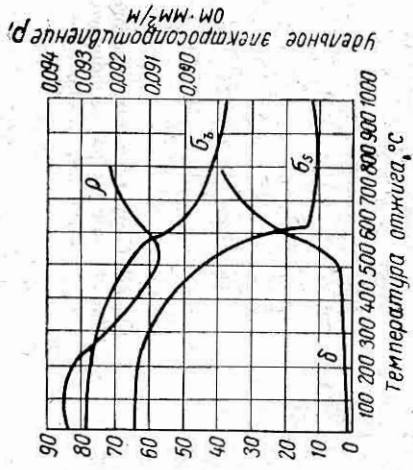
В табл. 9 приведены показатели механических свойств технического никеля и железа до и после радиоактивного облучения.

При кристаллизации большой массы металла образование кристаллов и их рост происходят по обычным законам кристаллизации, в результате чего получается поликристаллический никель. Как правило, в слитках и сварных швах образуется дендритная или литая структура (фиг. 6), которая может быть устранена путем дополнительной термической обработки или пластической деформацией.

Чистый никель в отожженном состоянии имеет полиэдрическую структуру (фиг. 7). После длительного



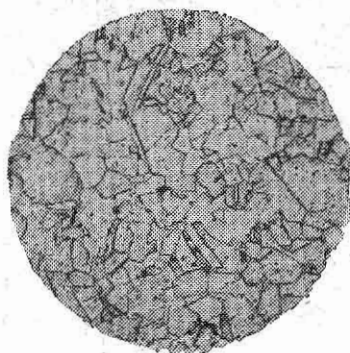
Фиг. 4. Диаграмма рекристаллизации технического никеля.



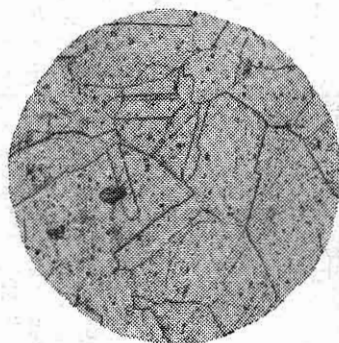
Фиг. 5. Зависимость механических свойств технического никеля от температуры отжига.



Фиг. 6. Дендритная структура литого технического никеля,  $\times 135$ .



Фиг. 7. Полиэдрическая структура отожженного технического никеля,  $\times 135$ .



Фиг. 8. Структура технического никеля после радиационного облучения,  $\times 135$ .

радиационного облучения отожженного никеля возникает характерная структура, отличительной особенностью которой является значительный размер зерен (фиг. 8).

Таблица 9

Изменение механических свойств технического никеля и железа в результате их длительного радиоактивного облучения [2]

Объект исследования	Предел прочности, кг/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Ударная вязкость, кгм/см <sup>2</sup>
Никель . . . . .	40,0	63,5	4,3
	62,4 (+56)	28,7 (-55)	3,3 (-23)
Железо . . . . .	35,5	40,0	3,4
	57,7 (+61)	13,1 (-67)	0,35 (-90)

Примечание. В числителе указаны свойства до облучения, в знаменателе — после облучения; в скобках дано изменение свойств в %.

Технологические свойства никеля зависят от степени его чистоты. Хорошо раскисленный и дегазированный никель может быть обработан давлением любым из известных методов (ковка, штамповка, прессовка, прокатка, волочение).

Начальная температура прокатки иковки в горячем состоянии, а также горячей прессовки никеля должна быть 1180—1250° С.

### Химические свойства никеля

Химические свойства никеля и других металлов зависят от электронного строения атомов и прежде всего от числа внешних электронов. Металлы-аналоги никель, кобальт и железо имеют одинаковое число валентных электронов, но разное число электронов в незаполненной 3d-оболочке. Поэтому в свойствах этих трех металлов вместе с общими чертами наблюдаются и различия, наиболее ярко проявляющиеся в химическом взаимодействии никеля с другими элементами периодической системы Менделеева.

Никель имеет весьма низкую химическую активность. В атмосферных условиях он является одним из наиболее коррозионностойких металлов. На поверхности никеля в начальной стадии окисления образуется очень тонкая и прочная защитная пленка, которая препятствует дальнейшему окислению и коррозии.

Никель устойчив против коррозии в расплавах щелочей любой концентрации, в нейтральных и щелочных растворах солей соляной, угольной, серной, азотной и уксусной кислот.

Никель пригоден для изготовления изделий, работающих при обычных температурах в контакте с серной и разбавленной соляной кислотами.

Минеральные кислоты сильно действуют на никель, особенно азотная и азотистая. Данные о скорости коррозии никеля в минеральных и других кислотах, в растворах солей и других средах приведены в табл. 10.

Таблица 10

Скорость коррозии никеля в различных средах [2]

Наименование кислот и солей	Концентрация, %	Температура, °С	Скорость коррозии, мм/год	Примечание
Серная кислота	5	30	0,06	При перемешивании растворов воздухом скорость коррозии резко возрастает
	5	60	0,24	
	5	77	0,52	
	5	102	0,84	
	10	20	0,043	
	10	77	0,3	
	10	103	3,0	
	20	20	0,1	
Соляная кислота	20	105	2,82	
	95	20	1,8	
	10	30	0,3	
	20	30	1,0	
	30	30	2,0	
	0,5	100	7,72	
Фосфорная кислота	1,0	100	17,3	Чистая кислота
	5,0	100	146	
	Разбавленная	20	0,3	
	85	95	14	
Сернистая кислота	Разбавленная	80	20	Неочищенная
	1% SO <sub>2</sub>	20	1,4	
Сероводородная вода	Насыщенный раствор	25	0,048	
Растворы нейтральных и щелочных солей (серной, соляной, азотной, уксусной и угольной)		При нагревании	0,013	



Наименование кислот и солей	Концентрация, %	Температура, °С	Скорость коррозии, мм/год	Примечание
Хлористый натрий	Насыщенный раствор	95	0,053	Нейтральный раствор
Хлористый алюминий	28—40	102	0,21	Кислый раствор
Хлористый цинк	8—20	38	0,12	Коррозия усилена
Сернистый алюминий	25	35	0,015	вследствие гидролиза
То же	57	115	1,5	То же
Сернистый цинк	Насыщенный раствор	105	0,64	»
Сернистый марганец	—	113	0,074	»
Хлористый марганец	11,5	101	0,22	Кислый раствор
Четыреххлористый углерод	С водным слоем	25	0,0005	В отсутствие водного слоя стойкость значительно выше даже при кипении
Двуххлористый этилен	То же	25	0,01	
Хлороформ	»	25	0,0015	

Никель достаточно стоек против действия разбавленных органических кислот и других органических соединений.

Крепкие органические кислоты (уксусная, лимонная, щавелевая, муравьиная) при комнатной температуре вызывают умеренную коррозию никеля. Сведения о стойкости никеля в среде органических кислот и некоторых соединений приводятся в табл. 11.

Таблица 11  
Скорость коррозии никеля в органических кислотах и других средах [2]

Наименование среды	Концентрация, %	Температура, °С	Скорость коррозии, мм/год
Уксусная кислота	6	30	0,1
» »	50	20	0,25
» »	5	Кипения	0,28
» »	50	»	0,48
» »	99,9	»	0,364

Наименование среды	Концентрация, %	Температура, °С	Скорость коррозии, мм/год
Жирные кислоты (олеиновая и стеариновая)	—	227	0,1
Карболовая кислота	—	53	0,0018
Фруктовые соки;			
Помидорный	Натуральный	20	0,3
»	»	90	0,51
Лимонный	»	20	0,01
»	»	100	0,36
Виноградный	»	20	0,16
»	»	100	0,17

Примечание. При аэрации скорость коррозии заметно возрастает.

Сухие газы — галогены, окислы азота, сернистый газ и аммиак — при комнатной температуре на никель не действуют, однако, в присутствии влаги скорость коррозии никеля в указанных средах заметно повышается.

Чистый никель не склонен к коррозионному растрескиванию.

Никель обладает высокой стойкостью против окисления при нагревании. Процесс окисления никеля при повышенных температурах в зависимости от времени  $t$  описывается параболическим уравнением типа:

$$y^2 = Kt + A,$$

где  $K$  и  $A$  — постоянные величины;

$y$  — толщина окисной пленки.

По мере повышения температуры скорость окисления никеля в атмосфере воздуха возрастает. На скорость окисления никеля при нагревании большое влияние оказывают примеси. Марганец и сера ухудшают стойкость никеля против окисления, а хром, кремний и алюминий повышают ее.

При нагревании никель реагирует с серой и сернистыми соединениями, образуя легкоплавкие эвтектические смеси, способствующие быстрому разрушению материала при эксплуатации.

В атмосфере водорода при умеренных температурах никель приобретает хрупкость (так называемая «водородная хрупкость»). Возникновение ее связано с диффузией водорода в никель, адсорбцией его по границам зерен

или в порах никеля и образованием малоустойчивых гидридов.

Хлор и хлористые соединения при умеренных температурах (до  $500^{\circ}\text{C}$ ) не оказывают воздействия на никель.

С азотом никель не реагирует и не создает с ним устойчивых нитридов никеля.

Никель является одним из самых активных металлов-катализаторов. Удельная каталитическая активность никеля из ряда элементов IV периода уменьшается от никеля к кобальту, железу, марганцу, хрому, ванадию и титану.

Процесс диффузии элементов в никеле, как и во многих поликристаллических металлах, происходит по границам зерен и внутри их не с одинаковой скоростью. В данном случае имеет место ярко выраженный локальный характер перемещения чужеродных атомов. В зависимости от природы диффундирующих атомов взаимодействие их с никелем может привести к образованию твердых растворов или химических соединений. При диффузии меди, кобальта и железа в никель образуются твердые растворы этих металлов с никелем, а при диффузии серы, азота, кислорода и других малорастворимых в никеле элементов образуются химические соединения типа сульфидов, нитридов и окислов различных составов.

### Сплавы никеля

Несмотря на то, что технически чистый никель широко применяется в промышленности как конструкционный материал, пока еще основной областью использования никеля являются различные сплавы на никелевой основе [3, 4, 5].

Значительные количества никеля расходуются также для легирования стали.

Никелевые сплавы условно можно разделить на четыре группы: конструкционные, электротехнические, сплавы с особыми физическими свойствами и жаропрочные.

Особое положение занимает анодный никель, применяемый для защитных покрытий.

К первой группе относятся технический никель (табл. 5) и монель (табл. 12). В техническом (полуфабрикатном) никеле содержатся небольшие добавки марганца, кремния, углерода, магния и других, которые вводятся обычно как раскислители и десульфураторы.

Химический состав наиболее важных никелевых сплавов [4], [5]

Наименование и марка сплава	Содержание элементов, %									
	Ni+Co	Cu	Fe	Mn	Si	Al	C	S		
Монель-металл (НМЖМц 28-2,5-1,5)	Остальное	27—29	2—3	1,2—1,8	0,05	—	0,2	0,01		
Никель кремнистый (НК-0,2)	99,4	0,10	0,15	0,10	0,15—0,25	—	0,10	0,02		
Никель марганцовистый (НМц-2,5)	Остальное	0,5	0,65	2,3—3,3	0,3	—	0,3	0,03		
(НМц-5)	Остальное	0,5	0,65	4,6—5,4	0,3	—	0,3	0,03		
Константан (МНМц-40-1,5)	39—41	Остальное	0,5	1,5	0,10	—	0,10	0,02		
Нихром (Х20Н80)	75—78	—	Остальное	1,5	0,5	Cr 20—23	0,15	0,025		
Ферронихром (Х15Н60)	55—61	—	Остальное	1,5	1,0	Cr 15—18	0,15	0,025		
Пермаллой (65НП)	70—80	—	Остальное	—	—	—	—	—		
Супермаллой (79НМ)	79	—	16	—	—	Mo 5,0	—	—		
Хостелой	Остальное	0,7—4,0	—	—	10—12	—	—	—		

Технический никель обладает высокой коррозионной стойкостью и повышенными механическими свойствами, благодаря чему он широко применяется в качестве конструкционного материала в различных отраслях промышленности и техники.

Монель отличается исключительно высокой коррозионной стойкостью в широком интервале температур. Он поддается горячей и холодной обработке давлением, прокатывается в листы, полосы, ленту, прутки и проволоку.

По своей структуре монель относится к сплавам типа твердых растворов. Небольшие присадки железа и кремния, так же как медь, находятся в растворе и самостоятельных фаз не образуют. Микроструктура сплава такая же, как и у чистого никеля. Разновидностями монеля являются стареющий (облагораживаемый) сплав монель-К, литой монель и обладающий наибольшей прочностью литой монель-С.

Все сплавы типа монеля устойчивы на воздухе, в морской и пресной воде, в растворах серной кислоты при концентрациях до 80%, а также в сухих газах при обычных температурах; хорошо противостоят действию водных растворов солей и щелочей, пара и органических кислот.

Ползучесть и жаропрочность никельмедных сплавов при температуре 250—500°С выше, чем медных и железных.

К сплавам второй группы относятся кремнистый никель, марганцовистый никель, нихром, хромель, алюмель, копель и константан. Благодаря высокой температуре испарения в вакууме, большому электрическому сопротивлению и термоэлектродвижущей силе, хорошей жаростойкости и ряду других ценных свойств эти сплавы применяются для изготовления деталей радиоламп, радиоприборов, нагревательных элементов, реостатов, точных измерительных приборов, термопар и т. д.

К третьей группе относятся сплавы: пермаллой, супермаллой, инвар, элинвар, платинит и другие. Обладая особыми физическими свойствами, эти сплавы применяются для изготовления постоянных магнитов, деталей, не подвергающихся намагничиванию, для производства деталей приборов с постоянными линейными размерами и т. д.

К четвертой группе относятся сплавы никеля с хромом, титаном, алюминием, молибденом и другими элементами, типа нимоник. К этой группе относятся сплавы ЭИ437А, ЭИ617, ЭИ598 и другие, предназначенные для работы при высоких нагрузках и температурах (табл. 13).

Таблица 13

Химический состав некоторых жаропрочных никелевых сплавов [5]

Марка сплава	Содержание элементов, %									
	Cr	Ti	Al	Mo	W	Fe	V	Ce	Ni	Прочие элементы
ЭИ437А	19—	2,3—	0,55—	—	—	—	—	0,01	Осн.	—
	22	2,7	0,95	—	—	—	—	—	—	—
ЭИ617	13—	1,8—	1,7—	2—4	5—7	—	0,02	0,02	Осн.	V=0,1—
	18	2,3	2,3	—	—	—	—	—	—	0,5
ЭИ598	15—	1,9—	1,0—	4—6	2—	5	0,01	0,02	Осн.	—
	19	2,8	1,7	—	3,5	—	—	—	—	—
ЭИ618	14—	1,6—	1,6—	3,0—	4,5—	8	0,02	—	Осн.	V = 0,3
	18	2,2	2,2	4,5	6,5	—	—	—	—	—
ВЖ36-Л2	19	2,3	3,5	—	—	1,5	0,3	0,01	Осн.	—

Сплавы типа нимоник широко применяются для изготовления жаровых труб в газовых турбинах, деталей соплового аппарата, лопаток ротора в газовых турбинах и реактивных двигателях.

Широко известны в технике и медноникелевоцинковые сплавы (нейзильберы, никелевое серебро, никелевая латунь, никелин и т. д.), содержащие 5—30% никеля и применяемые как заменители серебра в различных изделиях.

Помимо перечисленного никель применяется и в железных сплавах; его наличие улучшает механические свойства сталей — повышает их прочность и пластичность. Добавка никеля в сталь делает ее кислотоупорной и жаростойкой.

### Влияние примесей на свойства никеля и его сплавов

Применение и широкое внедрение в промышленности любых конструкционных материалов, в частности никеля и его сплавов, в значительной мере обуславливается возможностью их сварки.

Некоторое сходство механических и теплофизических свойств никеля и железа создало у ряда ученых и работ-

ников производства [6, 7] ошибочное мнение о том, что никель и монель свариваются так же легко, как и малоуглеродистые стали.

Никель и его сплавы свариваются гораздо труднее стали главным образом потому, что обладают особыми физико-химическими свойствами, большой чувствительностью к наличию примесей и растворенных газов.

Основными факторами, затрудняющими сварку никеля, являются:

- а) сравнительно низкие литейные свойства никеля;
- б) образование при повышенных температурах тугоплавких пленок окиси никеля;
- в) большая склонность никеля к образованию в сварных швах пор, трещин и других дефектов.

При сварке сплавов никеля необходимо учитывать их особые физико-химические свойства. Так, например, ни-хром имеет большое электросопротивление и малую теплопроводность, склонен к образованию при сварке тугоплавкой пленки окиси хрома.

Монель имеет большую по сравнению с никелем линейную усадку удельное электросопротивление и меньшую теплопроводность.

В противоположность железу никель не имеет фазовых превращений, осложняющих его металлургию. Вследствие этого можно было бы считать металлургию чистого никеля простой. Однако промышленный никель всегда содержит другие элементы примеси. Даже в чистом промышленном никеле их может быть до 0,5%. Большинство же никелевых сплавов содержит значительно большее количество примесей, добавляемых для получения требуемых свойств. Поэтому, для металлургов-сварщиков представляет особый интерес взаимодействие различных элементов с никелем и влияние их на свойства металла шва и околошовной зоны.

Железо образует с никелем непрерывный ряд твердых растворов (фиг. 9). На технологические свойства никелевых сплавов, такие как свариваемость, ковкость, и другие, небольшие добавки железа не влияют.

В монеле железо находится в твердом растворе, повышает его прочность и улучшает физико-химические свойства.

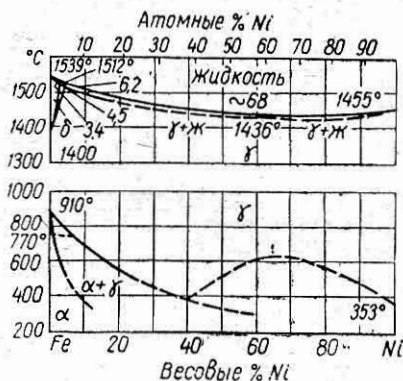
В нихромах допускается содержание железа до 20%, которое облегчает технологию механической обработки

сплавов. Следует иметь в виду, что при этом заметно снижается жаростойкость нихрома.

В медноникелевых сплавах типа мельхиор при содержании углерода до 0,1% железо не оказывает заметного влияния на свойства сплава. Однако при повышении содержания углерода и наличии в сплаве нескольких процентов железа мельхиор становится склонным к трещинообразованию, особенно при сварке [8].

В алюмине примеси железа нежелательны, так как они приводят к снижению э. д. с. алюминея.

Марганец находится в никеле в твердом растворе. Сплавы никеля с марганцем характеризуются наличием упорядоченной структуры и снижением температуры солидуса с 1455°С до 1005°С при увеличении марганца



Фиг. 9. Диаграмма состояния никель—железо.

до 60% (фиг. 10). На механические, технологические свойства и жароупорность никелевых и медноникелевых сплавов марганец влияет положительно. Марганец является хорошим раскислителем и парализует вредное действие серы.

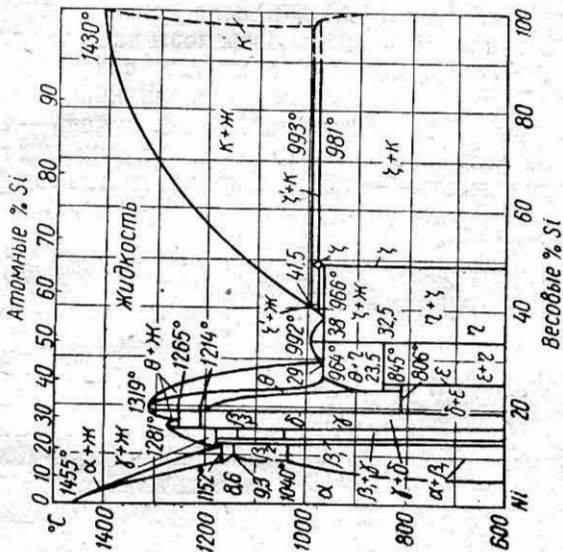
Добавка марганца к мельхиору устраняет хрупкость его после отжига при наличии в этом сплаве углерода.

В никелехроможелезных сплавах с содержанием железа до 25% наличие марганца увеличивает стойкость против образования горячих трещин.

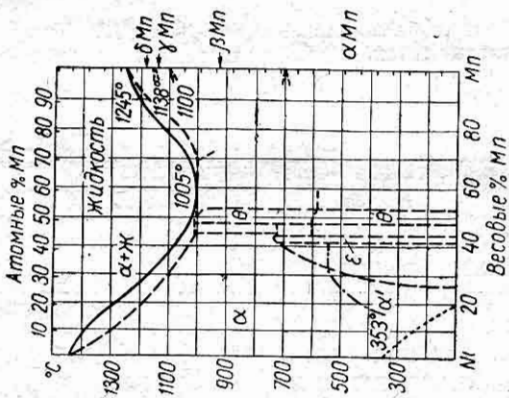
Кремний. Растворимость кремния в чистом никеле достаточно высока, особенно при отсутствии других добавок (фиг. 11); но она заметно уменьшается с добавлением хрома или меди.

Кремний с никелем образует химические соединения, снижающие пластичность и увеличивающие твердость сплава. Однако небольшие добавки кремния (1—2%) улучшают литейные свойства сплава, без заметного снижения других качеств.





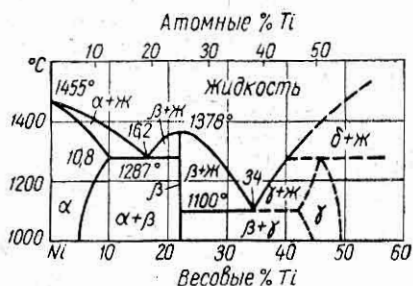
Фиг. 11. Диаграмма состояния никель—кремний.



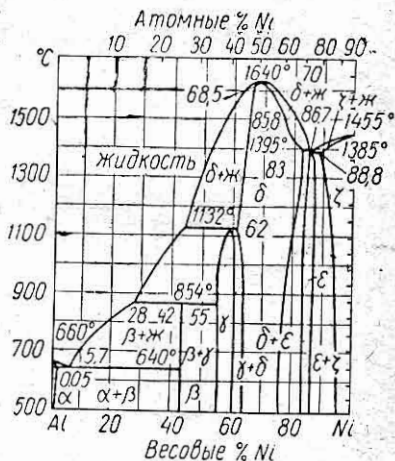
Фиг. 10. Диаграмма состояния никель—марганец.

Наличие кремния в медноникелевых сплавах увеличивает их склонность к образованию горячих трещин, поэтому его содержание не должно быть более 0,3%.

Титан хорошо растворим в никеле, служит энергичным раскислителем и дегазатором, повышает механические свойства и модифицирует металл сварного шва, обеспечивая получение равноосной, мелкокристаллической структуры. Диаграмма состояния никель—титан приведена на фиг. 12. Количество титана в сварных швах не должно превышать 1—1,2%. С увеличением содержания титана возможно появление горячих трещин при сварке, особенно в соединениях, обладающих большой жесткостью.



Фиг. 12. Диаграмма состояния никель—титан.



Фиг. 13. Диаграмма состояния никель—алюминий.

Алюминий растворим в никеле в твердом состоянии в значительном количестве (фиг. 13). Сплавы никеля с алюминием отличаются высокой прочностью и пластичностью. Алюминий повышает коррозионную стойкость никеля, является хорошим дегазатором и одним из наиболее сильных раскислителей. Легирование металла сварных швов из никеля алюминием в количестве до 1% следует признать полезным.

В небольших количествах вводимый алюминий оказывает положительное влияние на монель и другие высоконикелевые сплавы.

Углерод оказывает значительное влияние на механические и технологические свойства никеля и его сплавов.

Диаграмма состояния никель — углерод в изученных пределах является эвтектической (фиг. 14). Эвтектика при содержании 2,2% С и температуре плавления 1318° С образуется между предельным твердым раствором углерода в никеле и графитом. Графит появляется в результате распада карбида никеля  $Ni_3C$ , неустойчивого при температурах ниже 2100° С.

Растворимость углерода в твердом никеле с понижением температуры уменьшается от 0,65% для эвтектической температуры до 0,05—0,1% при комнатной температуре.

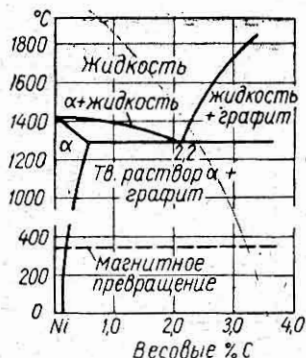
Наличие углерода в твердом растворе никеля несколько повышает его твердость и прочность, облегчает горячую и затрудняет холодную обработку никеля давлением. При выделении углерода в виде графита никель становится хрупким, так как графит при кристаллизации выделяется преимущественно по границам зерен металла. Верхний предел содержания углерода в никеле и богатых им сплавах равен 0,15%.

В медноникелевых сплавах типа мельхиор растворимость углерода в твердом состоянии очень мала и равна 0,045%. Поэтому в этих сплавах углерод является вредной примесью.

На монель углерод оказывает положительное влияние, так как является хорошим раскислителем и способствует получению качественных слитков и полуфабрикатов из них.

Влияние углерода на свариваемость никеля зависит от наличия других элементов, входящих в свариваемый металл, или от того, какими элементами легируется металл сварного шва. В сварных швах никеля и монеля содержание углерода не должно превышать 0,1%.

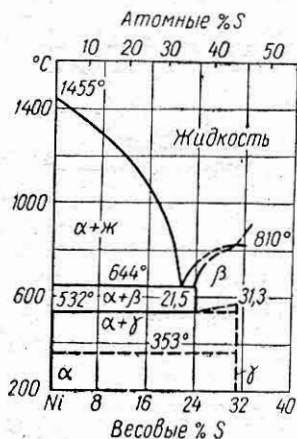
Сера. В никеле и никелевых сплавах сера является вредной примесью. Никель образует с серой соединения  $Ni_3S_2$ ,  $NiS$  и предположительно  $Ni_6S_5$ . Диаграмма состояния никель — сера показана на фиг.15. Сера с никелем



Фиг. 14. Диаграмма состояния никель—углерод.

образует ряд химических соединений и эвтектику Ni—Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub>, плавящуюся при температуре 644° С.

Сернистый никель незначительно растворим в никеле в твердом состоянии. Его растворимость при эвтектической температуре равна 0,005%. При затвердевании сплавов легкоплавкая и хрупкая эвтектика выделяется преимущественно по границам зерен, нарушая связь между ними. При содержании серы более 0,01% никель и его

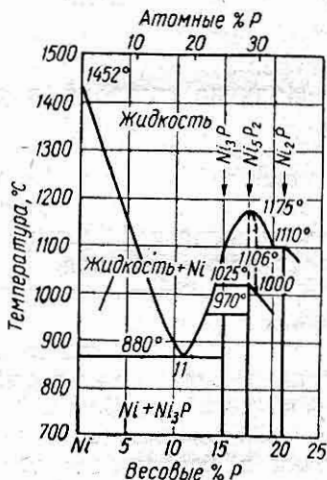


Фиг. 15. Диаграмма состояния никель—сера.

сплавы легко разрушаются во время обработки давлением.

Для устранения вредного влияния серы на никель и никелевые сплавы применяется присадка до 1,5% марганца и до 0,1% магния. Марганец и магний образуют тугоплавкие сульфиды, располагающиеся не по границам зерен, а внутри их. По литературным данным [1, 4] особенно энергично парализует вредное действие серы литий, который вводится в сплав в количестве 0,004—0,006%.

Фосфор образует с никелем фосфиды Ni<sub>3</sub>P, Ni<sub>5</sub>P<sub>2</sub> и Ni<sub>2</sub>P. Диаграмма состояния никель—фосфор представлена на фиг. 16. При температуре 880° С образуется легкоплавкая хрупкая эвтектика Ni—Ni<sub>3</sub>P, располагающаяся по границам зерен и нарушающая связь между ними. Фосфор является в никелевых и медноникелевых сплавах



Фиг. 16. Диаграмма состояния никель—фосфор.

вредной примесью, ухудшающей механические, физические и технологические свойства. В металле сварных швов не следует допускать содержание фосфора более 0,005%.

*Висмут, свинец, сурьма, мышьяк, селен и кадмий* являются практически не растворимыми в никеле, меди и их сплавах в твердом состоянии. Находясь в расплавленном никеле и его сплавах, указанные элементы образуют легкоплавкие, хрупкие эвтектики, резко ухудшающие механические и технологические свойства. Содержание перечисленных примесей в никеле и никелевых сплавах не должно превышать 0,002—0,005%.

### **Влияние газов на свойства никеля и его сплавов**

На никель и высоконикелевые сплавы большое влияние оказывают различные газы, находящиеся в зоне плавки. Большинство газов хорошо растворяется в расплавленном никеле, а с многими из них никель легко вступает в реакцию, чем объясняется трудность получения качественных никелевых слитков или сварных швов.

*Никель и водород.* Наиболее сложным является вопрос о взаимодействии водорода с никелем. До сих пор остаются спорными характер этого взаимодействия, условия образования и точные составы гидридов никеля, а также возможность образования твердых растворов никеля с водородом.

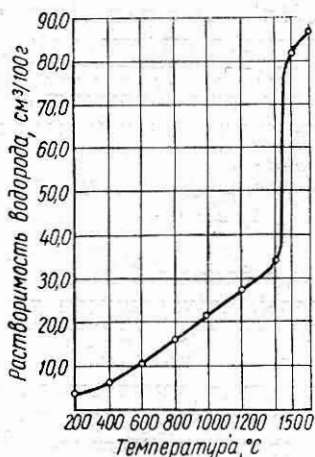
Растворимость водорода в никеле значительно выше, чем в других металлах подгруппы железа и меди, и резко увеличивается с повышением температуры, при которой водород находится в атомном состоянии.

Высокая растворимость водорода в никеле обусловлена тем, что благодаря малому размеру атомного диаметра водород легко внедряется между атомами кристаллической решетки никеля. Растворимость водорода в никеле в зависимости от температуры показана на фиг. 17. Во время сварки никеля и его сплавов при наличии в зоне дуги больших концентраций водорода и закиси никеля NiO возможно поражение сварных швов порами и микротрещинами, вызванное так называемой водородной болезнью. Сущность этого явления описана в гл. V.

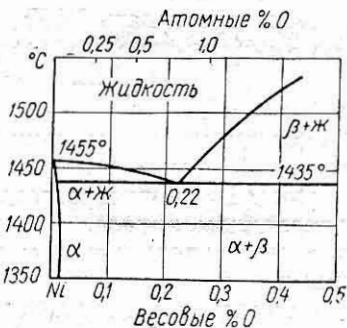
С целью предупреждения дефектов швов, называемых водородом, необходимо прежде всего принять меры против попадания кислорода в сварочную ванну, т. к.

вредное влияние водорода особенно сильно проявляется при недостаточно раскисленном металле. В случае необходимости следует уменьшать концентрацию водорода путем подбора соответствующих материалов, хорошо раскислять металл сварочной ванны, а при наличии

избыточного водорода — связывать его в стойкие летучие соединения.



Фиг. 17. Растворимость водорода в никеле в зависимости от температуры.



Фиг. 18. Диаграмма состояния никель — кислород.

**Никель и кислород.** Основными соединениями никеля с кислородом, имеющими практическое значение, являются закись никеля  $\text{NiO}$  и окись никеля  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ . Диаграмма состояния никель — кислород показана на фиг. 18.

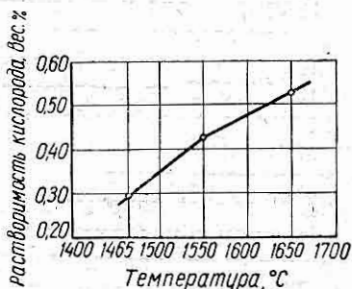
Наиболее изученным соединением никеля с кислородом является закись никеля  $\text{NiO}$ , представляющая собой вещество зеленого цвета, удельным весом 7,45, плавящееся при  $2090^\circ\text{C}$ . Это соединение легко образуется при плавке никеля в присутствии кислорода. Теплота образования закиси никеля составляет  $+58,15$  ккал/моль [1]. Закись никеля легко восстанавливается водородом при температурах выше  $230^\circ\text{C}$ , причем эта реакция идет с поглощением тепла.

Закись никеля способна растворяться в расплавленном никеле. Процесс окисления расплавленного никеля протекает в две стадии; сначала кислород растворяется в расплавленном металле, а после достижения предела растворимости начинается реакция образования закиси

никеля. Растворимость кислорода в никеле с увеличением температуры возрастает и составляет 0,067% при 1470°С и 1,18% при 1720°С.

В условиях производства сплавов никеля и при сварке наиболее вероятным является образование и стабильное существование закиси никеля NiO.

Закись никеля образует с никелем эвтектику Ni—NiO (при содержании 0,236% кислорода или 1,1% закиси никеля), плавящуюся при температуре 1438°С. Область твердого раствора при температуре эвтектики достигает 0,08% и резко сдвигается в сторону никеля с понижением температуры. В процессе кристаллизации часть закиси никеля (избыточная сверх эвтектического ее содержания) вследствие высокой температуры плавления затвердевает в первую очередь и проникает в расплавленный металл в форме дендритов.



Фиг. 19. Растворимость кислорода в расплавленном никеле.

Другая часть закиси никеля, находящаяся в составе сравнительно легкоплавкой эвтектики, располагается по границам зерен и затвердевает в последнюю очередь. При небольшом содержании кислорода (~0,02%), т. е. неполном раскислении никеля, кислород при высоких температурах находится в твердом растворе, но в процессе медленного остывания сплава он вновь выделяется. Это явление сопровождается утолщением границ зерен и повышением хрупкости металла.

Скорость растворения закиси никеля в расплавленном никеле зависит от интенсивности перемешивания металла, его температуры и длительности нахождения при этой температуре.

С повышением температуры растворимость закиси никеля в расплавленном никеле увеличивается и в перерасчете на кислород характеризуется данными графика, приведенного на фиг. 19.

Кислород является вредной примесью в никеле и его сплавах, т. к. приводит к образованию дефектов в свар-

ных соединениях, вызывает трещины и поры в сварных швах, способствует развитию «водородной болезни».

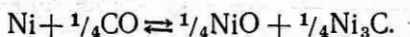
При отжиге кислородосодержащего никеля в восстановительной атмосфере, особенно в водороде, его механические свойства снижаются, а в местах скопления закиси никеля образуются мелкие трещины. На поверхности такого отожженного металла появляются пузыри.

При сварке никеля и его сплавов необходимо надежно защищать расплавленный металл от атмосферы воздуха, применять материалы с минимальным содержанием кислорода и обеспечивать достаточное раскисление металла сварочной ванны.

*Никель и азот.* Никель с азотом вплоть до температуры  $1400^{\circ}\text{C}$  не реагирует. Образующийся нитрид  $\text{Ni}_3\text{N}$ , представляющий собой порошок темного цвета с удельным весом  $7,66 \text{ г/см}^3$ , является весьма не стойким. При температуре около  $800^{\circ}\text{C}$  на воздухе  $\text{Ni}_3\text{N}$  сгорает, что указывает на невозможность существования этого соединения как в условиях приготовления никелевых сплавов, так и при их сварке.

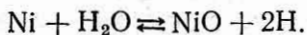
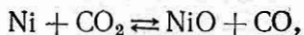
Пассивность азота по отношению к никелю может быть использована для разработки технологии дуговой электросварки никеля в среде этого газа. Для этой цели, по нашему мнению, необходимо применение специальной никелевой электродной проволоки, легированной титаном и алюминием. Достаточными для целей раскисления и модифицирования металла сварного шва количествами указанных элементов, по-видимому, будут  $1,0\text{—}2,0\%$ .

*Окись углерода.* Взаимодействуя с окисью углерода никель образует закиси и карбид никеля, растворяющиеся в расплавленном металле:



Кроме того, окись углерода сама хорошо растворяется в никеле. Присутствие окиси углерода в зоне сварочной дуги так же нежелательно, как и наличие водорода или углеводородов.

Атмосфера углекислого газа и паров воды является для никеля слабоокислительной. С этими газами никель вступает в реакции:





Скопление окиси углерода и водорода в микропустотах и по границам зерен снижает пластичность никеля и высоконикелевых сплавов.

Последнее обстоятельство является одной из причин получения отрицательных результатов при неоднократных попытках выполнения сварки никеля в углекислом газе.

### Обработка никеля

Бурное развитие новых отраслей современной техники, таких как химическое машиностроение, атомная, реактивная техника, астронавтика и других, требует все большего применения никелевых сплавов и увеличения производства никеля. Советский Союз в настоящее время занял второе (после Канады) место в мировом производстве никеля.

Необходимые сведения по основным вопросам металлургии никеля можно найти в специальной литературе [9, 10 и 11].

Никель и его важнейшие конструкционные сплавы, обладая высокой пластичностью и достаточной прочностью, подвергаются всем видам обработки в горячем и холодном состояниях: ковке, прокатке, штамповке, волочению и т. д. Технологические свойства и режимы обработки технического никеля и некоторых его сплавов приведены в табл. 14.

Плавленый, ковкий никель, а также его сплавы находят широкое применение в виде листов, полос, лент, труб, прутков и проволоки, легко получаемых обычными технологическими операциями.

Таким образом, на основании приведенного краткого обзора некоторых свойств никеля и его сплавов можно с уверенностью утверждать, что применение никеля и сплавов на его основе имеет широкие перспективы для дальнейшего развития.

Вместе с тем недостаточная изученность физико-химических и металлургических процессов при различных видах технологической обработки никеля и, особенно, при его сварке крайне затрудняет разработку надежных методов получения сварных соединений, чем существенно сдерживает применение конструкций из никеля и его сплавов в различных отраслях современного производства.

Технологические свойства и режимы обработки никеля и его конструкционных сплавов [3,4] Таблица 14

Параметры	Значения для различных марок сплавов						
	Никель технический	Никель марганцо- вистый, НМц-2,5	Никель марганцо- вистый, НМц-5	Константан, МНМц 40-1,5	Монель, НМЖМц 28-2,5-1,5	Нихром, Х20Н80	Феррони- хром, Х15Н60
Температура, °С:							
литья . . . . .	1550—1650	1500—1550	1500—1550	1280—1300	1500	1500	1500
горячей обработки . . . . .	1140—1250	900—1200	1100—1150	1080—1130	975—1150	1200	1000—1100
отжига . . . . .	700—800	800—900	800—850	800—850	800—850	850—900	750—850
Рабочая температура, °С	—	500	500	500	—	1100	1000
Низкотемпературный от- жиг, °С . . . . .	300	—	—	—	—	—	—
Линейная усадка, % . . . . .	1,0	—	—	—	2,1	—	—
Начало рекристаллиза- ции, °С . . . . .	600	—	—	—	425	—	—
Температура изложни- цы, °С . . . . .	80—110	100—120	100—120	100—120	100—140	—	—

Примечание. В качестве смазки для изложниц применяется керосин + сажа.

## II. ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ НИКЕЛЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Сварка плавлением представляет собой очень сложный комплекс металлургических и физико-химических процессов, протекающих в условиях высокой температуры, значительной концентрации тепла в небольшом объеме, быстрого нагрева и последующего охлаждения расплавленного металла. Специфические условия сварки оказывают значительное влияние на химический состав, структуру и свойства сварных швов.

В данной главе рассматриваются некоторые металлургические и металловедческие вопросы сварки никеля и его сплавов, независимо от конкретной марки сплава и условий работы сварной конструкции.

Пользуясь этими основными сведениями, можно воздействовать на химический состав, структуру, механические и коррозионные свойства сварных швов так, чтобы наиболее полно удовлетворить требованиям, предъявляемым к сварным соединениям конкретной конструкции из определенной марки никелевого сплава.

### Некоторые особенности процесса электродуговой сварки плавлением

В процессе дуговой сварки, под сосредоточенным воздействием тепла сварочной дуги, происходит расплавление электрода, свариваемого металла, электродного покрытия или флюса с образованием реакционной зоны плавления. Расплавленный металл электрода переносится в сварочную ванну в виде капель величиной от тысячных долей миллиметра до 5—6 мм. В процессе образования капель и при перемещении их через дугу протекают химические реакции между металлом, шлаком и газовой средой дуги. Причем, несмотря на кратковременность

существования капёль, химические процессы успевают пройти в достаточно большой степени.

В сварочной ванне осуществляется перемешивание основного металла с электродным, продолжаются процессы взаимодействия металла со шлаком и газами, происходит их разделение и кристаллизация сварного шва.

Полнота протекания металлургических процессов, химический состав, структура и свойства металла швов в значительной степени зависят от величины сварочной ванны, длительности ее существования, температуры ванны, от доли участия в формировании шва электродного металла и многих других факторов.

Размеры сварочной ванны зависят в основном от метода сварки, величины тока и напряжения дуги, скорости сварки и теплофизических свойств свариваемого металла.

По данным К. В. Любавского и Н. Н. Рыкалина [12], с увеличением сварочного тока и напряжения дуги размеры ванны увеличиваются. Указанная зависимость может быть выражена уравнением

$$l = K \frac{I \cdot U}{2\pi\lambda \cdot T_{пл}},$$

где  $l$  — длина сварочной ванны, см;

$K$  — постоянная величина;

$I$  — сварочный ток, а;

$U$  — напряжение дуги, в;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности основного металла, принимаемый постоянным для всех температур от комнатной до температуры плавления, кал/см · сек · град;

$T_{пл}$  — температура плавления металла, °С.

Время пребывания металла в сварочной ванне, являющееся одним из основных факторов кинетики металлургических процессов, протекающих при сварке, может быть выражено уравнением [13]:

$$t = \frac{l}{v_{св}},$$

где  $t$  — время существования ванны, сек;

$l$  — длина сварочной ванны, см;

$v_{св}$  — скорость сварки, см/сек.

Рассматривая зависимость между длиной сварочной ванны, скоростью сварки, величиной тока и напряжения,

можно сделать вывод, что длительность существования металла ванны в жидком состоянии увеличивается с возрастанием тока и напряжения дуги и уменьшается при увеличении скорости сварки. По данным Г. И. Погодина-Алексеева [14], время существования сварочной ванны при ручной дуговой сварке равно 8—30 сек, а при автоматической сварке под флюсом 5—12 сек.

Температура сварочной ванны в различных ее участках неодинакова. Периферийные слои металла ванны имеют температуру, близкую к средней температуре плавления, а участок ванны, находящийся под непосредственным действием дуги, нагревается до температуры, превышающей среднюю.

Температурный режим зоны плавления (увеличение температуры до максимального значения и снижение до температуры кристаллизации металла) обуславливает возможность протекания взаимно-обратных процессов, таких как абсорбция жидким металлом газов и последующее их выделение; восстановление некоторых элементов и их окисление и др.

По данным В. И. Дятлова [15], температура сварочной ванны и удельное теплосодержание металла в ней не зависят от режима сварки и являются функцией теплофизических свойств металла. Температура ванны может быть определена по уравнению

$$T_{\theta} = T_{пл} + \frac{C_{тв} \cdot T_{пл} - q_{пл}}{C_{ж}}$$

где  $T_{\theta}$  — температура ванны, °С;

$T_{пл}$  — температура плавления металла, °С;

$C_{тв}$  — средняя теплоемкость твердого металла, кал/г · град;

$q_{пл}$  — скрытая теплота плавления, кал/г;

$C_{ж}$  — средняя теплоемкость жидкого металла, кал/г · град.

Температура ванны расплавленного металла при сварке технического никеля, рассчитанная по указанному уравнению, равна 2167° С или 2440° К.

Однако температура сварочной ванны, вычисленная по уравнению, предложенному В. И. Дятловым, получается завышенной, вследствие того, что скрытая теплота плавления металла остается неучтенной. И. И. Фрумин [16], внося соответствующую поправку, рекомендует

пользоваться для вычисления температуры ванны следующим уравнением:

$$T_{\text{в}} = T_{\text{пл}} + \frac{C_{\text{тв}}(T_{\text{пл}} - T_0) - 2\omega_{\text{пл}}}{C_{\text{ж}}},$$

где  $T_{\text{пл}}$  — температура плавления металла, равная  $1452^{\circ}\text{C}$ ;

$C_{\text{тв}}$  — средняя теплоемкость твердого металла,  $\text{кал/г} \cdot \text{град}$ ;

$T_0$  — температура окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\omega_{\text{пл}}$  — скрытая теплота плавления металла,  $\text{кал/г}$ ;

$C_{\text{ж}}$  — средняя теплоемкость жидкого металла,  $\text{кал/г} \cdot \text{град}$ .

При пользовании современными значениями теплофизических констант температура ванны расплавленного никеля для тех же условий получается равной  $1727^{\circ}\text{C}$  или  $2000^{\circ}\text{K}$ .

Сварной шов представляет собой смесь расплавленных основного и присадочного металлов. Химический состав металла шва определяется составом свариваемого сплава и электродной проволоки, долями их участия в образовании шва, а также характером взаимодействия жидкого металла, шлака и газовой среды. Соотношение между основным и электродным металлом в шве зависит от скорости плавления электрода, глубины ванны, объема наплавленного металла и ряда других факторов.

Обычными примесями в никеле являются небольшие количества кобальта, железа, меди, марганца, кремния, углерода, кислорода и других элементов. Эти примеси в пределах, допускаемых стандартами, не оказывают заметного влияния на свариваемость никеля.

В технической литературе распространено мнение о том, что при электродуговой сварке чистых металлов и специальных сплавов, в том числе никеля и его сплавов, необходимо стремиться к получению металла шва, обладающего таким же химическим составом и структурой, как и свариваемый материал. Однако практика показала ошибочность такого подхода к вопросу сварки никеля и его сплавов. Так, например, технически чистый никель не удается сварить без пор, трещин, с достаточно высокими показателями механических и коррозионных свойств шва, если его химический состав и структура будут идентичными основному металлу. Очень часто для получения сварных швов, удовлетворяющих разнообраз-

ным требованиям, приходится прибегать к комплексному легированию их элементами, не содержащимися в основном металле, и одновременно препятствовать обогащению шва вредными примесями.

В настоящее время считается установленным [17, 18], что для улучшения литейных свойств никеля и получения качественных сварных соединений, обладающих стабильными высокими механическими и коррозионными свойствами, необходимо легировать металл шва кремнием в пределах 1—1,5%, марганцем 1—2%, титаном 0,3—0,6% и алюминием 0,4—0,8%.

В зависимости от метода сварки никеля могут быть применены различные способы легирования металла шва.

Наиболее надежным способом легирования является применение электродной проволоки определенного состава в сочетании с нейтральным нелегирующим электродным покрытием, флюсом или инертной газовой средой. Однако использование при сварке никеля и его сплавов специальных легированных проволок связано с рядом трудностей, таких как необходимость выпуска большого числа специальных легированных проволок различных составов, сложность и трудоемкость их изготовления, высокая стоимость и дефицитность.

При ручной сварке открытой дугой легирование шва может легко осуществляться через электродное покрытие, в состав которого вводятся соответствующие порошки металлов или ферросплавов.

При автоматической и полуавтоматической сварке под обычными плавными флюсами, состоящими в основном из окислов элементов, легирование металла шва является следствием физико-химических процессов между окислами флюса, такими как  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{SiO}_2$  и другими и никелем. В системах металл — шлак, металл — газовая фаза в сварочной дуге протекают процессы диссоциации ряда окислов и их восстановление. Степень легирования металла шва в этом случае обычно мала и чаще всего недостаточна для придания ему определенных свойств. К тому же легирование шва осуществляется не всеми необходимыми элементами, а только теми, окислы которых имеются во флюсе. Таким образом, регулировать состав металла шва при сварке никеля под плавными флюсами, без применения специальной проволоки, не представляется возможным.

Неплавленные или керамические флюсы, предложенные К. К. Хреновым [19, 20], свободны от указанного недостатка. Практически всегда можно создать такой керамический флюс, который бы обеспечил получение заданного химического состава сварного шва. В небольших количествах можно вводить в металл шва из керамического флюса даже такие легкоокисляющиеся элементы, как алюминий, титан и др. Степень легирования металла шва при сварке под керамическими флюсами зависит от концентрации легирующего элемента во флюсе, а также от соотношения количеств расплавляемых дугой металла и флюса. Это соотношение при автоматической и полуавтоматической сварке под керамическими флюсами необходимо строго соблюдать, т. е. выдерживать рекомендуемые режимы сварки, разработанные для определенных видов сварных соединений. Эта задача облегчается тем обстоятельством, что керамические флюсы, имея в своем составе большое количество сильных ионизаторов (элементов с низким потенциалом ионизации, таких как калий, натрий и др.), обладают высокими стабилизирующими свойствами, обеспечивающими устойчивость процесса сварки. Колебания напряжения дуги при автоматической сварке под керамическими флюсами, как показали многочисленные наблюдения, не превышают 2—3 в. Естественно, что такие незначительные изменения напряжения дуги не оказывают заметного влияния на химический состав металла шва. Недопустимые отклонения в составе шва получаются лишь при грубых нарушениях режима сварки или значительных изменениях в составе флюса, но в подобных условиях не меньшие изменения состава сварного шва дадут и любые другие способы сварки плавлением.

Наиболее точно заданный химический состав металла шва может быть получен при применении электродной проволоки соответствующего состава в сочетании с нейтральными покрытиями, флюсами, защитными газами.

Вместе с тем легирование металла шва через активные керамические флюсы и электродные покрытия так же позволяет получать необходимый химический состав металла с достаточной точностью, но гораздо более дешевыми, простыми и доступными средствами.



Отмеченное обстоятельство является одной из причин широкого применения керамических флюсов для выполнения самых различных сварочных и наплавочных работ.

### Металлургические процессы при электродуговой сварке никеля

Зона плавления сварочной дуги характерна протеканием в ней сложных физико-химических процессов. Наибольшее практическое значение для металлургии сварки плавлением имеют реакции между газовой фазой, шлаком и расплавленным металлом.

Возможность указанных реакций и их направление может быть установлено термодинамическими расчетами, при выполнении которых предполагается равновесное состояние реагентов и чисто термическое действие дуги.

Термодинамическое равновесие любой системы определяется неизменными концентрациями присутствующих в ней веществ. Однако расплавленный металл, шлак и газовая фаза в процессе сварки непрерывно изменяют свою температуру и разбавляются все новыми порциями еще непрореагировавших веществ. Для электродуговой сварки при высоких скоростях нагрева и охлаждения длительное существование химического равновесия реакций невозможно. Поэтому термодинамические расчеты не могут дать точных количественных значений искомых величин, а служат лишь для качественной оценки протекающих в сварочной дуге металлургических процессов.

Скорость протекания и направление реакций определяются температурой системы, концентрацией реагирующих веществ, давлением и химическим средством к кислороду.

В качестве меры химического сродства принято изменение стандартного изобарного термодинамического потенциала  $\Delta Z_m^0$ , которое для случаев обратимых реакций может быть вычислено по приводимым в литературе [21, 22, 23, 24] приближенным энтропийным уравнениям:

$$\Delta Z_m^0 = \Delta H - \Delta ST,$$

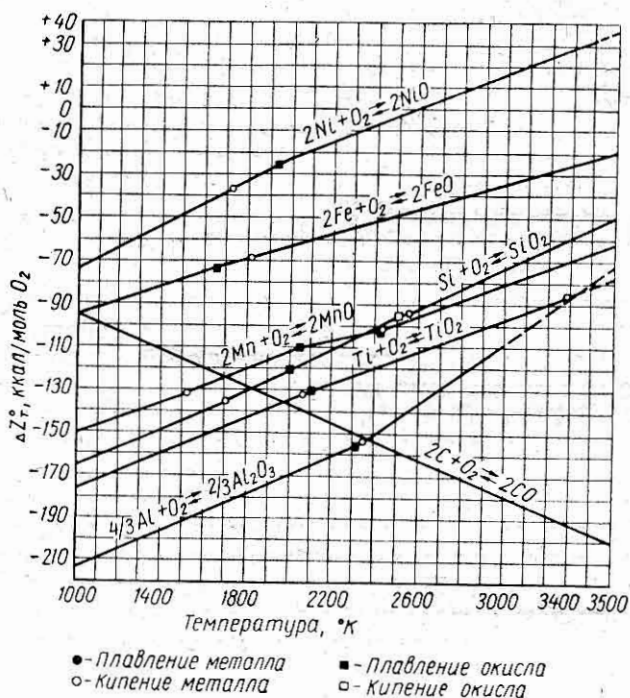
где  $\Delta Z_m^0$  — изменение стандартного изобарного термодинамического потенциала, кал/моль  $O_2$ ;

$\Delta H$  — изменение энтальпии, кал;

$\Delta S$  — изменение энтропии, кал/град;

$T$  — температура по шкале Кельвина.

Химические реакции, соответствующие уравнения для расчета  $\Delta Z$  и интервалы температур, для которых они справедливы, приведены в табл. 15.



Фиг. 20 Зависимость изменения свободной энергии образования оксидов от температуры.

График зависимости  $\Delta Z_m^\circ$  от температуры, построенный по результатам термодинамических расчетов и характеризующий средство элементов к кислороду, приведен на фиг. 20.

Если в результате реакции свободная энергия системы уменьшается, то самопроизвольное протекание реакции возможно и будет проходить тем энергичнее, чем больше убыль свободной энергии. Если в результате реакции свободная энергия системы должна увеличиться, то такая реакция самопроизвольно протекать не может. Если же свободная энергия системы равна нулю, то система находится в состоянии химического равновесия.

Чем больше по абсолютному значению убыль свободной энергии в реакции образования какого-либо окисла, тем выше сродство данного элемента к кислороду и этот элемент будет более сильным раскислителем. Элементы, расположенные в нижней части графика (фиг. 20), обладают бóльшим сродством к кислороду, чем элементы, расположенные в верхней части графика. При температуре плавления никеля, равной  $1725^{\circ}\text{K}$ , наиболее сильными раскислителями, в порядке убывания силы сродства к кислороду, будут алюминий, титан, кремний, углерод, марганец и др. Однако с изменением температуры сродство элементов к кислороду также изменяется. Для средней температуры кипения металла при сварке никеля, равной  $3348^{\circ}\text{K}$ , наиболее сильными раскислителями уже будут углерод, алюминий, титан, марганец, кремний и др.

В теории сварочных процессов при определении сродства элементов к кислороду часто пользуются величиной упругости диссоциации окислов. Величины упругости диссоциации, с достаточной для практического использования степенью точности, можно получить из уравнения изотермы реакции:

$$\Delta Z_m^0 = -4,575T \lg K.$$

Полагая, что  $K_p = P_{\text{O}_2}$ , будем иметь:

$$\lg P_{\text{O}_2} = -\frac{\Delta Z_m^0}{4,575T}.$$

Подставляя вместо  $\Delta Z_m^0$  его значения из уравнений  $\Delta Z_m^0 = \Delta H - \Delta ST$ , получим:

$$\lg P_{\text{O}_2} = -\frac{\Delta Z_m^0}{4,575T} + \frac{\Delta S}{4,575}.$$

Химические реакции, уравнения для расчета  $\lg P_{\text{O}_2}$  и интервалы температур, для которых они справедливы, приведены в табл. 15.

График зависимости упругости диссоциации свободных окислов, построенный по результатам термодинамических расчетов, показан на фиг. 21.

Вопрос о направлении реакций при обычных условиях сварки решается сравнением упругости диссоциации окисла данного элемента с парциальным давлением кислорода воздуха  $P_{\text{O}_2}$ , атм. При нормальных условиях ( $0^{\circ}\text{C}$  и  $760$  мм рт. ст.) парциальное давление кислорода

Уравнения реакций, зависимость упругости диссоциации окси

№ уравнений	Химическая реакция	Температурный интервал, °К
1-а	$2\text{Fe}_\alpha + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons 2\text{FeO}_\Gamma$	273—1050
1-б	$2\text{Fe}_\beta + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons 2\text{FeO}_\Gamma$	1050—1183
1-в	$2\text{Fe}_\gamma + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons 2\text{FeO}_\Gamma$	1183—1643
1-г	$2\text{Fe}_\gamma + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons 2\text{FeO}_\text{ж}$	1643—1673
1-д	$2\text{Fe}_\delta + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons 2\text{FeO}_\text{ж}$	1673—1813
1-е	$2\text{Fe}_\text{ж} + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons 2\text{FeO}_\text{ж}$	1813 и выше
2-а	$2\text{Mn}_\Gamma + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons 2\text{MnO}_\Gamma$	298—1517
2-б	$2\text{Mn}_\text{ж} + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons 2\text{MnO}_\Gamma$	1517—2051
2-в	$2\text{Mn}_\text{ж} + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons 2\text{MnO}_\text{ж}$	2051—2423
2-г	$2\text{Mn}_\Gamma + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons 2\text{MnO}_\Gamma$	2423 и выше
3-а	$\text{Si}_\Gamma + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons \text{SiO}_{2\Gamma}$	298—1687
3-б	$\text{Si}_\text{ж} + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons \text{SiO}_{2\Gamma}$	1687—1986
3-в	$\text{Si}_\text{ж} + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons \text{SiO}_{2\text{ж}}$	1986—2500
3-г	$\text{Si}_\text{ж} + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons \text{SiO}_{2\Gamma}$	2500—2560
3-д	$\text{Si}_\text{ж} + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons \text{SiO}_{2\Gamma}$	2560 и выше
4-а	$\text{Ti}_\Gamma + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons \text{TiO}_{2\Gamma}$	298—2073
4-б	$\text{Ti}_\text{ж} + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons \text{TiO}_{2\Gamma}$	2073—2098
4-в	$\text{Ti}_\text{ж} + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons \text{TiO}_{2\text{ж}}$	2098—3273
5-а	$\frac{4}{3}\text{Al}_\Gamma + \text{O}_{2\Gamma} \rightleftharpoons \frac{2}{3}\text{Al}_2\text{O}_{3\Gamma}$	293—930

слов и термодинамического потенциала от температуры [21, 25]

Уравнения логарифма упругости диссоциации	Уравнения свободной энергии, кал/моль O <sub>2</sub>
$\lg (P_{O_2})_{FeO} = -\frac{28197}{T} + 7,35$	$\Delta Z_m^0 = -129000 + 33,63T$
$\lg (P_{O_2})_{FeO} = -\frac{28262}{T} + 7,42$	$\Delta Z_m^0 = -129300 + 33,94T$
$\lg (P_{O_2})_{FeO} = -\frac{28420}{T} + 7,55$	$\Delta Z_m^0 = -130020 + 34,52T$
$\lg (P_{O_2})_{FeO} = -\frac{25071}{T} + 5,51$	$\Delta Z_m^0 = -114700 + 25,20T$
$\lg (P_{O_2})_{FeO} = -\frac{25178}{T} + 5,57$	$\Delta Z_m^0 = -115190 + 25,50T$
$\lg (P_{O_2})_{FeO} = -\frac{26734}{T} + 6,43$	$\Delta Z_m^0 = -122310 + 29,42T$
$\lg (P_{O_2})_{MnO} = -\frac{40197}{T} + 7,58$	$\Delta Z_m^0 = -183900 + 34,70T$
$\lg (P_{O_2})_{MnO} = -\frac{41705}{T} + 8,58$	$\Delta Z_m^0 = -190800 + 39,25T$
$\lg (P_{O_2})_{MnO} = -\frac{35454}{T} + 5,53$	$\Delta Z_m^0 = -162200 + 25,30T$
$\lg (P_{O_2})_{MnO} = -\frac{41071}{T} + 7,85$	$\Delta Z_m^0 = -187900 + 35,91T$
$\lg (P_{O_2})_{SiO_2} = -\frac{45530}{T} + 9,49$	$\Delta Z_m^0 = -208300 + 43,43T$
$\lg (P_{O_2})_{SiO_2} = -\frac{47600}{T} + 10,72$	$\Delta Z_m^0 = -217770 + 49,045T$
$\lg (P_{O_2})_{SiO_2} = -\frac{47141}{T} + 10,49$	$\Delta Z_m^0 = -215670 + 47,985T$
$\lg (P_{O_2})_{SiO_2} = -\frac{28015}{T} + 2,84$	$\Delta Z_m^0 = -128170 + 12,985T$
$\lg (P_{O_2})_{SiO_2} = -\frac{47687}{T} + 10,52$	$\Delta Z_m^0 = -218170 + 48,141T$
$\lg (P_{O_2})_{TiO_2} = -\frac{47541}{T} + 9,05$	$\Delta Z_m^0 = -217500 + 41,40T$
$\lg (P_{O_2})_{TiO_2} = -\frac{48492}{T} + 9,51$	$\Delta Z_m^0 = -221850 + 43,50T$
$\lg (P_{O_2})_{TiO_2} = -\frac{46000}{T} + 8,32$	$\Delta Z_m^0 = -210450 + 38,07T$
$\lg (P_{O_2})_{Al_2O_3} = -\frac{56087}{T} + 9,46$	$\Delta Z_m^0 = -256600 + 43,3T$

№ уравнений	Химическая реакция	Температурный интервал, °К
5-б	$\frac{4}{3}\text{Al}_{\text{ж}} + \text{O}_{2\text{г}} \rightleftharpoons \frac{2}{3}\text{Al}_2\text{O}_{3\text{г}}$	930—2323
5-в	$\frac{4}{3}\text{Al}_{\text{ж}} + \text{O}_{2\text{г}} \rightleftharpoons \frac{2}{3}\text{Al}_2\text{O}_{3\text{ж}}$	2323—2329
5-г	$\frac{4}{3}\text{Al}_{\text{г}} + \text{O}_{2\text{г}} \rightleftharpoons \frac{2}{3}\text{Al}_2\text{O}_{4\text{ж}}$	2329—2980
6-а	$2\text{Ni}_{\text{г}} + \text{O}_{2\text{г}} \rightleftharpoons 2\text{NiO}_{\text{г}}$	298—1725
6-б	$2\text{Ni}_{\text{ж}} + \text{O}_{2\text{г}} \rightleftharpoons 2\text{NiO}_{\text{г}}$	1725—1933
6-в	$2\text{Ni}_{\text{ж}} + \text{O}_{2\text{г}} \rightleftharpoons 2\text{NiO}_{\text{ж}}$	1933—3348
7-а	$2\text{C}_{\text{г}} + \text{O}_{2\text{г}} \rightleftharpoons 2\text{CO}_{\text{г}}$	300—3500

Примечание. 1. В таблице приняты следующие обозначения: Г — твердое состояние, Ж — жидкое состояние. NiO<sub>ж</sub> — NiO<sub>г</sub> из-за отсутствия данных не может быть учтено.

в воздухе составляет 0,21 атм. Логарифм этого парциального давления равен примерно 0,68.

Если упругость диссоциации окисла меньше парциального давления кислорода в атмосфере  $P_{\text{O}_2} < P_{\text{O}_2\text{атм}}$ , то протекает реакция окисления металла и тем энергичнее, чем больше разность  $P_{\text{O}_2\text{атм}} - P_{\text{O}_2}$ .

При равенстве упругости диссоциации окисла и парциального давления кислорода в атмосфере  $P_{\text{O}_2} = P_{\text{O}_2\text{атм}}$  наступает состояние химического равновесия и реакция приостанавливается.

Если же упругость диссоциации окисла будет превышать парциальное давление кислорода в атмосфере  $P_{\text{O}_2} > P_{\text{O}_2\text{атм}}$ , то будет протекать реакция восстановления металла и тем энергичнее, чем больше разность  $P_{\text{O}_2} - P_{\text{O}_2\text{атм}}$ .

Для любого окисла область графика (фиг. 21), лежащая выше соответствующей кривой, определяет условия устойчивого существования данного элемента в свободном состоянии, т. е. в чистом виде, а область графика ниже этой кривой определяет условия существования окисла данного элемента.

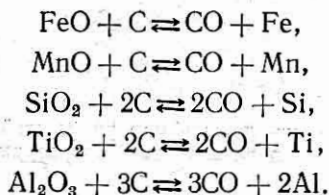
Уравнения логарифма упругости диссоциации	Уравнения свободной энергии, кал/моль O <sub>2</sub>
$\lg (P_{O_2})_{Al_2O_3} = -\frac{56291}{T} + 9,68$	$\Delta Z_m^0 = -257530 + 44,3T$
$\lg (P_{O_2})_{Al_2O_3} = -\frac{52483}{T} + 8,04$	$\Delta Z_m^0 = -240110 + 36,8T$
$\lg (P_{O_2})_{Al_2O_3} = -\frac{70299}{T} + 15,69$	$\Delta Z_m^0 = -321620 + 71,8T$
$\lg (P_{O_2})_{NiO} = -\frac{26059}{T} + 10,07$	$\Delta Z_m^0 = -119220 + 46,07T$
$\lg (P_{O_2})_{NiO} = -\frac{27895}{T} + 11,13$	$\Delta Z_m^0 = -127620 + 50,94T$
$\lg (P_{O_2})_{NiO} = -\frac{23957}{T} + 9,10$	$\Delta Z_m^0 = -109604,4 + 41,62T$
$\lg (P_{O_2})_{CO} = -\frac{11670}{T} - 9,16$	$\Delta Z_m^0 = -53400 - 41,90T$

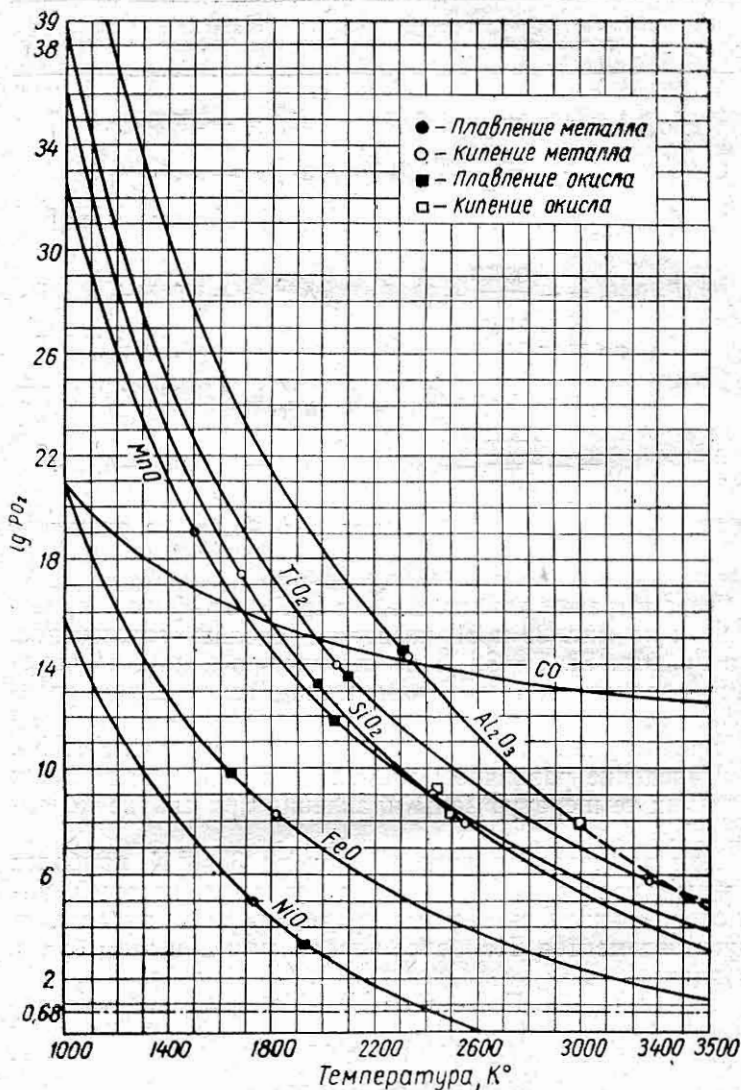
дая фаза; Ж — жидкая фаза; Г — газовая фаза. 2. Фазовое превращение

Рассмотрение кривых  $\Delta Z_m^0$  и  $\lg P_{O_2}$  графиков, приведенных на фиг. 20 и 21, позволяет сделать заключение, что Fe, Mn, Si, Ti, C, Al по отношению к никелю являются раскислителями. С изменением температуры сродство указанных элементов к кислороду также изменяется, причем у Al, Ti, Si, Mn более резко, чем у C, Fe и Ni.

Поведение различных элементов в областях высоких и низких температур зоны плавления при сварке неодинаково.

При температуре кипения никеля 3348° К наиболее сильным раскислителем является углерод, который, интенсивно окисляясь, будет препятствовать выгоранию других элементов. Наиболее вероятными при этом будут реакции:

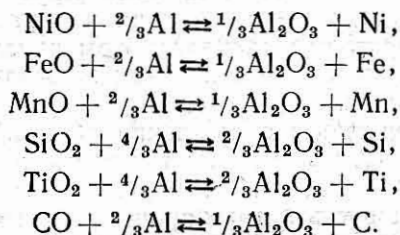




Фиг. 21. Зависимость логарифмов упругостей диссоциации свободных окислов от температуры.



С понижением температуры активность твердого углерода падает. При температуре плавления никеля 1725° К наиболее энергичным раскислителем становится алюминий. В этом случае будут иметь место следующие реакции:



Таким образом, при электродуговой сварке никеля для раскисления сварочной ванны и легирования металла шва марганцем, кремнием, титаном и алюминием достаточно одновременно ввести указанные элементы в зону плавления дуги в виде чистых порошков или ферросплавов. Количество вводимых легирующих элементов должно быть выбрано с учетом их коэффициентов усвоения и в дальнейшем откорректировано экспериментальным путем.

Легирование металла шва может осуществляться не только за счет введения в зону плавления химически свободных легирующих примесей и предохранения их от окисления энергичными раскислителями. В процессе сварки, как правило, протекают процессы диссоциации отдельных окислов флюса или покрытия электродов с последующим растворением восстановленных элементов в жидком металле. Процесс этот можно объяснить следующим образом.

Как известно, с повышением температуры активизируются эндотермические реакции и процессы, протекающие с поглощением тепла: например, в положительном столбе дуги, где температура достигает 6000—7000° К достаточно полно происходит диссоциация окислов железа, марганца, кремния и др.

По мере снижения температуры экзотермические реакции, при которых выделяется тепло, становятся доминирующими, т. е. в низкотемпературных областях реакционной зоны преобладают процессы образования окислов из диссоциированных частиц.

Так как процессы эти обратимы и при изменении температуры сдвигаются в том или ином направлении, то казалось бы, что после нагрева и последующего охлаждения никаких изменений в системе не произойдет. На самом деле, освободившиеся вследствие диссоциации атомы марганца, железа, кремния и других элементов легко растворяются в расплавленном никеле, чему способствует активное перемешивание жидкого металла в сварочной ванне.

При последующем охлаждении процессы окисления полностью пройти не успевают и часть элементов, восстановленных из окислов, легирует металл шва.

Средняя скорость прямых процессов диссоциации, протекающих главным образом при высоких температурах, выше средней скорости реакций окисления, протекающих в областях более низких температур, что по-видимому также способствует сдвигу равновесия всех реакций в сторону восстановления элементов из окислов.

Находящиеся в зоне плавления в металлическом виде железо, марганец, кремний, титан и алюминий могут растворяться в расплавленном никеле. Для расчета термодинамических характеристик растворов какого-либо элемента в жидком никеле необходимо учитывать изменение свободной энергии растворения данного элемента при различных его концентрациях и температуре.

Известно, что для разбавленных растворов давление пара каждого металла  $P_i$  пропорционально его молярной доле в растворе, т. е.

$$P_i = p_i^0 N_i,$$

где  $p_i^0$  — давление пара растворителя, тогда

$$N_i = \frac{P_i}{p_i^0}.$$

Если принять за первоначальное состояние чистый жидкий элемент, а за конечное — его раствор в жидком никеле, то изменение свободной энергии растворения определится уравнением

$$\Delta Z_{m_{расп}}^0 = 4,575T \lg \frac{P_i}{p_i^0} = 4,575T \lg N_i.$$

Выражая молярную долю легирующих металлов в растворе через их концентрацию ( $\%i, \%j \dots \%f$ ) и атомные веса ( $d_i, d_j \dots d_f$ ), т. е.

$$N_i = \frac{\frac{\%i}{d_i}}{\frac{\%i}{d_i} + \frac{\%j}{d_j} + \dots + \frac{\%f}{d_f}}$$

получим

$$\Delta Z_{m_{расм}}^0 = 4,575T \lg \frac{\frac{\%i}{d_i}}{\frac{\%i}{d_i} + \frac{\%j}{d_j} + \dots + \frac{\%f}{d_f}}$$

Для случая растворения в жидком никеле железа, марганца, кремния, титана и алюминия будем иметь:

$$\Delta Z_{m_{расм}}^0 = 4,575T \lg \frac{d_{Ni} \cdot \%Me}{100 \cdot d_{Me} + K \cdot \%Me}, \quad (8)$$

где  $d_{Ni} = 58,69$  — атомный вес никеля;

$d_{Me}$  — атомный вес легирующего элемента;

$\%Me$  — концентрация легирующего элемента в двух-компонентном растворе;

$K$  — коэффициент, определяемый как разность  $d_{Ni} - d_{Me}$  и равный:  $K_{Fe} = 2,84$ ;  $K_{Mn} = 3,75$ ;  $K_{Si} = 30,60$ ;  $K_{Ti} = 10,79$ ;  $K_{Al} = 31,71$ .

Из-за отсутствия термодинамических данных активностей (коэффициентов активности) железа, марганца, кремния, титана и алюминия в жидком никеле при высоких температурах сварочного процесса в уравнение [8] подставлены значения концентраций этих элементов. По нашему мнению, возможность такой замены вполне допустима. Расчеты, несмотря на некоторую неточность, не теряют своего значения для качественной характеристики протекающих в зоне плавления процессов.

Для частных случаев растворения в никеле железа, марганца, кремния, титана и алюминия уравнение (8) изменения свободной энергии растворения  $\Delta Z_{m_{расм}}^0$  будет иметь вид:

$$\Delta Z_{m_{расм}}^0 = 4,575T \lg \frac{58,69 \cdot \%Fe}{5585 + 2,84 \cdot \%Fe}, \quad (9)$$

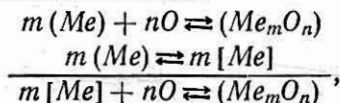
$$\Delta Z_{m_{расм}}^0 = 4,575T \lg \frac{58,69 \%Mn}{5494 + 3,75 \cdot \%Mn}, \quad (10)$$

$$\Delta Z_{m_{расст}}^0 = 4,575T \lg \frac{58,69 \cdot \%Si}{2809 + 30,60 \cdot \%Si}, \quad (11)$$

$$\Delta Z_{m_{расст}}^0 = 4,575T \lg \frac{58,69 \cdot \%Ti}{4790 + 10,79 \cdot \%Ti}, \quad (12)$$

$$\Delta Z_{m_{расст}}^0 = 4,575T \lg \frac{58,69 \cdot \%Al}{2698 + 31,71 \cdot \%Al}. \quad (13)$$

Полное изменение свободной энергии растворения легирующего элемента в системе

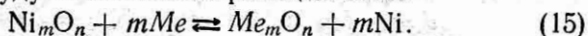


в общем виде будет равно:

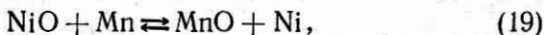
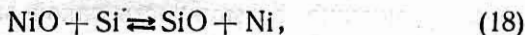
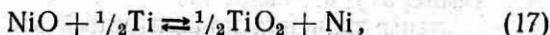
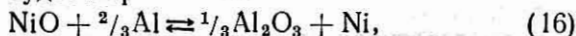
$$\Delta Z_{m_{сис}}^0 = \Delta Z_{m_{дис}}^0 - \Delta Z_{m_{расст}}^0. \quad (14)$$

Уравнения химических реакций и изменения свободной энергии растворения элементов в жидком никеле приведены в табл. 16.

Растворенные в жидком никеле железо, марганец, кремний, титан и алюминий могут образовывать твердые растворы, химические соединения или, что более всего вероятно, выступать в качестве раскислителей. В последнем случае будут иметь место реакции типа:

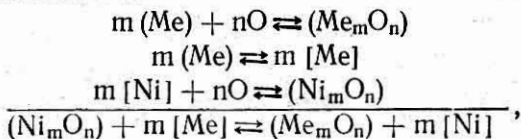


Для частных случаев раскисления жидкого никеля алюминием, титаном, кремнием, марганцем и железом реакция (15) будет выражаться:



Реакция (18) справедлива лишь для температур выше 2173° К.

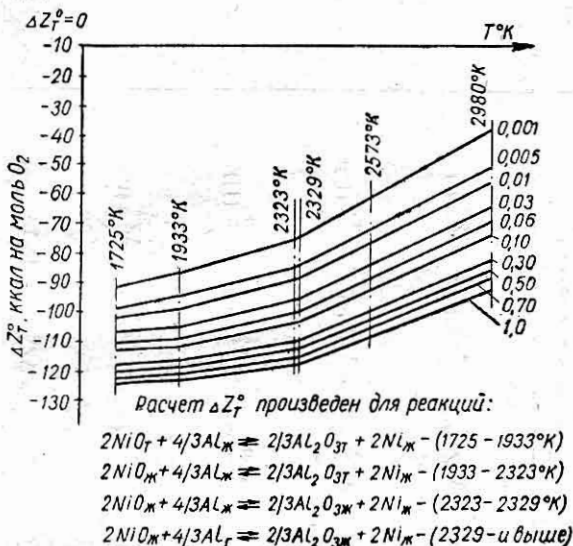
Полное изменение свободной энергии раскисления жидкого никеля в системе



в общем виде будет равно:

$$\Delta Z_{m_{\text{сисг}}}^0 = \Delta Z_{m_{\text{дисс}}}^0 - \Delta Z_{m_{\text{раст}}}^0 - \Delta Z_{m_{\text{раск}}}^0. \quad (21)$$

Уравнения химических реакций и изменения свободной энергии раскисления жидкого никеля приведены в табл. 17.



Фиг. 22. Зависимость изменения свободной энергии раскисления жидкого никеля алюминием от температуры и концентрации.

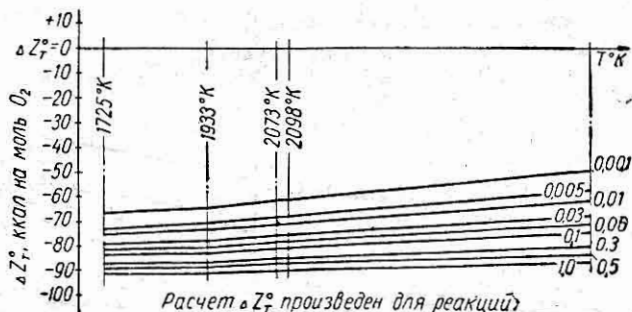
Построенные по результатам термодинамических расчетов графики изменения свободной энергии раскисления никеля алюминием, титаном, кремнием, марганцем и железом в зависимости от температуры и концентрации представлены на фиг. 22—26.

Рассмотрев графики изменения свободной энергии раскисления никеля алюминием, титаном, кремнием, марганцем и железом, можно сделать вывод, что раскисляющая способность указанных элементов с увеличением температуры снижается, а с увеличением их концентрации — повышается. Растворенные в жидком никеле алюминий и титан даже в небольших концентрациях, порядка 0,001% (фиг. 22, 23), могут служить раскислителями.

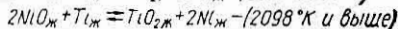
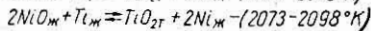
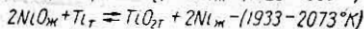
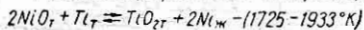
Таблица 16

Уравнения химических реакций и свободной энергии растворения элементов в жидком никеле

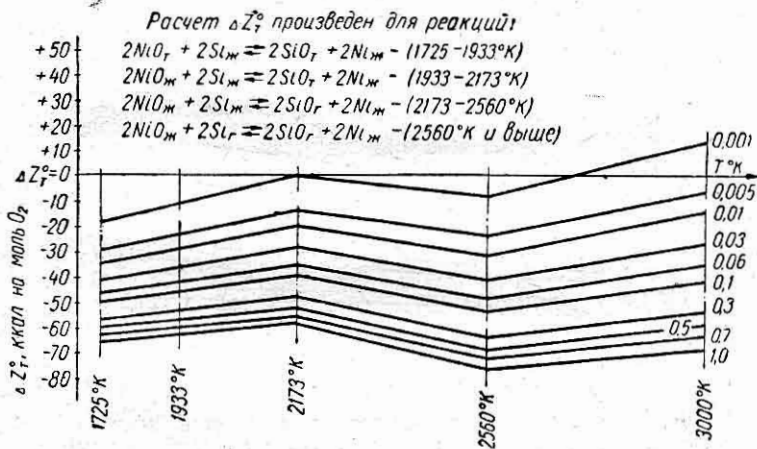
Химическая реакция	Уравнения свободной энергии, ккал/моль O <sub>2</sub>	№ уравнений
$\begin{aligned} 2(\text{Fe}) + \text{O}_2 &\rightleftharpoons 2(\text{FeO}) \\ 2(\text{Fe}) &\rightleftharpoons 2[\text{Fe}] \\ 2[\text{Fe}] + \text{O}_2 &\rightleftharpoons 2(\text{FeO}) \end{aligned}$	$\Delta Z_{m \text{ сист}}^0 = \Delta Z_m^0(1) - 2\Delta Z_m^0(9)$	14-а
$\begin{aligned} 2(\text{Mn}) + \text{O}_2 &\rightleftharpoons 2(\text{MnO}) \\ 2(\text{Mn}) &\rightleftharpoons 2[\text{Mn}] \\ 2[\text{Mn}] + \text{O}_2 &\rightleftharpoons 2(\text{MnO}) \end{aligned}$	$\Delta Z_{m \text{ сист}}^0 = \Delta Z_m^0(2) - 2\Delta Z_m^0(10)$	14-б
$\begin{aligned} (\text{Si}) + \text{O}_2 &\rightleftharpoons (\text{SiO}_2) \\ (\text{Si}) &\rightleftharpoons [\text{Si}] \\ [\text{Si}] + \text{O}_2 &\rightleftharpoons (\text{SiO}_2) \end{aligned}$	$\Delta Z_{m \text{ сист}}^0 = \Delta Z_m^0(3) - \Delta Z_m^0(11)$	14-в
$\begin{aligned} (\text{Ti}) + \text{O}_2 &\rightleftharpoons (\text{TiO}_2) \\ (\text{Ti}) &\rightleftharpoons [\text{Ti}] \\ [\text{Ti}] + \text{O}_2 &\rightleftharpoons (\text{TiO}_2) \end{aligned}$	$\Delta Z_{m \text{ сист}}^0 = \Delta Z_m^0(4) - \Delta Z_m^0(12)$	14-г
$\begin{aligned} \frac{4}{3}(\text{Al}) + \text{O}_2 &\rightleftharpoons \frac{2}{3}(\text{Al}_2\text{O}_3) \\ \frac{4}{3}(\text{Al}) &\rightleftharpoons \frac{4}{3}[\text{Al}] \\ \frac{4}{3}[\text{Al}] + \text{O}_2 &\rightleftharpoons \frac{2}{3}(\text{Al}_2\text{O}_3) \end{aligned}$	$\Delta Z_{m \text{ сист}}^0 = \Delta Z_m^0(5) - \frac{4}{3}\Delta Z_m^0(13)$	14-д



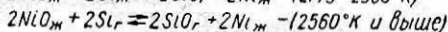
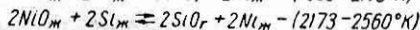
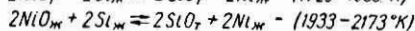
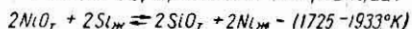
Расчет  $\Delta Z_T^\circ$  произведен для реакций



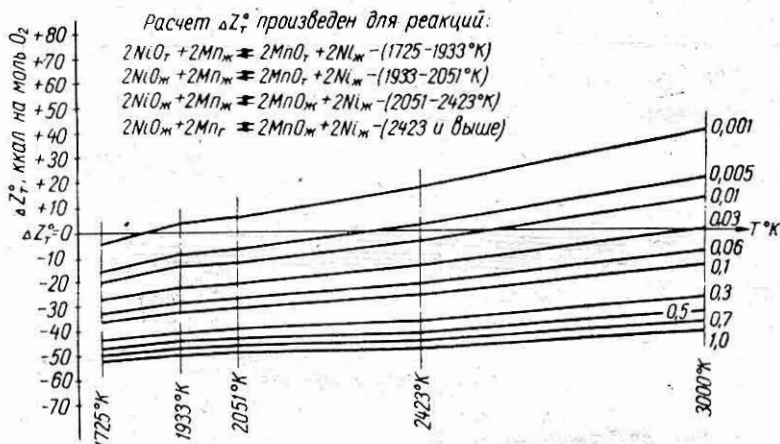
Фиг. 23. Зависимость изменения свободной энергии раскисления жидкого никеля титаном от температуры и концентрации.



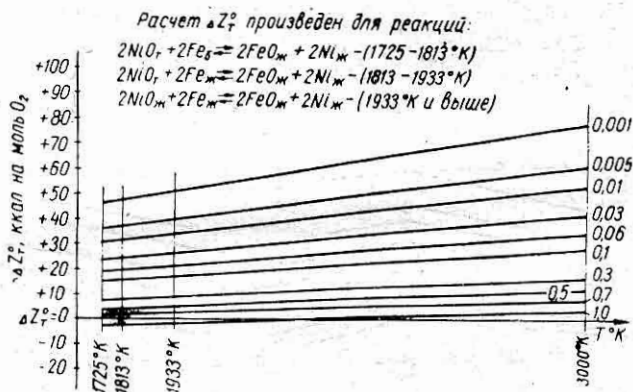
Расчет  $\Delta Z_T^\circ$  произведен для реакций



Фиг. 24. Зависимость изменения свободной энергии раскисления жидкого никеля кремнием от температуры и концентрации.



Фиг. 25. Зависимость изменения свободной энергии раскисления жидкого никеля марганцем от температуры и концентрации.



Фиг. 26. Зависимость изменения свободной энергии раскисления жидкого никеля железом от температуры концентрации.



## Уравнения химических реакций и свободной энергии раскисления жидкого никеля различными элементами

Химическая реакция	Уравнения свободной энергии, кал/мол. O <sub>2</sub>	№ уравнений
$\frac{4}{3}(\text{Al}) + \text{O}_2 \rightleftharpoons \frac{2}{3}(\text{Al}_2\text{O}_3)$ $2[\text{Ni}] + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2(\text{NiO})$	$\Delta Z_m^0 \text{ сист} = \Delta Z_m^0 (5) - \frac{4}{3}\Delta Z_m^0 (13) - \Delta Z_m^0 (6)$	21-а
$2(\text{NiO}) + \frac{4}{3}[\text{Al}] \rightleftharpoons \frac{2}{3}(\text{Al}_2\text{O}_3) + 2[\text{Ni}]$	$\Delta Z_m^0 \text{ сист} = \Delta Z_m^0 (4) - \Delta Z_m^0 (12) - \Delta Z_m^0 (6)$	21-б
$2[\text{Ni}] + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2(\text{NiO})$ $2(\text{NiO}) + [\text{Ti}] \rightleftharpoons (\text{TiO}_2) + 2[\text{Ni}]$	$\Delta Z_m^0 \text{ сист} = \Delta Z_m^0 (3) - \Delta Z_m^0 (11) - \Delta Z_m^0 (6)$	21-в
$2(\text{Ni}) + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2(\text{NiO})$ $2(\text{NiO}) + [\text{Si}] \rightleftharpoons (\text{SiO}_2) + 2[\text{Ni}]$	$\Delta Z_m^0 \text{ сист} = \Delta Z_m^0 (2) - 2\Delta Z_m^0 (10) - \Delta Z_m^0 (6)$	21-г
$2(\text{Mn}) + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2(\text{MnO})$ $2[\text{Ni}] + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2(\text{NiO})$ $2(\text{NiO}) + 2[\text{Mn}] \rightleftharpoons 2(\text{MnO}) + 2[\text{Ni}]$	$\Delta Z_m^0 \text{ сист} = \Delta Z_m^0 (1) - 2\Delta Z_m^0 (9) - \Delta Z_m^0 (6)$	21-д
$2(\text{Fe}) + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ $2[\text{Ni}] + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2(\text{NiO})$ $2(\text{NiO}) + 2[\text{Fe}] \rightleftharpoons 2(\text{FeO}) + 2[\text{Ni}]$		

Концентрация кремния и марганца (фиг. 24, 25), при которых они способны надежно раскислять никель, равны соответственно 0,005 и 0,03%.

Железо (фиг. 26) при концентрациях его до 1,0% не может служить раскислителем никеля. Это объясняется тем, что упругость диссоциации закиси железа в указанных условиях больше упругости диссоциации закиси никеля. При других температурах или больших концентрациях железа в никеле упругость диссоциации закиси железа может стать меньше упругости диссоциации закиси никеля. В таких условиях железо по отношению к никелю будет раскислителем.

Железо, являясь случайной примесью в зоне плавления при сварке никеля, в небольших количествах не оказывает заметного влияния на свойства металла шва. Поэтому реакции взаимодействия железа с другими элементами в данной системе не представляют большого практического интереса.

### **Химический состав и структура сварных швов технического никеля**

Механические, технологические и коррозионные свойства сварных швов находятся в прямой зависимости от их химического состава и структуры.

Для получения заданного химического состава металл швов при сварке никеля необходимо легировать, как указывалось выше, марганцем, кремнием, титаном и алюминием. При электродуговой сварке качественными электродами или под флюсом легирование шва начинается с момента образования на конце электрода капля расплавленного металла. Высокая температура дуги, малый объем и интенсивное перемешивание металла способствуют насыщению капля легирующими элементами покрытия или флюса.

В табл. 18 показан химический состав каплей, образовавшихся на конце электрода при автоматической сварке никеля под керамическим флюсом. Для сравнения приведен также состав металла сварных швов.

Из данных табл. 18 видно, что капля на конце электрода представляет собой уже в значительной мере легированный металл. При переходе капля в сварочную ванну осуществляется разбавление расплавленного ме-

талла, выравнивание его состава, а затем дополнительное и окончательное легирование. Изменяя содержание в покрытии или флюсе легирующих элементов, можно в достаточно широких пределах регулировать химический состав металла швов. При введении в зону плавления легирующих элементов необходимо учитывать их коэффициенты усвоения, так как часть этих элементов теряется в результате окисления и попадания в шлак.

Таблица 18

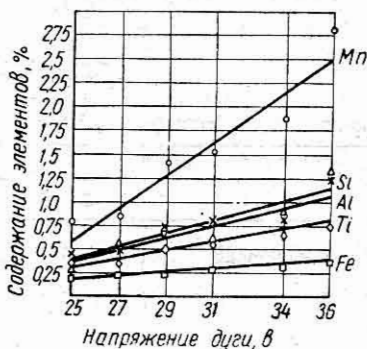
Химический состав электродных капель и металла сварных швов при автоматической сварке никеля под керамическим флюсом

Объект исследования	Содержание элементов, %						
	C	Mn	Si	Fe	Ti	S	P
Металл капель . . . . .	0,05	2,68	0,93	0,28	1,04	0,009	0,027
Металл шва 1-го слоя сварки . . . . .	0,03	2,27	0,61	0,45	0,97	0,009	0,046
Металл шва 5-го слоя сварки . . . . .	0,05	4,12	1,98	0,56	1,48	0,009	0,044

Химический состав металла швов зависит не только от количества вводимых в зону плавления легирующих элементов, но и от соотношения взаимодействующих между собой масс расплавленных металла и шлака. На количество последних большое влияние оказывает режим сварки и особенно величина напряжения дуги. Практически установлено, что чем больше введено в зону плавления легирующих элементов, тем большее влияние на химический состав шва оказывает режим сварки. Причем влияние изменения тока значительно меньше влияния изменения напряжения дуги. Это объясняется в основном тем, что количество шлака, взаимодействующего с расплавленным металлом, прямо пропорционально напряжению дуги.

На фиг. 27 показано влияние напряжения дуги на химический состав металла шва при сварке никеля под керамическим флюсом. Состав указанного флюса приведен в табл. 44. Повышение напряжения при постоянном токе дуги ведет к увеличению количества расплавившегося флюса и степени легирования шва. В наибольшей мере изменение напряжения дуги сказывается на переходе в металл шва марганца, затем кремния, алюминия, титана и железа.

Так как допускаются некоторые колебания составов основного металла и наплавленного, то возможны и небольшие колебания режимов сварки. Для получения заданного состава, структуры и свойств металла шва, как установлено практикой, электродуговую сварку никеля следует производить при напряжении **30—34 в.**



Фиг. 27. Влияние напряжения дуги на химический состав металла швов, выполненных при автоматической сварке никеля под керамическим флюсом.

В весьма сильной степени на свойства сварных швов оказывает влияние структура металла.

Технический никель представляет собой однофазный твердый раствор с гранцентрированной решеткой и имеет структуру типичного аустенита. Характерной особенностью микроструктуры сварных швов никеля является их столбчатое дендритное строение. Первичная структура этих швов состоит из больших столбчатых кристаллитов, на-

правленных перпендикулярно к линии сплавления в направлении максимального градиента температур. В каждом из больших кристаллитов имеются группы отдельных одинаково ориентированных элементарных кристаллитов.

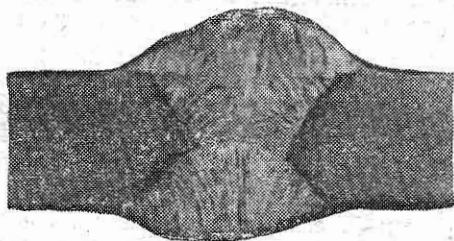
В сварных швах никеля благодаря высокой стабильности аустенитной структуры вторичная кристаллизация не наблюдается, так как после затвердевания сварочной ванны фиксируется первичная структура.

Однако вслед за процессом кристаллизации происходит полигонизация металла шва [26], заключающаяся в дроблении уже сформировавшейся столбчатой структуры и образовании новых кристаллитов. Напряжения и деформации, возникающие при кристаллизации металла, ускоряют полигонизацию и уменьшают температурный интервал этого процесса. Границы новых кристаллитов представляют собой скопление субмикроскопических дефектов (пустот) кристаллической решетки. При наличии в металле четко выраженной столбчатой структуры поли-

гонизационные границы совпадают с направлением кристаллитов. При дезориентированной структуре металла эти границы располагаются в произвольных направлениях.

При определенных условиях полигонизационные границы могут развиваться в межкристаллические микротрещины с последующим превращением их в макродфект.

Сварные швы никеля обладают транскристаллической макроструктурой, четко выраженной в многослойных



Фиг. 28. Направленная транскристаллическая структура сварных никелевых швов.

швах. Столбчатые кристаллы каждого последующего слоя служат продолжением кристаллитов нижележащего слоя [фиг. 28]. В результате образуются кристаллы, как бы перерастающие из слоя в слой.

Для того чтобы повысить свойства сварных швов, приблизить их к свойствам основного свариваемого металла, необходимо максимально измельчить и дезориентировать структуру металла шва.

В настоящее время известно много способов частичного или полного измельчения металла чисто аустенитных швов.

В литературе [13, 27] имеются сообщения об измельчении структуры сварных швов путем воздействия на сварочную ванну ультразвуковыми колебаниями или механическими вибрациями.

Прокровка металла швов непосредственно после сварки обеспечивает значительное утонение их структуры [28].

Измельчение структуры аустенитных швов наблюдается также при достаточных концентрациях элементов, способствующих образованию высокотемпературных

избыточных фаз, таких как феррит, эвтектики и карбиды [13, 27].

По нашему мнению, наиболее надежным и в то же время сравнительно простым способом измельчения структуры никелевых швов является введение в сварочную ванну небольших количеств модификаторов (титана, алюминия и молибдена), либо поверхностно-активных элементов (циркония, стронция и церия).

Присутствующие в жидком никеле элементы-модификаторы при охлаждении становятся дополнительными центрами кристаллизации, в результате чего образуется большое число элементарных кристаллитов малых размеров.

Поверхностно-активные примеси, введенные в сварочную ванну, в процессе кристаллизации адсорбируются на границах кристаллов и тем самым препятствуют их росту.

Авторами проведены опыты по определению влияния на структуру сварных швов никеля таких элементов, как марганец, кремний, алюминий и титан. Ввиду того, что указанные элементы вводились в шов в качестве легирующих примесей, влияние их малых концентраций на структуру не изучалось.

Марганец и кремний, соответственно, в количествах до 5 и 2% не оказывают сильного влияния на изменение структуры, хотя и замечается тенденция к некоторому ее утонению.

Увеличение содержания в шве алюминия приводит к заметному уменьшению величины элементарных кристаллитов. На фиг. 29 показана микроструктура сварных швов никеля, выполненных автоматической сваркой под керамическим флюсом и содержащих различное количество алюминия. При сравнительно небольшом количестве (0,23%) алюминий образует с никелем во время кристаллизации сварочной ванны твердый раствор, чем способствует развитию процесса полигонизации и появлению произвольных полигонизационных границ кристаллитов (фиг. 29, а). При содержании алюминия 0,34% и выше структура металла швов заметно измельчается, а полигонизационные границы кристаллитов на шлифах обнаруживаются (фиг. 29, б, в, г). По-видимому, в указанных количествах алюминий образует в никеле избыточную вторичную фазу и тем самым препятствует процессу полигонизации.

Влияние титана на структуру никелевых швов аналогично действию алюминия, но проявляется в значительно большей степени. На фиг. 30 показана микроструктура



Фиг. 29. Микроструктура сварных швов никеля при автоматической сварке под керамическим флюсом,  $\times 135$ .

Металл швов содержит алюминия:

*a* — 0,23%; *б* — 0,34%; *в* — 0,90%; *г* — 0,51 %.

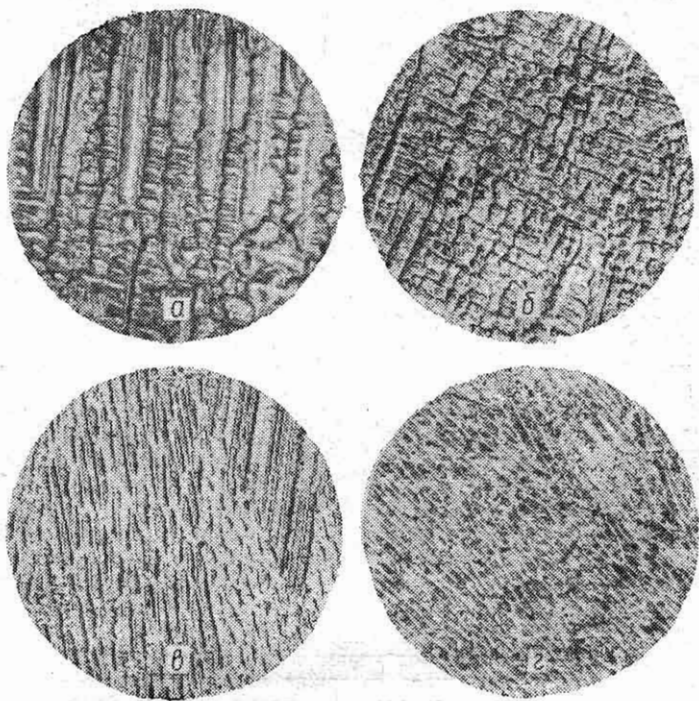
сварных швов никеля со средним химическим составом, приведенным в табл. 19, но с различным содержанием титана.

Таблица 19

Средний химический состав сварных швов, выполненных автоматической сваркой под керамическим флюсом

Содержание элементов, %						
C	Mn	Si	Fe	Al	S	P
0,04—0,06	2,0—2,5	0,8—1,0	0,3—0,4	0,3—0,5	0,005— 0,008	0,0006— 0,001

При отсутствии в шве титана или небольшом его количестве металл шва имеет четко выраженную столбчатую дендритную структуру (фиг. 30, а, б). Увеличение содержания титана в сварных швах никеля до 1% приводит к резкому измельчению кристаллитов и обеспечивает получение мелкозернистой структуры (фиг. 30, в, г).



Фиг. 30. Микроструктура сварных швов никеля при автоматической сварке под керамическим флюсом,  $\times 135$ .

Металл швов содержит титана:

а — без титана; б — 0,17%; в — 0,50%; г — 0,97%.

Помимо химического состава, модификаторов и легирующих элементов, большое влияние на структуру чистаустенитных швов никеля оказывает режим, условия сварки и термическая обработка сварных соединений.

Изменение напряжения дуги обуславливает ослабление или интенсификацию некоторых металлургических процессов, что, в свою очередь, сказывается на структуре



металла шва. Так, чрезмерное увеличение напряжения дуги, особенно при сварке открытой дугой, может усилить окисление легирующих элементов, что повлечет за собой укрупнение структуры шва. Поэтому, сварку никеля рекомендуется производить минимально короткой дугой.

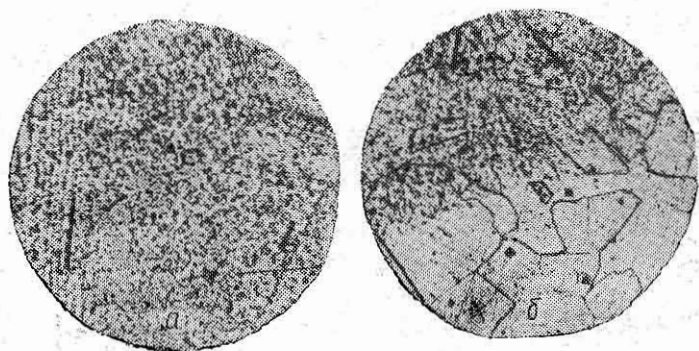
2) Увеличение сварочного тока при постоянной скорости сварки приводит к перегреву металла и увеличению объема сварочной ванны. При этом наблюдается заметное укрупнение структуры швов.

3) Изменение скорости сварки вызывает изменение скорости кристаллизации металла и обуславливает получение различной структуры. С увеличением скорости сварки скорость кристаллизации увеличивается и становится заметным некоторое утонение структуры.

4) Условия теплоотвода при сварке никеля также оказывают влияние на структуру металла швов. При сварке на медной подкладке, т. е. в условиях интенсивного теплоотвода от корня шва, наблюдается образование сравнительно мелкокристаллической структуры. При сварке никеля с предварительным подогревом или на флюсовой подушке, т. е. в условиях замедленного охлаждения, структура швов заметно укрупняется.

5) Вследствие специфических особенностей термического цикла сварки швы обычно находятся в сложнапряженном состоянии. Преобладающее значение в результате быстрого нагрева и охлаждения металла швов приобретают напряжения растяжения. Поэтому с целью частичного или полного снятия этих напряжений, а также для улучшения структуры путем ее измельчения полезно осуществлять соответствующую термическую обработку сварных соединений. Хорошие результаты после сварки никеля обеспечивает нагрев сварных соединений до температуры отжига (700—800° С) с последующим охлаждением их на воздухе. Структура сварных швов, обработанных указанным способом, получается мелкозернистой и дезориентированной, обеспечивающей высокие механические и коррозионные свойства сварных соединений (фиг. 31). Однако, как показала практика, высокотемпературная обработка сварных соединений никеля из-за своей трудоемкости не всегда применима в производственных условиях. Достаточно хорошие результаты обеспечиваются также при низкотемпературной обработке никеле-

5/3.  
вых сварных соединений. При этом швы и прилегающие к ним участки на ширину 30—40 мм нагреваются газовыми горелками до 250—300°С и затем охлаждаются на воздухе. После указанной термообработки напряжения в швах значительно снижаются, а структура металла измельчается.



Фиг. 31. Микроструктура металла шва и переходной зоны после термообработки: нагрев до 700—800°С и охлаждение на воздухе,  $\times 135$ :

а — металл шва, выполненного автоматической сваркой под керамическим флюсом; б — переходная зона.

Измельчению структуры при таком сравнительно низком нагреве способствует наличие больших собственных напряжений, как правило, возникающих в металле швов и достигающих значений предела текучести.

Собственные напряжения искажают кристаллическую решетку металла, повышают энергетический запас системы, вследствие чего для протекания структурных превращений, диффузионных и других процессов, связанных с выравниванием энергетического уровня системы, требуются меньшие затраты энергии.

Таким образом, для получения высококачественных соединений при сварке никеля металл должен подвергаться активной металлургической обработке, целью которой является следующее.

1. Не допускать значительного насыщения расплавленного никеля газами  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$  и другими, которые являются причиной образования дефектов сварных швов.

2. Для улучшения механических и антикоррозионных свойств сварных соединений легировать металл шва небольшими количествами  $Mn$ ,  $Si$ ,  $Al$ ,  $Ti$ .

3. Рафинировать металл шва от вредных примесей, таких как S, P и др.

4. Не допускать образования грубой дендритной структуры в процессе кристаллизации металла шва.

Перечисленные требования могут сравнительно легко удовлетворяться при дуговой сварке никеля с применением активных керамических флюсов или соответствующих электродных покрытий.

---

### III. СПОСОБЫ СВАРКИ И ПАЙКИ НИКЕЛЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Для изготовления конструкций из никеля и высоконикелевых сплавов в настоящее время применяются несколько способов сварки — аргонодуговая, газовая, ручная дуговая, полуавтоматическая, автоматическая и др. Качество и свойства сварных соединений, выполненных разными технологическими способами, естественно, отличаются неодинаковыми.

Особенно важным с практической точки зрения является знание технологических особенностей отдельных методов и приемов сварки никеля и его сплавов.

#### Аргонодуговая сварка никеля

Одним из способов сварки никеля, позволяющих получить удовлетворительное качество соединений, является аргонодуговая сварка. При аргонодуговой сварке расплавленный никель в дуге и сварочной ванне надежно предохраняется от окисления защитной струей аргона, в результате чего обеспечивается постоянное и высокое качество сварных соединений. Этот способ хорошо зарекомендовал себя при сварке никеля толщиной до 2 мм [29].

Однако на практике при изготовлении никелевых конструкций и аппаратуры, особенно из листов большой толщины, не всегда удается обеспечить достаточную защиту расплавленного металла от окружающего воздуха. Применение удлиненных наконечников горелок специальной формы, защита аргоном обратной стороны шва и другие мероприятия вызывают дополнительные конструктивные и технологические трудности, а главное не всегда обеспечивают получение положительных результатов.

В этом случае все-таки некоторое количество кислорода попадает в зону дуги, образует закись никеля, растворяющуюся в жидком металле. Взаимодействие закиси

никеля с находящимся в никеле водородом служит причиной образования в объеме металла шва водяных паров и сильной пористости сварных швов.

Надежным средством предотвращения пористости при аргонодуговой сварке никеля, как указывается в литературе [30, 31], является добавка к аргону до 20% водорода.

Известно, что никель растворяет большое количество водорода как в жидком, так и в твердом состоянии (см. фиг. 17). При кристаллизации никель может растворить водорода вдвое больше, чем аустенитная сталь, и в три раза больше, чем малоуглеродистая сталь.

Механизм положительного действия водорода в зоне дуги при аргонодуговой сварке никеля сводится к следующему. Кислород воздуха, находящийся в атмосфере дуги, будет в первую очередь окислять водород, поэтому возможность образования закиси никеля в расплавленном металле будет сведена к минимуму. Следовательно, в момент кристаллизации сварочной ванны водород с закисью никеля не взаимодействует, а значит и причины образования пор устраняются.

Количество водорода в защитном газе должно строго контролироваться, так как при чрезмерной его концентрации (более 20%) поры могут появиться уже вследствие избытка водорода.

Перед аргонодуговой сваркой никеля и его сплавов кромки и прилегающие к ним участки металла на расстоянии 20—30 мм должны быть тщательно зачищены до металлического блеска и обезжирены уйат-спиритом, ацетоном или чистым бензином.

Аргонодуговая сварка может осуществляться неплавящимся вольфрамовым электродом с присадочным прутком или по отбортовке кромок, а также плавящейся никелевой проволокой. С целью повышения качества сварных соединений желательно применять при сварке никелевую проволоку легированную (до 3%) титаном.

Аргонодуговая сварка никеля и его сплавов производится на постоянном токе прямой полярности (минус на электроде). Питание сварочной дуги осуществляется от обычных серийных преобразователей (типа ПС-300) или сварочных выпрямителей. Однако, как показывает практика, лучшие результаты обеспечиваются при применении источников тока с жесткой внешней характеристикой.

Сварка никеля и его сплавов в среде аргона производится при напряжении на дуге 10—15 в. Величину сварочного тока выбирают из расчета 40—50 а на 1 мм толщины свариваемого металла [32].

Чистота аргона, применяемого при сварке, должна быть не ниже 99,8%.

### Газовая сварка никеля

Газовая сварка никеля и его сплавов дает удовлетворительные результаты. Чаще всего она осуществляется ацетилено-кислородным, реже пропан-бутановым пламенем.

Перед сваркой кромки изделия должны быть тщательно очищены от пленки окислов и загрязнений до металлического блеска, а затем обезжирены.

При сварке металла толщиной до 0,5 мм производится соединение в замок. Сварку листов толщиной до 1,5 мм осуществляют без присадочного материала с отбортовкой кромок на высоту 1,5—2,5 мм. Листы толщиной до 4 мм свариваются в стык без скоса кромок.

При сварке никеля и его сплавов металл в сварочной ванне менее жидкотекуч, чем сталь, и проплавляется на меньшую глубину. Поэтому требуется более широкая разделка кромок и меньшее их притупление.

Для больших толщин кромки под сварку подготавливаются механическим путем согласно данным, приведенных в табл. 20.

Таблица 20

Подготовка кромок под ацетилено-кислородную сварку [33]

Толщина металла, мм	Эскиз подготовки кромок	Притупление S, мм	Зазор, а, мм
До 3 3—6 6—10 > 10		0,5 0,5—1,0 1,0—1,5 1,5—2,0	1,5 1,5—3 3—5 > 5

Сварка никеля внахлестку не применяется ввиду больших деформаций при нагревании листов.

Листы перед сваркой скрепляются прихватками, расположенными на 100—200 мм друг от друга. Если кромки не прихватываются перед сваркой, то листы укладываются под углом друг к другу с расхождением кромок 15—20 мм на 1 м длины листа и с начальным зазором 3 мм [34].

Сварка ведется отдельными участками обратноступенчатым способом. Пламя должно быть нормальным, так как избыток кислорода вызывает окисление расплавленного металла, пористость и хрупкость. При сварке допускается применение пламени с небольшим избытком ацетилена. Однако значительный избыток ацетилена может явиться причиной появления пористости и хрупкости металла шва.

Причиной этого явления в данном случае является науглероживание сварочной ванны и насыщение ее водородом, закисью углерода и другими газами.

При сварке никеля мощность пламени соответствует удельному расходу ацетилена 140—200 л/час на 1 мм толщины, а при сварке монеля — 100 л/час на 1 мм толщины свариваемого изделия [35].

Проволоку для сварки никеля рекомендуется применять такого же состава, что и основной металл. Хорошие результаты дает проволока, легированная марганцем, магнием, кремнием и титаном. Содержание указанных элементов в проволоке и наплавленном металле не должно быть слишком высоким, например Mn — до 2%, Si — до 0,8%, Mg — до 0,06% и Ti — до 0,1%.

Проволока должна иметь чистую поверхность, без следов смазки, масла и грязи. Диаметр присадочной проволоки выбирают равным половине толщины свариваемого металла.

Сварка никеля и его сплавов может производиться со специальными флюсами или без них. Флюсы применяются главным образом для облегчения растворения окислов, защиты сварочной ванны от действия окружающего воздуха и улучшения жидкотекучести металла. Флюсы обычно приготавливаются в виде пасты и наносятся на присадочный пруток и свариваемый металл. При изготовлении пасты сухая смесь замешивается на воде или спирте.

Составы наиболее распространенных флюсов для сварки никеля приведены в табл. 21.

Для сварки никеля и его сплавов применимы левый и правый методы сварки. При левом методе сварки сварочная ванна более интенсивно взаимодействует с кислородом окружающего воздуха. Этот метод можно применять при сварке изделий из металла толщиной 1—2 мм.

Таблица 21

**Состав флюсов для газовой сварки никеля [33, 36, 37]**

Наименование компонентов	Содержание, %				
	1	2	3	4	5
Бура прокаленная . . . . .	52	30	25	—	50
Кислота борная . . . . .	15	50	75	—	50
Магний хлористый . . . . .	8	—	—	—	—
Марганец хлористый . . . . .	15	—	—	—	—
Натрий хлористый . . . . .	10	10	—	—	—
Кальций фтористый . . . . .	—	—	—	15	—
Гашеная известь . . . . .	—	—	—	17	—
Борный ангидрид . . . . .	—	—	—	23	—
Натриевое стекло . . . . .	—	—	—	45	—
Барий углекислый . . . . .	—	10	—	—	—

При правом методе сварки пламя направлено на наплавленный металл, в результате чего замедляется охлаждение сварочной ванны, уменьшается окисление расплавленного металла и предотвращается пористость и образование трещин.

Пламя горелки направляется к поверхности свариваемого изделия под углом 45°. Металл сварочной ванны не должен слишком интенсивно перемешиваться присадочным прутом, так как это ухудшает процессы раскисления и десульфурации [34, 35]. Проволоку можно держать спокойно в ванне, но лучше, чтобы ее конец находился в пламени. При сварке рекомендуется производить горелкой легкие колебательные движения.

Значительное влияние на качество сварного соединения никеля оказывает чистота ацетиленового газа, который может являться источником загрязнения шва серой. Поэтому при сварке необходимо применять хорошо очищенный, а лучше всего растворенный ацетилен.

Сварку никеля следует выполнять без задержек и возврата на сваренный участок во избежание перегрева околошовной зоны, сопровождающегося образованием трещин. Следует также избегать применения многослойной газовой сварки.



Сварные соединения из никеля, выполненные газовой сваркой, обычно имеют предел прочности, равный 26—32  $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ , и угол загиба для толщины до 10 мм 90—120°, что значительно ниже соответствующих показателей для основного металла.

Монель сваривается аналогично никелю, но требует обязательного применения флюсов.

Сварка нихрома (75—80% Ni; 15—18% Cr; до 1,2—1,4% Mn) затрудняется образованием на поверхности ванны тугоплавкой пленки окиси хрома, которая удаляется обычно механическим путем. Сварка должна производиться с максимальной скоростью и без перерывов. Повторная и многослойная сварка вызывает трещины, значительный рост зерна и межкристаллитную коррозию в шве. Пламя должно быть слегка восстановительным, а его мощность соответствовать удельному расходу ацетилена 50—70 л/час на 1 мм толщины свариваемого металла. В качестве присадочного прутка применяется проволока того же состава, что и свариваемый металл. При сварке применяется флюс-паста, состоящая из 40% прокаленной буры, 50% борной кислоты и 10% хлористого натрия или фтористого калия. После отжига предел прочности сварного соединения из нихрома, выполненного ацетилено-кислородной сваркой, равен 35—45  $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ .

### **Ручная дуговая сварка никеля**

При сварке конструкций сложной конфигурации в труднодоступных местах и при исправлении дефектов ручная электродуговая сварка качественными электродами является очень полезным, а иногда просто незаменимым технологическим процессом.

В настоящее время известно несколько марок качественных электродов с покрытием основного типа для сварки никеля и его сплавов.

### **Сварка никеля электродами Н-10**

Электроды Н-10 разработаны Харьковским филиалом НИИхиммаш и предназначены для ручной дуговой сварки никеля марки Н-1 по ГОСТ 849-56. В качестве электродного прутка используется никелевая проволока Н-1 по ГОСТ 2179-59. Состав электродного покрытия приведен в табл. 22.

**Состав покрытия электродов Н-10 [38]**

Таблица 22

Наименование компонентов	ГОСТ или ТУ на компоненты	Содержание, %	Просев компонентов через сито, отв/см <sup>2</sup>
Мрамор . . . . .	4416-48	40,0	2500—3600
Плавленый шпат . . . . .	ЦМТУ3342-53	48,5	2500—3600
Кварцевый песок . . . . .	4417-48	3,0	2500—3600
Сода кальцинированная	5100-49	2,0	—
Ферромарганец, Mn-0 . . . . .	4755-49	3,5	1000—1500
Ферросилиций, Si-75 . . . . .	1415-61	3,0	1000—1500
Жидкое стекло (в % к весу сухих компонентов) . . . . .	Класс А, 4419-48	30,0	—
Вес обзки (в % к весу стержня) . . . . .	—	25—30	—

Электроды Н-10 изготавливаются методом окупания, просушиваются на воздухе 12—16 ч и прокаливаются при температуре 250—300° С в течение 3—4 ч.

Кромки под сварку подготавливаются механическим способом согласно данным табл. 23.

**Подготовка кромок под сварку [33]**

Таблица 23

Толщина металла, мм	Эскиз подготовки кромок	Притупление S, мм	Зазор а, мм
1,5—3,0		—	1,0—1,5
4,0—6,0 5,0—12,0		0,5—1,0 1,5—2,0	1,5—2,0 1,5—3,0

Перед сваркой кромки и прилегающие к ним поверхности металла на ширину 20—30 мм с обеих сторон должны тщательно зачищаться и обезжириваться.

Собранные под сварку детали и узлы прихватываются теми же электродами, которыми производится сварка.

Дефекты места прихваток вырубываются.

Прихватка и сварка выполняются на постоянном токе обратной полярности (плюс на электроде). Режим сварки, в зависимости от диаметра электрода приведен в табл. 24.

Таблица 24

Режимы ручной сварки никеля [33]

Диаметр электрода, мм	3,0	4,0	5,0
Сварочный ток в амперах	110—120	150—170	190—220

Химический состав металла сварного шва, выполненного электродами Н-10, следующий: С — 0,1%; Si — 0,03%; Mn — 0,41%; Fe — 0,43%; S — 0,004%.

Предел прочности сварных соединений, выполняемых электродами Н-10, лежит в пределах 30—35 кг/мм<sup>2</sup>, а угол загиба равен 90—120°.

Существенным недостатком электродов Н-10 является пористость сварных швов, которая может быть несколько снижена путем предварительного подогрева свариваемого изделия до 250—300°С. Поэтому указанные электроды используют лишь при выполнении неотвественных работ [38].

### Сварка никеля электродами Н-37

Электроды Н-37 предложены Кировским заводом для сварки никеля марки Н-1 по ГОСТ 849-56. Покрытие наносится на стержень из никелевой проволоки Н-1 по ГОСТ 2179-59 методом окунания. Состав электродного покрытия приведен в табл. 25.

Изготовление электродов Н-37 осуществляется так же, как и электродов Н-10.

Подготовка кромок производится механическим путем согласно данным табл. 23.

Прихватка и сварка осуществляются на постоянном токе обратной полярности на режимах, приведенных в табл. 24.

Химический состав металла сварного шва, выполненного электродами Н-37 на номинальном режиме, следующий: С — 0,06%; Si — 0,86%; Mn — 2,09%; Fe — 2,15%; Ti — 0,38%; Al — 0,75%; Mg — 0,42%; S — 0,004%; P — 0,028%.

Состав покрытия электродов Н-37 [33]

Наименование	ГОСТ или ТУ на компоненты	Содержание, %	Просев компонентов через сито, отв/см <sup>2</sup>
Мрамор . . . . .	4416-48	40,0	2500—3600
Флюоритовый концентрат . . . . .	ЦМТУ 3342-53	18,0	2500—3600
Ферротитан, Ти-1 . . . . .	4761-54	11,0	1000—1500
Ферросилиций, Си-45 . . . . .	1415-61	4,0	1000—1500
Марганец металлч., Мр-1 . . . . .	6008-51	10,0	1000—1500
Порошок алюминиевый, ПАП-1 . . . . .	—	7,0	600—900
Лигатура (20% Mg + 80% Ni) . . . . .	—	10,0	600—900
Силикат натрия — раствор (к сумме остальных компонентов) . . . . .	Класс А, 4419-48	28—30	—

Показатели механических свойств металла шва и сварных соединений при различных температурах испытания приведены в табл. 26.

Таблица 26

## Показатели механических свойств

Объект исследования	Температура испытания, °С	Предел текучести, кг/мм <sup>2</sup>	Предел прочности, кг/мм <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, кг/см <sup>2</sup>	Угол загиба, град
Металл шва	20	25—40	33—46	8—14	28—30	—	—
	500	17—31	27—37	16—17	19—23	—	—
Сварное соединение	20	—	35—40	—	—	14—19	90—120
	500	—	21—23	—	—	16—23	—

Коррозионная стойкость металла швов, проверенная в расплавах NaOH и KOH при температуре 500°С, хорошая.

Основным недостатком электродов Н-37 является непостоянство сварных швов и соединений, в сильной мере зависящее от качества электродов и режимов сварки.

Во многих случаях швы получаются неплотными, пористыми, особенно при сварке никеля марок НП-1 и НП-2 по ГОСТ 492-52.

## Сварка никеля электродами 48-Нк-1

По данным литературы [39], электроды 48-Нк-1 применяются при ручной дуговой сварке ковкового никеля, химический состав которого следующий: С — 0,05%; Si — 0,05%; Mn — 2,0%; Fe — 0,2%; Cu — 0,06%; S — 0,01%; P — 0,06%; As — 0,002%.

В качестве электродного стержня используется никелевая проволока из металла специальной плавки, легированная до 2,5% Mn и 0,013% Mg. Состав покрытия электродов 48-Нк-1 приведен в табл. 27.

Таблица 27  
Состав покрытия электродов 48-Нк-1 [39]

Наименование компонентов	ГОСТ или ТУ на компоненты	Содержание, %	Просев компонентов через сито, <i>от/см<sup>2</sup></i>
Мрамор . . . . .	4416-48	53,0	2500—3600
Плавленый шпат . . .	ЦМТУ 3342-53	18,0	2500—3600
Марганец металлический	6008-51	5,0	1000—1500
Ферротитан . . . . .	4761-54	15,0	1000—1500
Кварц . . . . .	4417-48	9,0	2500—3600
Бентонит . . . . .	3226-57	1,0	—

Сварка указанными электродами осуществляется на постоянном токе обратной полярности. Для облегчения выхода газов из наплавленного металла применяется предварительный подогрев свариваемого изделия до 300—350° С. По окончании сварки металл швов проковывается пневматическим молотком с закругленным бойком. После проковки швов сварные соединения подвергаются термообработке, заключающейся в нагреве до 1100° С, выдержке при этой температуре в течение 1 ч и последующем охлаждении на воздухе.

Химический состав металла, наплавленного электродами 48-Нк-1, показан в табл. 28.

Таблица 28  
Химический состав металла шва [39]

Марка электродов	Содержание элементов, %		
	С	Mn	Ni
48-Нк-1	0,04	1,06	98,00
	0,03	0,98	97,50
	0,04	2,16	96,94
	0,04	2,20	97,44
	0,04	2,18	92,06

Показатели механических свойств металла сварных швов без термообработки и после нее приведены в табл. 29.

Таблица 29

Показатели механических свойств металла шва [39]

После сварки и наклепа				После термообработки			
Предел прочности, $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$	Предел текучести, $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Предел прочности, $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$	Предел текучести, $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
28,9	19,9	8,0	—	39,4	12,5	24,0	40,8
30,4	19,1	8,0	25,1	24,1	11,9	0,7	—
22,1	17,9	4,3	—	31,7	11,5	15,7	24,8
34,9	20,9	13,7	31,7	26,2	12,5	10,0	5,9
23,1	19,3	3,0	—	18,0	11,7	7,7	6,7
26,7	17,5	11,3	25,1	20,6	11,7	0,3	—
27,8	19,3	8,3	20,5	38,7	10,2	28,2	—
39,4	22,3	11,7	27,5	41,8	10,5	35,4	5,6

К недостаткам электродов 48-Нк-1, усложняющим и удорожающим процесс сварки, относятся:

а) недостаточно высокое и нестабильное качество сварных соединений;

б) дефицитность и высокая стоимость применяемой специальной электродной проволоки;

в) необходимость предварительного подогрева свариваемых изделий; проковка сварных швов и термообработка сварных соединений.

Близким по своему составу к покрытию электродов 48-Нк-1 является покрытие УОНИИ 13/45.

В литературе [40] указывается на возможность использования этого покрытия при сварке никеля и монеля.

В случае сварки никеля следует применять электродную проволоку марки НМц-2,5 по ГОСТ 1049-57, а для сварки монеля — проволоку того же состава, что и основной металл.

Предел прочности сварных соединений из никеля в исходном состоянии после сварки равен 36—49  $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ , а для монеля — 40—50  $\kappa\Gamma/\text{мм}^2$ . Угол загиба для обоих металлов равен 150—180°.

При сварке никеля и монеля электродами с покрытием УОНИИ 13/45 наблюдается повышенная склонность металла швов к пористости.

## Сварка никеля электродами «Прогресс-50»

Известные электроды основного типа Н-10, Н-37 и другие, как указывалось выше, не всегда обеспечивают достаточную пластичность, прочность и особенно плотность металла сварных швов. Кроме того, указанные электроды не являются универсальными, позволяющими достаточно качественно сваривать никель различных марок.

Кафедрой сварочного производства Ждановского металлургического института в содружестве с Бердичевским заводом «Прогресс» разработаны новые электроды марки «Прогресс-50».

Электроды «Прогресс-50» отличаются от известных тем, что имеют покрытие кислого типа, позволяющее получать высококачественные сварные соединения не только при сварке никеля Н-1, но и никеля НП-1 и НП-2. Указанные электроды обеспечивают получение металла швов более стойкого против образования пор и трещин, с высокими прочностными и коррозионными свойствами, чем при сварке никеля электродами Н-10, Н-37 и др. В качестве шлаковой основы покрытия электродов была выбрана система  $TiO_2 - CaF_2 - NaCl$ . Легирующими элементами и раскислителями служат введенные в покрытие порошкообразные марганец, титан и алюминий.

Примерный химический состав покрытия приведен в табл. 30.

Таблица 30  
Химический состав покрытия электродов «Прогресс-50»

Содержание компонентов, %									
$TiO_2$	$CaF_2$	NaCl	$SiO_2$	$Na_2O$	Mn	Ti	Al	S	P
								не более	
51—53	18—20	6—8	21—22	7—8	7,5— 8,5	7,5— 8,5	5,5— 6,5	0,05	0,05

Электроды «Прогресс-50» предназначены для ручной электродуговой сварки никеля марок Н-1 по ГОСТ 849-56 и НП-1, НП-2 по ГОСТ 492-52.

В качестве электродной проволоки используются никелевая проволока марок Н-1 по ГОСТ 2179-59 и НП-1, НП-2 по ГОСТ 2179-59 диаметром 3, 4 и 5 мм. Возможно применение также проволоки НМц-2,5 по ГОСТ 1049-57.

В последнем случае состав покрытия пересчитывается и исключается из него металлический марганец.

Состав шихты покрытия электродов «Прогресс-50» приведен в табл. 31.

Таблица 31

Состав покрытия электродов «Прогресс-50»

Наименование компонентов	ГОСТ или ТУ на компоненты	Содержание, %	Просев компонентов через сито, от/см <sup>2</sup>
Двуокись титана . . . . .	ТУ МХП 3052-56	52,0	2500—3600
Флюоритовый концентрат (или плавиковый шпат) . . . . .	ЦМТУ 3342-53	20,0	2500—3600
Хлористый натрий . . . . .	4233-48	6,0	600—900
Марганец металлический, Мр-0, Мр-1 . . . . .	6008-51	8,0	1000—1500
Титановый порошок, ИМП-1А . . . . .	ЦМТУ 5058-55	8,0	1000—1500
Алюминиевый порошок, ПА-3, ПА-4 . . . . .	6058-51	6,0	600—900
Бентонит . . . . .	3226-57	1,0	—
Силикат натрия — раствор (плотностью 1,35—1,4) к весу сухой шихты . . . . .	Класс А, 4419-48	25—30	—

Указанные электроды могут быть изготовлены методом опрессовки или окунаия. Подготовка компонентов покрытия осуществляется в обычном для изготовления электродов порядке.

Перед составлением шихты двуокись титана необходимо прокалить при температуре 900—1000° С для снижения количества конституционной влаги и серы. Время прокалики составляет 0,5—1 ч. Удаление конституционной влаги значительно повышает технологические свойства электродов, а снижение количества серы повышает механические свойства сварного соединения.

Толщина слоя покрытия для электродов диаметром 3,4 и 5 мм соответственно составляет 1—1,2; 1,2—1,3 и 1,3—1,5 мм.

Электроды с нанесенным покрытием подвергаются сушке на воздухе в течение 24 ч, а затем прокалике в печах при температуре 350—400° С в течение 2,5—3 ч.


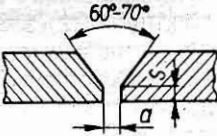
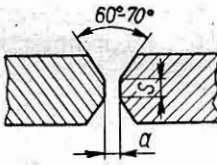
Электроды «Прогресс-50» позволяют производить сварку в нижнем, вертикальном и потолочном положениях.



Коэффициент наплавки электродов составляет  $11,5 \text{ г/а} \cdot \text{ч}$ . Сварка осуществляется на постоянном токе обратной полярности (плюс на электроде). Ориентировочные режимы сварки для электродов диаметром 3,4 и 5 мм соответственно составляют 100—130; 140—170 и 170—210 а.

Кромки под сварку должны подготавливаться пневматическим зубилом, на строгальных или фрезерных станках. В зависимости от типа соединения и толщины свариваемого никеля кромки рекомендуется подготавливать в соответствии с данными, приведенными в табл. 32.

Таблица 32  
Подготовка кромок под сварку [41]

Толщина металла, мм	Эскиз подготовки кромок	Притупление S, мм	Зазор а, мм
2,0—4,0		—	1,0—2,0
4,0—6,0 6,0—12,0		0,5—1,0 1,5—2,0	1,5—2,0 1,5—3,0
8,0—12,0 12,0—20,0		1,5—2,5 2,0—3,0	1,5—3,0 2,0—4,0

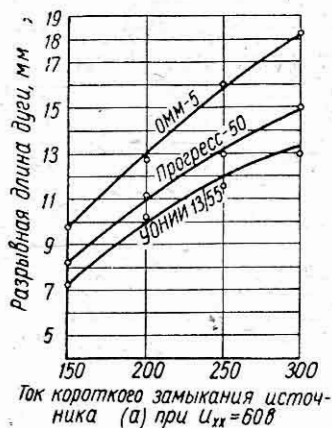
Подготовленные кромки и поверхность листов на ширину 30—40 мм в сторону от шва необходимо очищать от окисной пленки, следов коррозии, масла и грязи до металлического блеска. Перед сваркой кромки и подкладные медные или стальные планки (в случае сварки на подкладках) рекомендуется обезжирить уайт-спиритом, ацетоном или чистым бензином.

Необходимо отметить, что при сварке электродами «Прогресс-50» отдельных листов плохо дегазированного никеля возможно появление пор по линии сплавления. Их образование можно объяснить явлением термодиффузии растворенных в металле газов. С целью преду-

преждения указанного дефекта рекомендуется осуществлять сварку с предварительным подогревом листов до температуры 250—300°С. Сварные соединения неотожженного, наклепанного в процессе механической обработки никеля полезно с целью снижения сварочных напряжений и повышения механических свойств подвергать нагреву до 250—300°С с последующим охлаждением на воздухе.

Электроды «Прогресс-50» имеют хорошие технологические свойства, обеспечивают легкость возбуждения дуги, стабильное ее горение, свободное после остывания, удаление шлаковой корки, хорошее формирование сварных швов и т. д.

Для выявления устойчивости процесса сварки никеля различными электродами была определена по методике К. К. Хренова [42] разрывная длина дуги на разных режимах. Средние результаты (из десяти замеров) для каждого электрода приведены в табл. 33 и представлены графически на фиг. 32.



Фиг. 32. Зависимость величины разрывной длины дуги от сварочного тока при сварке никеля различными электродами.

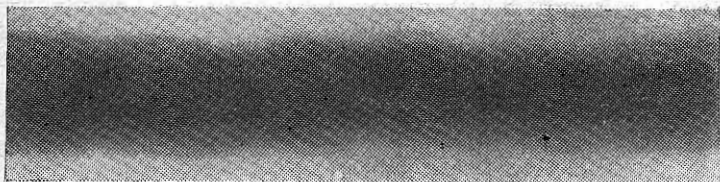
электродов приведены в табл. 33 и представлены графически на фиг. 32.

Таблица 33

Разрывная длина дуги при сварке никеля различными электродами

Марка электродов	Разрывная длина дуги (мм) при токе, а			
	150	200	250	300
УОНИИ 13/55	7,31	10,20	11,60	13,05
«Прогресс-50»	8,33	11,10	13,05	14,96
ОММ-5 . . . . .	9,73	12,74	16,02	18,34

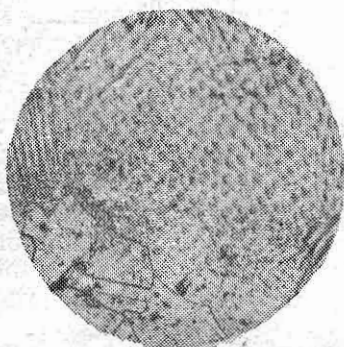
Металлографические исследования и рентгенографирование показали, что металл швов, выполненных электродами «Прогресс-50», плотный, без пор, трещин, газовых и шлаковых включений (фиг.33). Макроструктура стыкового соединения, выполненного электродами «Прогресс-50», показана на фиг. 34. Структура металла шва



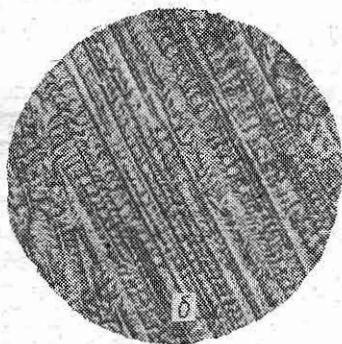
Фиг. 33. Рентгенограмма сварного шва, выполненного электродами «Прогресс-50».



Фиг. 34. Макрошлиф стыкового соединения, выполненного электродами «Прогресс-50»,  $\times 1,0$ .



Фиг. 35. Структура переходной зоны при сварке никеля электродами «Прогресс-50»,  $\times 135$ .



Фиг. 36. Структура верхних и нижних слоев металла шва, выполненного электродами «Прогресс-50»,  $\times 135$ .

мелкозернистая с плавным переходом от основного металла к наплавленному. Микроструктура переходной зоны, верхних и нижних слоев сварного шва предоставлена на фиг. 35 и 36, а, б.

Химический состав металла шва, полученный при сварке никеля НП-2 электродной проволокой НП-2 на номинальных режимах, следующий: С — 0,03%, Si — 0,85%, Mn — 1,43%, Fe — 0,33%, Ti — 0,48%, Al — следы, S — 0,011%, P — 0,0013%.

Средние значения показателей механических свойств сварных соединений и металла шва, в исходном после сварки состоянии, характеризуются следующими величинами:

$\sigma_s = 50 \div 52 \text{ кг/мм}^2$ ;  $a_k = 25 \div 30 \text{ кг/см}^2$ ;  $\delta = 40 \div 45\%$ ;  
 $\alpha = 180 \text{ град.}$

Коррозионная стойкость сварных швов, выполненных при сварке электродами «Прогресс-50», проверенная в расплавах едкого натра и калия при температуре 500°С, не уступает стойкости основного металла.

Как показал опыт промышленного использования в производстве химической аппаратуры Бердичевским заводом «Прогресс» и киевским заводом «Большевик», электроды «Прогресс-50» являются простыми, надежными, производительными, обеспечивают высокое качество сварных соединений и могут быть рекомендованы для широкого внедрения на других предприятиях страны.

### Сварка никелекремнистого сплава

Сплав никеля с кремнием и медью обладает высокой коррозионной стойкостью в средах, содержащих серную кислоту, высоким сопротивлением износу и находит применение в ряде отраслей промышленности.

Состав никелекремнистого сплава следующий: Si — 11,2—11,7%; Cu — 4,2—4,5%; Mn — до 0,1%; Al — до 0,1%; С — до 0,05%; остальное — никель.

Этот сплав плавится при относительно низкой температуре (1100—1120°С) и обладает высокой жидкотекучестью. Предел прочности сплава не менее 25 кг/мм<sup>2</sup> при твердости более HRC 47.

Сварка никелекремнистого сплава осуществляется электродами ЭНХД-10, созданными Центральным научно-исследовательским институтом химического машиностроения.

Состав покрытия электродов ЭНХД-10 приведен в табл. 34.

Таблица 34

Состав покрытия электродов ЭНХД-10 [33]

Наименование компонентов	ГОСТ или ТУ на компоненты	Содержание, %	Просев компонентов через сито, $\text{отв/см}^2$
Мрамор . . . . .	4416-48	33,0	2500—3600
Плавиковый шпат . . . . .	4421-48	40,0	2500—3600
Двуокись титана . . . . .	ТУМХП3052-56	10,0	3600
Кремний кристаллический . . . . .	2169-43	10,0	800—1200
Алюминий (порошок ПАП-1) . . . . .	—	3,0	400—600
Ферротитан . . . . .	4761-54	4,0	800—1200
Бентонит . . . . .	3226-57	2,0	2500—3600
Сода кальцинированная . . . . .	5100-49	2,0	2500—3600
Силикат натрия — раствор (к сумме остальных компонентов), $\gamma = 1,34$ . . . . .	4419-48	30,0	—

Прихватка и сварка выполняется на постоянном токе обратной полярности. Во избежание растрескивания сварных швов и основного металла все сварочные работы проводятся с предварительным и сопутствующим подогревом изделия до  $650\text{—}700^\circ\text{C}$ . Кромки подготавливаются под сварку механическим путем с углом раскрытия  $70\text{—}75^\circ$ . Сварочный ток выбирается из расчета:

$$I_{св} = 25d_s,$$

где  $d_s$  — диаметр электродного стержня, мм.

Для изготовления электродов используются литые стержни диаметром 4; 4,5; 5,5; 6 мм и длиной 350—450 мм. Химический состав стержней аналогичен составу основного металла. Толщина слоя покрытия для электродов диаметром 4—4,5 и 5,5—6 мм соответственно составляет 0,25—0,35 и 0,35—0,45 мм.

Химический состав металла швов, выполненных электродами ЭНХД-10, следующий: Si — 11,96%; Cu — 3,95%; Al — 0,40%; Ti — 0,30%; основа — никель.

Сварные швы по прочности и коррозионной стойкости не уступают свойствам основного металла.

## Сварка нихрома и никелемолибденового сплава

В технической литературе [36, 37, 38] имеются сообщения о ручной дуговой сварке нихрома марки ЭИ-422 и никелемолибденового сплава марки ЭИ-460. Сварка указанных сплавов осуществляется в нижнем положении на постоянном токе обратной полярности электродами ЭНХМ-100. Величина сварочного тока устанавливается зависимостью:

$$I_{св} = 35d_э,$$

где  $d_э$  — диаметр электрода, мм.

Состав покрытия электродов ЭНХМ-100 приведен в табл. 35.

Таблица 35

Состав покрытия электродов ЭНХМ-100 [38]

Наименование компонентов	ГОСТ или ТУ на компоненты	Содержание, %	Просев компонентов через сито, $от/см^2$ —
Мрамор . . . . .	4416-48	55,0	1500—3600
Плавленый шпат . . . . .	4421-48	30,0	2500—3600
Каолин . . . . .	6138-52	5,0	2500—3600
Ферросилиций, Си-75 . . . . .	1415-49	5,0	1000—1500
Ферротитан . . . . .	4761-54	5,0	1000—1500
Жидкое стекло (в % к весу сухих компонентов) . . . . .	4419-48	30,0	—
Вес обмазки (в % к весу стержня) . . . . .	—	25—30	—

Для изготовления электродов применяются стержни, аналогичные по своему составу свариваемому металлу. Толщина покрытия на сторону должна быть равной 0,2 диаметра электрода.

Механические свойства металла сварных швов, выполненных электродами ЭНХМ-100, приведены в табл. 36.

Таблица 36

Показатели механических свойств сварных швов [38]

Объект исследования	Предел прочности, $кг/мм^2$	Относительное удлинение, %	Угол загиба, град
Нихром ЭИ-442 . . . . .	33,0	10,0	—
Никелемолибденовый сплав ЭИ-460 . . . . .	50,0	—	180

После сварки, с целью повышения коррозионной стойкости, никелемолибденовый сплав с температуры отжига рекомендуется подвергать быстрому охлаждению.

### Сварка медноникелевых сплавов

Медноникелевые сплавы марок МН-5, МН-10 и МНЖ-5-1 (табл. 37) применяются в судостроении для изготовления коррозионностойких трубопроводов и различных конструкций.

Таблица 37

Химический состав медноникелевых сплавов [3, 4]

Марка сплава	Содержание элементов, %						
	Cu	Ni+Co	Fe	Mn	C	S	P
МН-5	Основа	4,4—5,0	0,10	—	0,03	0,01	0,01
МН-10	Основа	10,0—11,0	до 1,0	до 1,0	—	0,01	0,01
МНЖ-5-1	Основа	5,0—6,5	1,0—1,4	0,3—0,8	0,03	—	—

Сварка указанных сплавов осуществляется электродами с покрытием марки ЗТ, состав которого приведен в табл. 38. В качестве электродных стержней применяется проволока того же состава, что и свариваемый металл. Толщина покрытия для электродов диаметром 3 и 4 мм составляет соответственно 0,3—0,4 и 0,4—0,5 мм.

Таблица 38

Состав покрытия электродов ЗТ [44]

Наименование компонентов	ГОСТ или ТУ на компоненты	Содержание, %	Просев компонентов через сито, отв/см <sup>2</sup>
Плавленый шпат . . . . .	4421-48	32,0	2500—3600
Марганцевая руда . . . . .	4418-48	17,5	2500—3600
Ферросилиций . . . . .	1415-49	32,0	1000—1500
Графит . . . . .	—	16,0	—
Алюминий в порошке . . . . .	—	2,5	600—900
Жидкое стекло (в % к весу шихты) . . . . .	4419-48	55—60	—

Сварка медноникелевых сплавов ведется на постоянном токе обратной полярности, короткой дугой, с большой скоростью за один проход. Величина сварочного

тока для электродов диаметром 3 и 4 мм выбирается соответственно равной 110—130 и 160—260 а.

Химический состав швов, полученный при сварке сплавов МН-10 и МНЖ-5-1, приведен в табл. 39.

Таблица 39

Химический состав металла швов [44]

Марка электродов	Содержание элементов, %				
	Cu	Ni	Fe	Mn	Si
ЗТ при сварке МНЖ-5-1 . . . . .	92,90	5,02	0,67	0,69	0,47
ЗТ при сварке МН-10 . . . . .	87,24	9,62	1,09	1,12	0,45

Среднее значение предела прочности металла швов, выполненных при сварке сплавов МН-10 и МНЖ-5-1, соответственно равно 24,1—29 кг/мм<sup>2</sup> и 24,5—31,4 кг/мм<sup>2</sup> [44].

### Контактная сварка никеля и его сплавов

Никель и высоконикелевые сплавы (монель, инконель и др.) хорошо свариваются точечной сваркой между собой, а также со сталями и многими медными сплавами.

Никелевые сплавы обладают сравнительно низкой электропроводностью (значительно ниже, чем у малоуглеродистой стали). Поэтому их точечная сварка осуществляется при умеренной силе тока.

Никель и его сплавы являются весьма прочными, что обуславливает применение высоких давлений на электроды при сварке. Сварка теплоустойчивых сплавов выполняется с усиленным охлаждением свариваемого металла. С этой целью электроды и изделие погружают в воду или омывают струей воды.

В связи с применением высоких удельных давлений на электроды необходимо изготавливать их из сплавов высокой твердости. При сварке никеля и его сплавов могут применяться сферические или конические электроды с плоским торцом. Диаметр электродов для свариваемых листов толщиной 0,5—1,5, 1,5—2,5 и 2,5—3,0 мм выбирают соответственно равным 3—6, 6—8 и 8—10 мм.

Перед сваркой поверхности деталей тщательно зачищаются механическим путем или травлением.

С целью получения качественных сварных соединений необходимо выбирать минимальные токи, чтобы избежать излишнего перегрева металла и связанных с ним дефектов.



Ориентировочные режимы точечной сварки технического никеля и некоторых его сплавов приведены в табл. 40.

Таблица 40

Ориентировочные режимы точечной сварки никеля и его сплавов [37, 45]

Материал	Толщина листа, мм	Давление на электроды		Сварочный ток, а	Время сварки, сек
		общее давление, кг	удельное давление, кг/см <sup>2</sup>		
Технический никель	0,5—1,8	112	1400	7760	0,51—0,67
	0,9—1,5	195	2450	9200	0,51—0,67
	1,6—2,2	780	2450	21600	0,83—1,0
	2,3—2,5	1050	2100	26400	1,67—2,0
	2,5—3,2	1500	2100	30800	2,67—3,34
Монель-металл	0,5—0,8	184	1050	6200	1,67—2,0
	0,9—1,5	313	1750	10600	1,67—2,0
	1,6—2,2	890	2800	15300	1,67—2,0
	2,3—2,5	1220	2450	20000	2,67—3,34
	2,5—3,2	1750	2450	21300	4,18—5,0
Сплавы никеля с железом	0,5—0,8	84	1050	4040	1,67—2,0
	0,9—1,5	167	2100	3730	1,67—2,0
	1,6—2,2	890	2800	6100	1,67—2,0
	2,3—2,5	1400	2800	12700	2,67—3,34
	2,5—3,2	2400	2450	20100	4,18—5,0
Инконель	0,5	85	1050	4040	0,20
	0,8	300	1750	6710	0,20
	1,5	1100	3500	9300	0,20
	2,5	1400	2800	12700	0,33

Соединения деталей из никеля и его сплавов можно также успешно выполнять шовной и стыковой контактной сваркой.

### Пайка никеля и его сплавов

Процесс пайки металлов по своей физической сущности имеет очень много общего со сваркой. В отдельных случаях разграничение процессов пайки и сварки становится весьма затруднительным, что дает полное основание некоторым авторам считать пайку одной из разновидностей сварки [46].

Пайка широко применяется в производстве как один из способов соединения металлических деталей.

При помощи пайки изготовляют не только отдельные детали, но и сложные узлы, не только мельчайшие детали приборов, но и весьма ответственные изделия сравнительно больших размеров.

Пайка никеля и сплавов на его основе имеет много сходного с пайкой железа и его сплавов. Но наряду с этим имеются и некоторые отличия в связи с физико-химическими особенностями основы сплавов.

На поверхности технически чистого никеля при всех температурах нагрева образуется окисел  $\text{NiO}$ . В случае легирования никеля такими элементами, как железо, марганец, хром, титан, алюминий и другие, на его поверхности возможно образование окислов трех структурных типов, например  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NiTiO}_3$  или  $\text{NiO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Для получения высококачественных паяных соединений необходимо тщательно удалить с поверхности изделия окисную пленку. Удаление окислов может быть осуществлено либо предварительным травлением паяемых деталей, либо применением специальных флюсов при пайке, способных разрушать или растворять соответствующие окислы.

В большинстве случаев для удаления с поверхности никеля окисной пленки применяют различные растворы азотной кислоты, бихромата в смеси с серной кислотой и т. д.

Чаще всего используется травильный раствор следующего состава:  $1000 \text{ см}^3$  воды,  $1500 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{SO}_4$  (уд. вес 1,87),  $2250 \text{ см}^3 \text{ HNO}_3$  (уд. вес 1,36) и  $30 \text{ г NaCl}$ .

Перед травлением деталь промывают в горячей воде, затем погружают в травильную ванну, а после травления вновь промывают в горячей воде. Травление детали в ванне продолжается 5—10 сек. После травления и промывки осуществляется нейтрализация остатков кислот в 1%-ном водном растворе аммиака и просушка в опилках или кипящей воде [47].

Флюсы, применяемые для пайки никеля и его сплавов, представляют собой вещество с неметаллической связью, защищающее паяемое соединение от химического воздействия окружающей среды и очищающее место пайки и припой от загрязнений и продуктов химической реакции с окружающей средой. Кроме того, флюсы способны

уменьшить поверхностное натяжение и увеличить растекаемость жидкого припоя.

Выбор флюса при пайке никеля и его сплавов зависит от состава окислов, образующихся на поверхности паяемых деталей, а также от выбранного состава припоя. Окислы, содержащие хром и алюминий, удаляются флюсами, активированными фторидами щелочных и щелочноземельных металлов. Слаболегированные сплавы и технически чистый никель, на которых образуется только окисел NiO, обрабатывают флюсами, содержащими хлорид цинка и хлорид аммония, а также добавки соляной кислоты. Наиболее употребительными являются флюсы следующего состава: 1) 25%  $ZnCl_2$ , 25% HCl (уд. вес 1,19) и 50% воды; 2) 6%  $ZnCl_2$ , 4%  $NH_4Cl$ , 5% HCl (уд. вес 1,19) и 85% воды. Указанные флюсы пригодны, в частности, при пайке легкоплавкими оловянно-свинцовыми припоями, с содержанием олова 30—60% [48].

Для пайки никеля пригодны припои, металл которых образует с никелем непрерывный ряд твердых растворов. К таким припоям относятся: медь, медноцинковые припои, припои на основе никеля и оловянно-свинцовые припои (табл. 41). Серебряные припои при пайке никеля не применяются, так как чистое серебро не образует сплавов с никелем.

Пайка никеля может осуществляться электрическим или газовым паяльником, газовым пламенем, а также в печах с контролируемой атмосферой.

Паяльник, применяемый для пайки никеля, должен быть нагрет до более высокой температуры, чем при пайке стали.

При пайке никеля газовым пламенем или в печах необходимо принимать меры для очистки газов от сернистых соединений. В противном случае возможно образование легкоплавкой и хрупкой эвтектики никеля с серой, которая, располагаясь по границе раздела основного металла и припоя, нарушает связь между зернами металла.

Пайку никеля и его сплавов следует производить после отжига металла ввиду склонности этих сплавов к образованию трещин, возникающих от перенапряжения металла.

При пайке никеля и его сплавов с применением флюсов зазор между паяемыми деталями должен быть

равен 0,05—0,07 мм. В случае пайки никеля без флюсов зазор выбирается значительно меньшим, до 0,003—0,004 мм.

Таблица 41

Химический состав наиболее применяемых припоев для пайки никеля [48, 49]

Марка припоя	Содержание элементов, %							Температура плавления, °С
	Cu	Sn	Si	Ni	Pb	Fe	Zn	
Л-62	60,5—63,5	—	—	—	0,1	0,2	Остальное	905
Л-68	67—70	—	—	—	0,03	0,1	Остальное	938
МЦН-48-10	46—50	—	—	9—11	0,05	0,25	—	985
—	—	—	3,5	93,25	—	—	—	1050
—	—	—	4,5	91,25	—	—	—	1100
ПОС-90	0,08	89—90	—	—	Остальное	—	—	~200
ПОС-61	0,1	59—61	—	—	Остальное	—	—	~200

По окончании процесса пайки оставшийся на поверхности деталей флюс и образовавшийся шлак должны быть удалены, а паяное изделие промыто горячей водой.

Подготовка к пайке сплавов на никелевой основе осуществляется так же, как и технически чистого никеля.

Для удаления окислов, которые образуются на поверхности легированных никелевых сплавов и обладают высокой химической стойкостью в кислотах, применяют травление в реактиве следующего состава: 10—20%  $\text{HNO}_3$ , 4—8%  $\text{HF}$  и остальное вода.

Наибольшее практическое применение из сплавов на никелевой основе находят различного состава нихромы.

Пайка нихромов, от которых по условиям работы требуется жаропрочность и коррозионная стойкость, осуществляется с применением хромоникелевых припоев с бором. Присадка бора способствует взаимной диффузии основного металла и припоя, в результате чего образуется шов, температура плавления которого выше начальной температуры плавления хромоникелевого припоя.

Нихромы состава 80% Ni и 20% Cr можно паять припоем никробрейд с бором, содержащим: 16% Cr, 4% B, 4% Si, 4% Fe, 1% C, 71% Ni. При пайке нихромов применяется никельхромокремниевый припой, состоящий в среднем из 66% Ni, 19,5% Cr, 9,5% Si и 5% Fe, а также палладиевоникельхромовый припой, содержащий 44% Pd, 33% Ni и 23% Cr [50]. Пайка производится в водородной среде с точкой росы, равной  $-45^{\circ}\text{C}$ . Температура пайки нихрома никельхромокремниевым припоем  $1190^{\circ}\text{C}$ , а палладиевоникельхромовым припоем  $1270^{\circ}\text{C}$ . Смачиваемость нихрома указанными припоями хорошая.

Стыковые паяные соединения из нихрома имеют предел прочности при  $900^{\circ}\text{C} \sim 14 \text{ кг/мм}^2$ , а при  $1000^{\circ}\text{C} \sim 8 \text{ кг/мм}^2$ .

Никельхромокремниевый припой весьма хрупок, поэтому он применяется в виде пасты с полиэтиленом. Для повышения пластичности соединений, паяных припоями с кремнием, рекомендуется подвергать их длительному отжигу при температуре  $1000^{\circ}\text{C}$  (в течение 15 ч).

Пайку нихромов, инконеля и сплавов, содержащих алюминий, производят с применением активных флюсов, легированных теми же элементами. Перед пайкой с целью снижения чувствительности к коррозии под напряжением указанные сплавы должны быть отожжены.

При пайке жаростойких и жаропрочных сплавов на основе никеля типа ЭИ435 и ЭИ437 необходимо применять тугоплавкие серебряные припои, легированные медью, цинком и марганцем. Для пайки сплавов типа нимоник-75, нимоник-80 рекомендуется применять следующие припои: 1) 60% Ag, 15% Cu и 25% Zn (температура плавления  $674-677^{\circ}\text{C}$ ); 2) 66,7% Ag, 23,3% Cu и 10% Zn (температура плавления  $705-723^{\circ}\text{C}$ ); 3) 61% Ag, 28,5% Cu и 10% Zn (температура плавления  $720-746^{\circ}\text{C}$ ); 4) 85% Ag и 15% Mn (температура плавления  $970-980^{\circ}\text{C}$ ) [51].

По данным Н. Ф. Лашко и С. В. Лашко-Авакян [48] для пайки указанных сплавов перечисленными припоями возможно применение флюсов, предназначенных для пайки аустенитных нержавеющей сталей. Состав одного из таких флюсов следующий: 23—25%  $\text{KBF}_4$ , 35—37%  $\text{B}_2\text{O}_3$ , 42—44% KF.

Высокая жаропрочность, жаростойкость или кислотостойкость паяного шва достигается путем его легиро-

вания такими элементами, как В, Ве и Si, а также Сг, Al, Ti, Мо и др.

Припой, в состав которых входят большие количества (более 10%) хрома и алюминия, при пайке покрываются пленкой стойких окислов, препятствующих растеканию припоя. В связи с этим качество паяных соединений ухудшается. Поэтому высококачественная пайка никелевых жаропрочных сплавов с применением высоколегированных припоев может быть осуществлена только в высоком вакууме ( $10^{-5}$ — $10^{-6}$  мм рт. ст.). Аналогичных результатов можно достичь также при пайке в среде достаточно сухого водорода с точкой росы, равной  $-60^{\circ}\text{C}$ .

Пайка в вакууме или в среде водорода может осуществляться с применением флюсов или без них.

Применение высоколегированных припоев особенно целесообразно тогда, когда длительный нагрев материала изделия при температуре пайки может ухудшить его механические свойства вследствие роста зерна.

Выбор соответствующего флюса и припоя для пайки никелевых сплавов должен производиться с учетом физико-химических свойств паяемого материала, а также условий его работы. Вопросы пайки никеля и его сплавов освещены в специальной литературе [46, 48, 49] и др.

Следует обратить внимание на то, что большинство способов сварки никеля и его сплавов, освещенных в обзоре, отличаются узко специальным назначением и не обладают универсальностью. Многие из рассмотренных способов не обеспечивают получение соединений равноценных по своим качествам основному металлу, что свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования и разработки новых, универсальных, производственно надежных технологических процессов сварки никеля и его сплавов.

Аналогичное замечание следует высказать также и по поводу существующих способов пайки никелевых сплавов и никеля.

---

#### **IV. АВТОМАТИЧЕСКАЯ И ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА НИКЕЛЯ**

Сварка никеля является важной и весьма сложной задачей сварочной техники. Для ее решения было проведено большое число исследовательских работ и предложены различные методы и приемы сварки [32, 33, 35, 37, 39, 40]. Такое разнообразие существующих способов сварки никеля показывает, что ни один из них не удовлетворяет достаточно полно требованиям производства.

##### **Автоматическая сварка никеля под стандартными плавленными флюсами**

Наиболее рациональным, по нашему мнению, является способ автоматической сварки никеля под флюсом плавящимся электродом. Электрическая дуга под флюсом, при применении плавящегося электрода, является наиболее концентрированным источником тепла по сравнению с аналогичной открытой или угольной дугой. Металлургические процессы между металлом и шлаком могут способствовать рафинированию, модифицированию и раскислению наплавленного металла, обеспечивая получение металла шва наиболее однородного по химическому составу. Статическое давление слоя флюса благоприятствует хорошему формированию валика, а шлаковый покров создает защиту от взаимодействия с кислородом и другими газами воздуха. Из приведенных соображений очевидна целесообразность применения способа автоматической сварки никеля под флюсом плавящимся электродом.

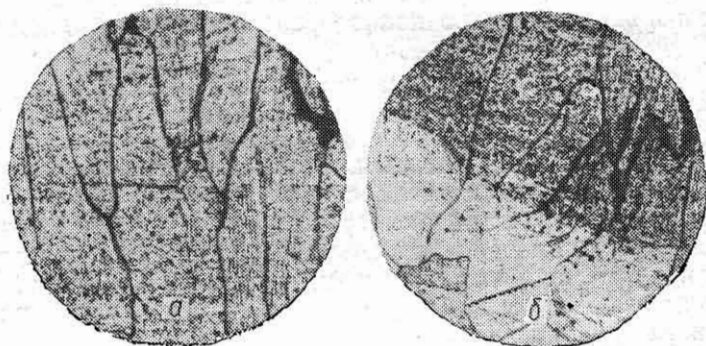
Наши опыты по автоматической сварке никеля марок Н-1, НП-1 и НП-2 под стандартными плавленными флюсами ОСЦ-45, ФЦ-6, АН-348, АН-60, АН-20 и некоторыми другими показали, что указанные флюсы совершенно не пригодны для этой цели. Сварные швы, несмотря на

хорошее формирование, легкость удаления шлаковой корки были неплотными, с порами, трещинами, газовыми и шлаковыми включениями (фиг. 37). Химический состав сварных швов, выполненных автоматической сваркой под



Фиг. 37. Макрошлиф стыкового соединения никеля, выполненного автоматической сваркой под флюсом ОСЦ-45.

различными флюсами, приведен в табл. 42. Металлографические исследования показали, что металл швов отличается от основного металла литой крупнозернистой структурой с резко ориентированным расположением зерен



Фиг. 38. Микроструктура металла шва и переходной зоны при автоматической сварке никеля под флюсом ОСЦ-45,  $\times 135$ :

*a* — металл шва; *б* — переходная зона.

и утолщенными по их границам эвтектическими прослойками (фиг. 38, *a*, *б*). Показатели прочности, пластичности и коррозионной стойкости сварных соединений, выполненных под указанными выше плавными флюсами, оказались неудовлетворительными.

Имеются сообщения [37, 40] о получении положительных результатов при сварке никеля под бескислородными фторидными флюсами в сочетании со специальной электродной проволокой, содержащей легирующие элементы и раскислители. Однако применение специальных



легированных проволок, как указывалось ранее, связано с рядом трудностей, таких как трудоемкость ее изготовления, высокая стоимость, дефицитность и т. д. Поэтому

Таблица 42

**Химический состав металла швов, выполненных автоматической сваркой под различными марками плавящихся флюсов**

Марка флюса	Содержание элементов, %					
	C	Mn	Si	Fe	S	P
ОСЦ-45	0,025	0,37	0,069	0,404	0,004	0,038
ФЦ-6	0,02	0,42	0,037	0,26	0,007	0,045
АН-348	0,03	0,42	0,037	0,329	0,008	0,027
АН-20	0,02	0,16	0,056	0,476	0,004	0,012

возникла необходимость разработки специального флюса, способного рафинировать, легировать и модифицировать металл сварного шва. Такими возможностями обладают неплавленные или керамические флюсы [19].

### **Керамический флюс ЖН-1 для автоматической и полуавтоматической сварки никеля**

На основе термодинамических расчетов химического сродства никеля и других элементов к кислороду при температуре до  $3500^{\circ}\text{K}$ , позволивших определить качественный характер и направление реакций легирования и раскисления в указанных условиях, а также на основе большого числа проведенных экспериментов, авторами разработан керамический флюс ЖН-1 для автоматической и полуавтоматической сварки никеля.

В качестве шлакообразующей основы флюса принята система:  $\text{CaO} - 5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaF}_2$ . Для легирования металла швов марганцем и титаном последние вводились во флюс в виде чистых порошков. Кремний, как показали эксперименты, нет необходимости вводить во флюс в виде ферросплавов или порошков. Нужная степень легирования достигается за счет растворения кремния, восстановленного в процессе диссоциации окиси кремния жидкого стекла. В качестве дегазатора и наиболее энергичного раскислителя выбран порошкообразный алюминий.

Примерный химический состав керамического флюса ЖН-1 приведен в табл. 43.

## Примерный химический состав керамического флюса ЖН-1

Содержание компонентов, %									
CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaF <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	Mn	Ti	Al	S	P
								не более	
7—9	14—16	50—55	18—20	5—6	4—5	1,5—2,0	5,5—6,5	0,05	0,05

Керамический флюс ЖН-1 предназначен для автоматической и полуавтоматической дуговой сварки никеля марок Н-1, Н-2, НП-1 и НП-2.

В качестве электродной проволоки используется никелевая проволока марок Н-1, НП-1, НП-2. В случае применения при сварке проволоки НМц-2,5 производится перерасчет состава флюса, из которого исключается марганец металлический.

Состав шихты флюса ЖН-1 приведен в табл. 44.

Таблица 44

## Состав шихты керамического флюса ЖН-1

Наименование компонентов	ГОСТ или ТУ на компоненты	Содержание, %	Просев компонентов через сито, отв/см <sup>2</sup>
Мрамор . . . . .	4416-48	12,0	2500—3600
Флюоритовый концентрат . . . . .	ЦМТУ 3342-53	60,0	2500—3600
Глинозем, Г-00, Г-0 . . . . .	6912-54	15,0	2500—3600
Марганец металлический, Мр-0, Мр-1 . . . . .	6008-51	5,0	1000—1500
Титановый порошок, ИМП-1, ИМП-1А . . . . .	ЦМТУ 5058-55	2,0	1000—1500
Алюминиевый порошок, ПА-2, ПА-3 . . . . .	—	6,0	600—900
Силикат натрия (раствор плотностью 1,32—1,35) к весу сухой шихты . . . . .	Класс А, 4419-48	18,0—20,0	—

Сварка никеля под флюсом ЖН-1 производится постоянным током обратной полярности на обычных стандартных автоматах и полуавтоматах. Несколько лучшие результаты получаются при использовании автоматов с зависимой от напряжения дуги подачей электродной проволоки.

Питание дуги в зависимости от вида сварки и параметров режима осуществляется от сварочных преобразователей ПС-300, ПС-500 или ПСМ-1000. Для характеристики устойчивости процесса сварки никеля под различными флюсами были проведены опыты по определению так называемой разрывной длины дуги на разных режимах. С этой целью между никелевой электродной проволокой и никелевой пластиной под слоем флюса возбуждалась

Таблица 45

Разрывная длина дуги при сварке никеля под различными флюсами

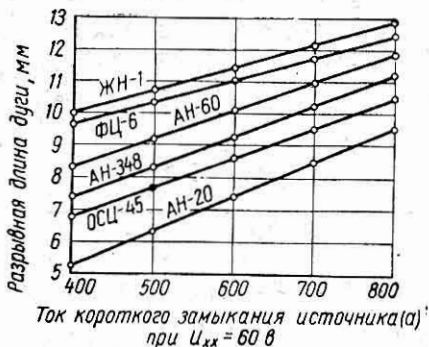
Марка флюса	Разрывная длина дуги (мм) при токе, а				
	400	500	600	700	800
ЖН-1	10,04	10,72	11,40	12,10	12,80
ФЦ-6	9,65	10,35	11,05	11,76	12,47
АН-60	8,34	9,25	10,10	11,05	11,91
АН-348	7,38	8,34	9,28	10,22	11,20
ОСЦ-45	6,78	7,63	8,63	9,52	10,50
АН-20	5,20	6,32	7,43	8,50	9,61

дуга постоянного тока обратной полярности (плюс на электроде). По достижении установившегося процесса сварки прекращалась подача проволоки и после естественного обрыва дуги замерялось расстояние между электродом и изделием. Средние результаты из десяти замеров для каждой марки флюса приведены в табл. 45 и представлены графически на фиг. 39.

Кроме того, при сварке никеля под различными флюсами было произведено снятие осциллограмм изменения тока и напряжения дуги. Осциллограммы тока и напряжения дуги при одинаковом установившемся режиме автоматической сварки никеля показаны на фиг. 40.

Из графика (фиг. 39) и осциллограмм (фиг. 40) видно, что флюс ЖН-1 обладает хорошими стабилизирующими свойствами, так как изменения тока и напряжения в процессе сварки, по сравнению с другими флюсами, незначительны. Высокая стабильность горения дуги под этим флюсом объясняется наличием в его составе большого количества таких ионизаторов, как мрамор, и особенно жидкое натриевое стекло. Поэтому, несмотря на высокое содержание во флюсе флюоритового концентрата, эффективный потенциал ионизации смеси газов в дуге будет низким и, по-видимому, близким по величине к потенциалу ионизации паров натрия [42].

Если устойчивое горение дуги в процессе сварки (при всех равных условиях) для флюса ОСЦ-45 наблюдается при напряжении 40—42 в, то для флюса ЖН-1 — при 22—24 в. Этот факт в значительной мере облегчает ведение процесса автоматической и особенно полуавтоматической сварки никеля.



Фиг. 39. Зависимость величины разрывной длины дуги от сварочного тока при автоматической сварке никеля под различными флюсами.

Имея в своем составе в основном окислы элементов, обладающие большим сродством к кислороду, и отличаясь высокой основностью, разработанный флюс позволяет получать металл сварного шва достаточной чистоты, с хорошими механическими и коррозионными свойствами.

Технологические свойства флюса ЖН-1 характеризуются легким возбуждением дуги, высокой стабильностью ее горения, свободным удалением шлаковой корки после ее остывания и хорошим формированием сварных швов. Химический состав металла швов, полученных при сварке никеля марки НП-2 по ГОСТ 492-52 проволокой НП-2 по ГОСТ 2179-59 под флюсом ЖН-1, приведен в табл. 46.

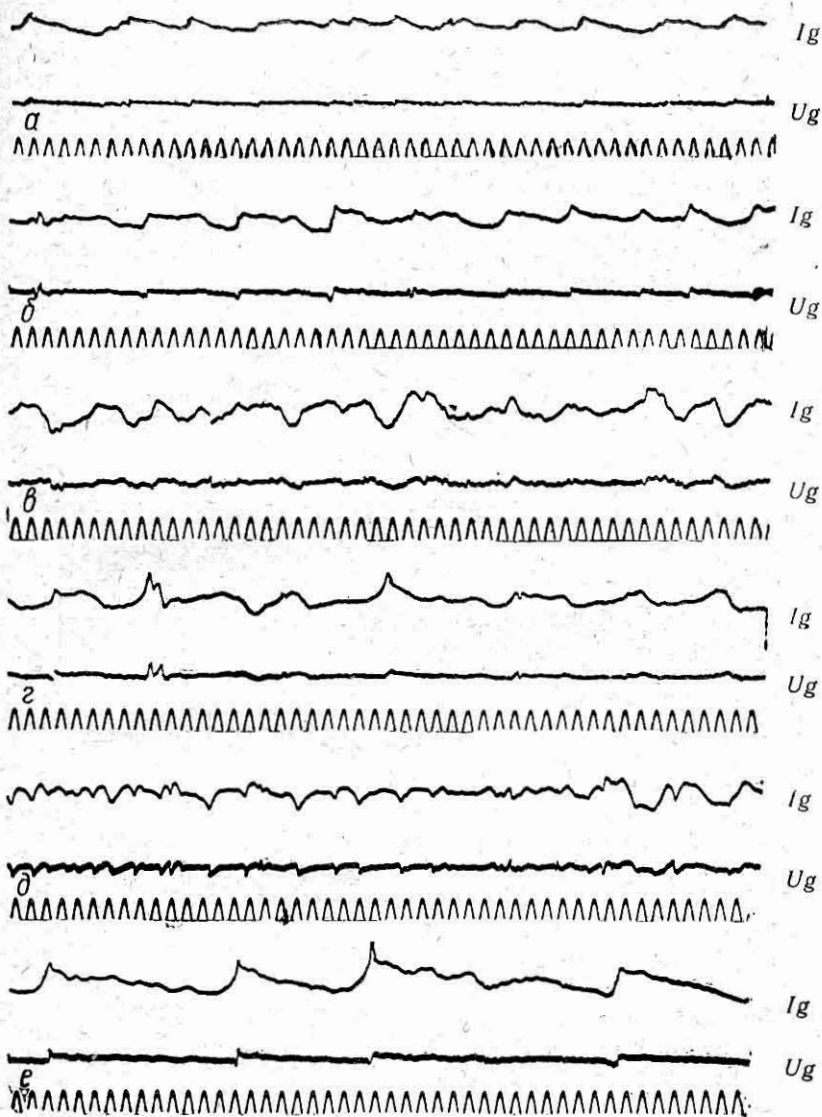
Таблица 46

Химический состав швов, выполненных автоматической и полуавтоматической сваркой под флюсом ЖН-1

Вид сварки	Содержание элементов, %							
	C	Mn	Si	Fe	Ti	Al	S	P
Автоматическая . . .	0,03	2,27	0,61	0,45	0,97	0,90	0,009	0,046
Полуавтоматическая .	0,05	3,91	1,32	0,56	1,44	1,00	0,009	0,044

Примечания: 1. Автоматическая сварка осуществлялась током обратной полярности проволокой диаметром 5 мм на режиме:  $U_{\partial} = 32-35$  в,  $I_{\partial} = 550-575$  а,  $V_{св} = 25$  м/ч.

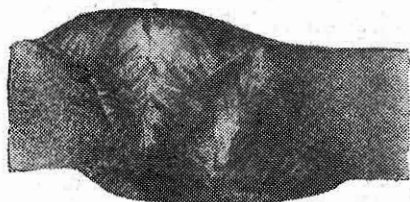
2. Полуавтоматическая сварка производилась проволокой диаметром 2,5 мм на режиме:  $U_{\partial} = 30-33$  в,  $I_{\partial} = 280-320$  а,  $V_{св} = 95$  м/ч.



Фиг. 40. Осциллограммы тока и напряжения дуги при автоматической сварке никеля под различными флюсами:

а — ЖН-1, б — ФЦ-6, в — АН-60, г — АН-348, д — ОСЦ-45, е — АН-20.

Металлографические исследования показали, что металл сварных швов плотный, без пор, трещин, газовых и шлаковых включений (фиг. 41). Рентгенографирование сварных швов подтвердило отсутствие каких-либо дефектов (фиг. 42).

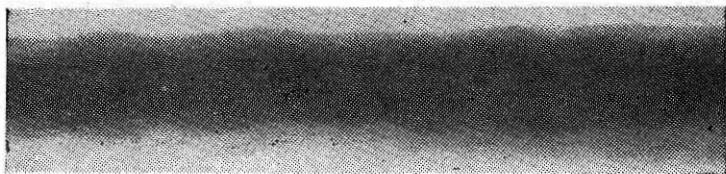


Фиг. 41. Макрошлиф стыкового соединения из никеля НП-2, выполненного автоматической сваркой под флюсом ЖН-1,  $\times 2,5$ .

Микроструктура металла шва и переходной зоны при автоматической сварке никеля под флюсом ЖН-1 показана на фиг. 43.

Механические испытания образцов показали стабильные и высокие качества сварных соеди-

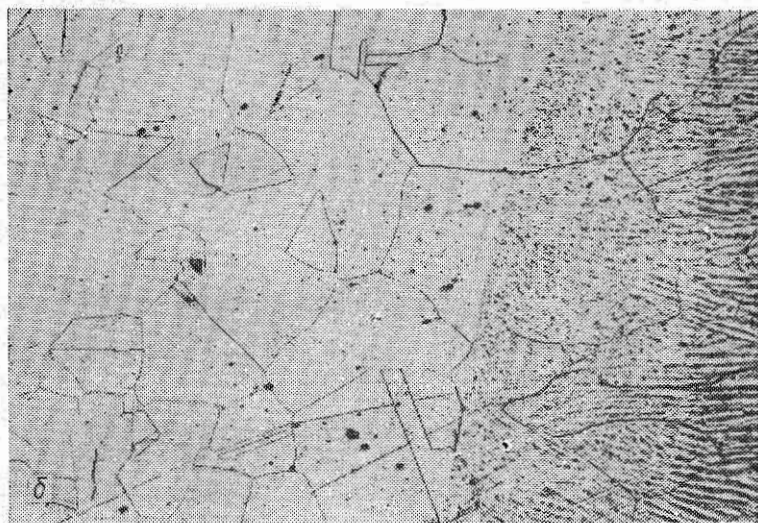
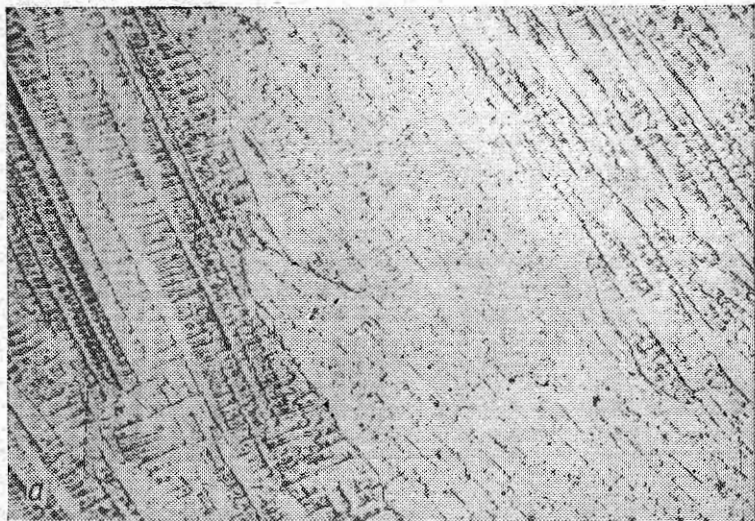
нений. Показатели механических свойств основного металла, сварных швов и соединений приведены в табл. 47.



Фиг. 42. Рентгенограмма сварного шва, выполненного при автоматической сварке никеля НП-2 под флюсом ЖН-1.

Многократное использование флюса ЖН-1 в производственных условиях при изготовлении химической аппаратуры показало отсутствие заметной сепарации компонентов флюса по удельному весу. На диаграмме (фиг. 44) показана зависимость предела прочности сварных соединений, выполненных автоматической сваркой под флюсом ЖН-1, от кратности использования флюса. Как видно из диаграммы, предел прочности сварных соединений изменяется незначительно.

Ввиду отсутствия единой стандартизованной методики определения химической стойкости сварных соединений из никеля авторами был принят метод испытания образцов в высокотемпературном расплаве едкого натра. Образцы размером  $5 \times 20 \times 80$  мм, вырезанные поперек



Фиг. 43. Микроструктура металла шва и переходной зоны при автоматической сварке никеля НП-2 под флюсом ЖН-1,  $\times 100$ :

*a* — металл шва; *b* — переходная зона.

шва и из основного металла, выдерживались в едком натре 80 ч при температуре 500° С. Коррозионная стойкость определялась по величине потерь веса образцов за все время испытания. Взаимодействие образцов с агрессивной средой в разные периоды испытания различно. Так, в момент загрузки образцов происходит интенсивное корродирование металла. На поверхности образцов появляется довольно прочная пленка черного цвета. После появления черной пленки на поверхности образцов, т. е. после их пассивирования, скорость коррозии значительно уменьшается. Как показали коррозионные испытания, металл сварных швов почти не уступает по химической стойкости основному металлу (фиг. 45).

Таблица 47

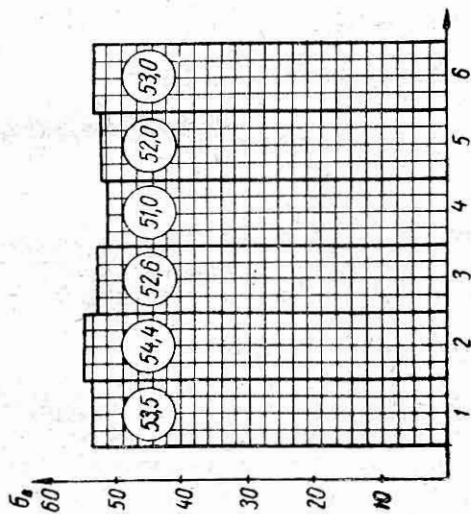
**Показатели механических свойств сварных швов и соединений при сварке никеля под флюсом ЖН-1**

Объект испытания и вид сварки	Предел прочности при растяжении, кг/мм <sup>2</sup>	Ударная вязкость, кгМ/см <sup>2</sup>	Относительное удлинение, %	Угол загиба, град
Горячекатаный никель НП-2 по ГОСТ 492-52	54,0—55,5	—	36,3—41,4	180—180
	55,0		38,8	180
Металл шва и сварное соединение при автоматической сварке	52,6—54,4	24,3—31,5	36,1—51,3	180—180
	53,5	27,7	43,1	180
Металл шва и сварное соединение при полуавтоматической сварке	47,3—49,0	23,4—27,2	35,4—41,7	180—180
	48,3	24,5	38,6	180

Примечание. В числителе приведены наименьшие и наибольшие показания, в знаменателе — средние из пяти замеров.

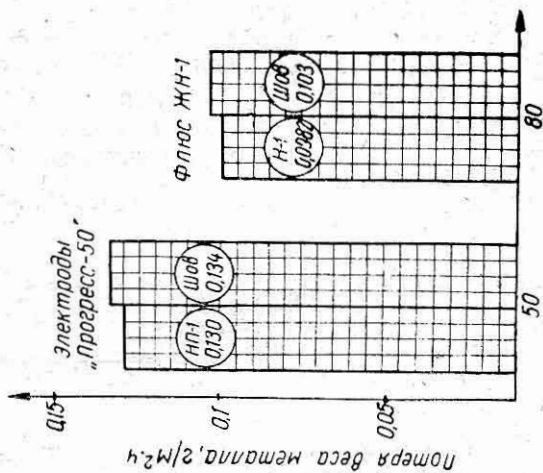
С целью выявления межкристаллитной коррозии образцы сварных соединений никеля после испытания на общую коррозию подвергались загибу на угол 90—120°. По появлению трещин на внешней изогнутой поверхности образцов определялась склонность металла швов и зоны термического влияния к межкристаллитной коррозии. Как показали опыты, сварные соединения никеля, выполненные автоматической сваркой под флюсом ЖН-1, являются достаточно стойкими против межкристаллитной коррозии.





Кратность использования флюса

Фиг. 44. Диаграмма зависимости предела прочности сварных швов от кратности использования флюса при автоматической сварке никеля НП-2.



Время испытаний в мин при 500°C, в час

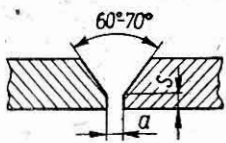
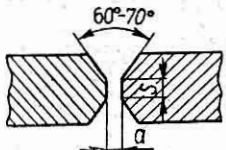
Фиг. 45. Диаграмма зависимости потери веса образцов от времени коррозионных испытаний для различных видов сварки никеля.

Автоматическая и полуавтоматическая дуговая сварка никеля под флюсом ЖН-1 осуществляется в нижнем или слегка наклонном (не более  $10^\circ$ ) положениях на флюсовой подушке, а также на медных подкладках.

В зависимости от толщины металла сварка может производиться без разделки кромок, либо с V-образной или X-образной разделками и углом раскрытия  $60-70^\circ$ . Кромки подготавливаются под сварку механическим способом: вырубкой, стружкой или фрезерованием согласно данным, приведенным в табл. 48.

Таблица 48

**Подготовка кромок под автоматическую и полуавтоматическую сварку никеля**

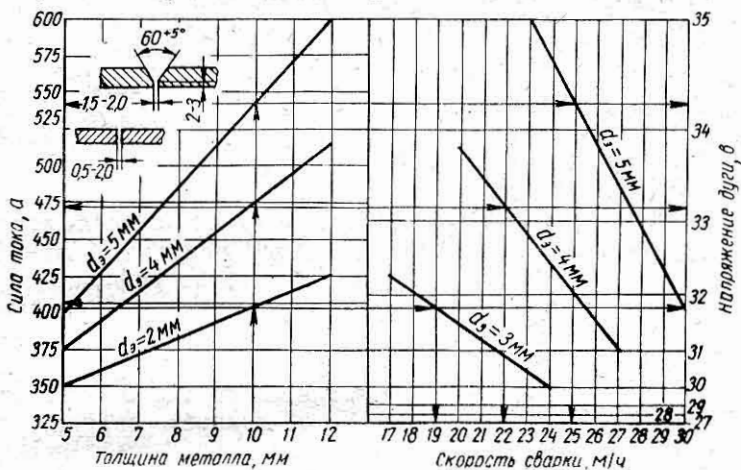
Толщина металла, мм	Эскиз подготовки кромок	Притупление $S$ , мм	Зазор $a$ , мм
6,0—12,0		1,0—2,0	0,5—2,5
12,0—20,0		2,0—4,0	1,5—3,0

Подготовленные кромки и прилегающие к ним участки металла на ширину 30—40 мм с обеих сторон должны тщательно зачищаться до металлического блеска и обезжириваться ацетоном или чистым бензином.

Эксперименты по сварке никеля под флюсом ЖН-1 никелевой электродной проволокой показали, что для получения качественных сварных соединений, по сравнению с параметрами режима для сварки сталей, необходимо поддерживать дугу малой длины, выбирать ток меньшей величины и вести процесс при небольшой скорости (на 15—20% меньшей, чем скорость сварки сталей). Большой сварочный ток ведет к перегреву металла и дефектам швов.

С целью снижения сварочных напряжений и повышения механических свойств сварные соединения, особенно

при сложной конфигурации изделия, рекомендуется подвергать после сварки нагреву до 250—300°С с последующим охлаждением на воздухе. Допускается нагрев швов и участков с обеих его сторон с помощью ацетилено-кислородной горелки. Пламя при этом должно быть слегка



Фиг. 46. Номограмма ориентировочных режимов автоматической сварки стыковых соединений из никеля.

восстановительным и очищенным от сернистых соединений.

Ориентировочные режимы автоматической сварки стыковых соединений из никеля под флюсом ЖН-1 приведены в табл. 49.

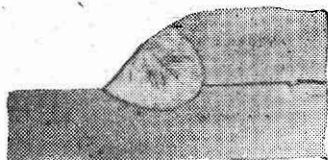
Примерный режим автоматической сварки на постоянном токе стыковых соединений толщиной 5—12 мм можно установить по номограмме, представленной на фиг. 46. Дальнейшее уточнение режимов в зависимости от габаритов и конфигурации изделия, условий сварки и других факторов должно осуществляться практическим путем для каждого случая отдельно.

Пример выбора режима сварки никеля толщиной 10 мм показан на фиг. 46 стрелками. По оси абсцисс на левой части графика берется толщина свариваемого металла 10 мм. Из этой точки оси абсцисс восстанавливается перпендикуляр до пересечения с одной из наклонных линий  $d_s = 3$  мм,  $d_s = 4$  мм,  $d_s = 5$  мм, соответствующей выбранному диаметру электродной проволоки. Через

точку пересечения проводится прямая, параллельная оси абсцисс, которая на левой и правой осях ординат



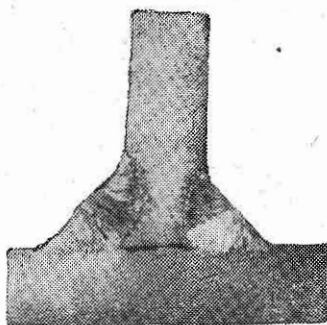
Фиг. 47. Макрошлиф стыкового соединения из никеля НП-2, выполненного автоматической сваркой под флюсом ЖН-1,  $\times 1,0$ .



Фиг. 48. Макрошлиф нахлесточного соединения из никеля НП-2, выполненного автоматической сваркой под флюсом ЖН-1,  $\times 1,0$ .

укажет величины сварочного тока и напряжения дуги. Указанная прямая пересечет также наклонные линии

правой части графика. Тогда перпендикуляр, опущенный из точки пересечения с одной из этих линий на ось абсцисс, определит необходимую скорость сварки, соответствующую выбранному режиму.



Фиг. 49. Макрошлиф таврового соединения из никеля НП-2, выполненного автоматической сваркой под флюсом ЖН-1,  $\times 1,0$ .

Автоматическая и полуавтоматическая сварка никеля под керамическим флюсом ЖН-1 при обычных колебаниях режима и состава компонентов для изготовления флюса надежно обеспечивает постоянные состав и свойства швов, как и любой другой способ сварки плавлением.

На фиг. 47, 48 и 49 показана макроструктура сварных соединений из никеля, выполненных автоматической электродуговой сваркой под керамическим флюсом ЖН-1.

### Автоматическая и полуавтоматическая сварка никеля с малоуглеродистой сталью под флюсом ЖН-1

При изготовлении сварных никелевых конструкций и аппаратуры очень часто возникает необходимость сварки никеля с малоуглеродистой сталью марки МСт.3.

Автоматическая и полуавтоматическая сварка никеля со сталью МСт.3 производится никелевой электродной проволокой под флюсом ЖН-1 постоянным током обратной полярности. Режимы сварки выбираются те

Таблица 49

**Ориентировочные режимы автоматической сварки стыковых соединений из никеля**

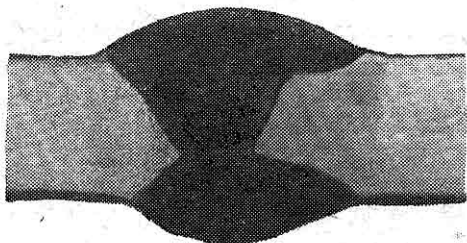
Толщина металла, мм	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, а	Скорость сварки, м/ч	Напряжение дуги, в	Зазор в стыке, мм
5.	3	340—360	23—25	30—34	0—0,5
	4	360—390	26—28		0,5—1,0
	5	380—420	29—31		1,0—1,5
6	3	350—370	22—24	30—34	0—0,5
	4	380—410	25—27		0,5—1,0
	5	400—440	28—30		1,0—1,5
7	3	360—380	21—23	30—34	0,5—1,0
	4	400—430	24—26		1,0—1,25
	5	430—470	27—29		1,25—1,75
8	3	370—390	20—22	30—34	0,5—1,0
	4	420—450	23—25		1,0—1,25
	5	460—500	26—28		1,25—1,75
9	3	380—400	19—21	30—34	1,0—1,25
	4	440—470	22—24		1,25—1,5
	5	490—530	25—27		1,5—2,0
10	3	390—410	18—20	30—34	1,0—1,25
	4	460—490	21—23		1,25—1,5
	5	520—560	24—26		1,5—2,0
11	3	400—420	17—19	30—34	1,25—1,5
	4	480—510	20—22		1,5—2,0
	5	550—590	23—25		2,0—2,5
12	3	410—430	16—18	30—34	1,25—1,5
	4	500—530	19—21		1,5—2,0
	5	580—620	22—24		2,0—2,5

же, что и при сварке никеля с никелем (табл. 49). Технология получения сварных соединений никеля со сталью аналогична технологии сварки технически чистого никеля.

Одной из особенностей сварки никеля со сталью МСт.3 является большая склонность сварных швов к образованию горячих трещин. Особенно сильно поражаются трещинами швы угловых и тавровых сварных соединений. Причиной образования трещин, по-видимому, является повышенное содержание в швах углерода и серы, полигонизационная структура металла швов

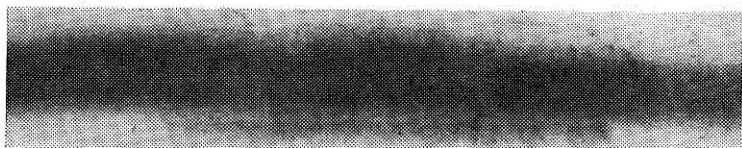
и наличие значительных напряжений, возникающих при сварке.

Для получения качественных сварных соединений сварку никеля со сталью МСт. 3 следует осуществлять



Фиг. 50. Макрошлиф стыкового соединения никеля со сталью МСт-3, выполненного автоматической сваркой под флюсом ЖН-1.

с предварительным подогревом изделий до температуры 250—300°С. По окончании сварки сварные соединения



Фиг. 51. Рентгенограмма сварного шва, полученного при автоматической сварке никеля со сталью МСт-3 под флюсом ЖН-1.

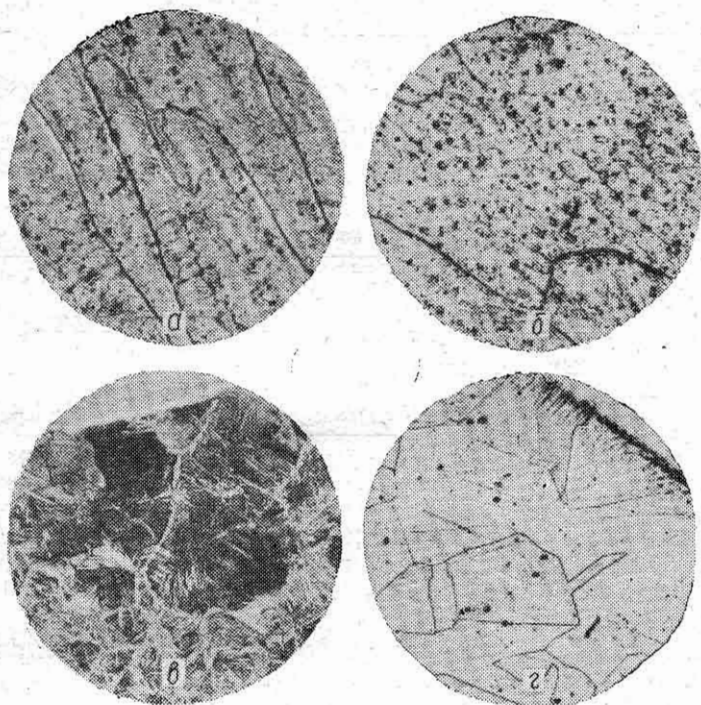
рекомендуется вновь подогреть до той же температуры и оставить остывать на воздухе.

Кроме того, необходимо стремиться к минимальному проплавлению стальной детали для уменьшения доли ее участия в образовании шва. Иногда это достигается путем наложения на ее кромку так называемого облицовочного никелевого валика, который затем сваривается с никелевым изделием.

При соблюдении указанных выше мер удастся получать сварные швы без пор, трещин и других дефектов.

На фиг. 50 и 51 показаны макрошлиф стыкового соединения никеля со сталью МСт. 3 и рентгенограмма сварных швов, выполненных автоматической сваркой под флюсом ЖН-1.

Металлографические исследования показали, что структура сварных швов биметаллических соединений мелкозернистая с четко выраженными полигонизационными границами кристаллитов (фиг. 52).



Фиг. 52. Микроструктура сварного шва, выполненного при автоматической сварке никеля со сталью МСт-3 под флюсом ЖН-1,  $\times 135$ :

*а* — структура шва у линии сплавления со сталью; *б* — структура шва у линии сплавления с никелем; *в* — переходная зона от шва к стали; *г* — переходная зона от шва к никелю.

Химический состав металла швов, полученных при различных способах сварки никеля со сталью МСт. 3, приведен в табл. 50.

Сварные соединения никеля со сталью, выполненные автоматической и полуавтоматической сваркой под флюсом ЖН-1, имеют достаточно стабильные и высокие показатели механических свойств (табл. 51).

## Химический состав металла швов при автоматической и полуавтоматической сварке никеля со сталью

Вид сварки	Содержание элементов, %							
	C	Mn	Si	Fe	Ti	Al	S	P
Автоматическая	0,08	1,26	0,50	19,42	0,14	0,33	0,016	0,0032
Полуавтоматическая	0,13	1,40	1,34	16,76	0,34	0,75	0,012	0,0026

Таблица 51

## Показатели механических свойств сварных соединений при автоматической и полуавтоматической сварке никеля со сталью

Объект испытания и вид сварки	Предел прочности при растяжении, кг/мм <sup>2</sup>	Ударная вязкость, кг/м/см <sup>2</sup>	Угол загиба, град
Сварное соединение при автоматической сварке	43,2—48,0	19,5—22,3	180—180
	45,6	20,8	180
Сварное соединение при полуавтоматической сварке	42,0—43,1	13,8—18,7	180—180
	42,4	16,5	180

Примечание. В числителе приведены наименьшие и наибольшие показания, в знаменателе — средние из пяти замеров.

Однако вопрос сварки никеля с малоуглеродистыми сталями нельзя считать окончательно решенным, особенно для сталей с содержанием углерода более 0,3%. По нашему мнению, требуется активное вмешательство в металлургические процессы, протекающие при сварке, разработка новых, более совершенных, простых и надежных методов сварки с применением специальных флюсов, покрытий и проволок.

## Технология изготовления керамического флюса ЖН-1

Процесс изготовления керамического флюса ЖН-1 прост, и организация его производства не представляет затруднений для предприятий, выпускающих качественные электроды для дуговой сварки. Технология изготовления керамических флюсов описана в источниках [19, 20, 52].

Керамический флюс представляет собой цементированную жидким стеклом механическую смесь тонкоразмолотых компонентов, изготовленную в виде крупки соответствующей грануляции. Размер зерен флюса ЖН-1



для автоматической сварки лежит в пределах 1,5—2,0 мм, а для полуавтоматической 0,8—1,3 мм. Каждая крупинка керамического флюса обладает достаточной механической прочностью и содержит все компоненты в установленной составом пропорции. Наличие цементирующих веществ делает гранулы прочными и устраняет возможность сепарации флюса при его использовании.

Для изготовления флюса ЖН-1 применяются: мрамор, флюоритовый концентрат, глинозем, титановый порошок, марганец металлический, алюминиевый порошок и жидкое натриевое стекло. Все компоненты по своему химическому составу должны строго соответствовать требованиям гостов или ТУ (табл. 52). Компоненты при отсутствии сертификатов должны подвергаться химическому анализу. Применение для флюса компонентов без химического анализа не допускается. Отбор проб компонентов для определения химического состава должен производиться в соответствии с требованиями ГОСТ 4423-48.

Изготовление флюса ЖН-1 сводится к следующим основным операциям:

1) размол и просев компонентов; 2) составление и смешивание сухой шихты; 3) замес шихты на водном растворе жидкого стекла; 4) грануляция сырой массы замеса; 5) сушка и прокалка флюса.

Размол компонентов осуществляется после их сушки и дробления чаще всего в шаровых мельницах периодического действия, в которые одновременно загружаются в одинаковом количестве по весу стальные шары и материал.

После измельчения в шаровых мельницах материалы просеиваются через соответствующие сита механизированным путем или вручную. Для изготовления флюса ЖН-1 мрамор, флюоритовый концентрат и глинозем должны быть просеяны через сито с 2500—3600 отв/см<sup>2</sup>, металлический марганец и титановый порошок через сито с 1000—1500 отв/см<sup>2</sup>, а алюминиевый порошок через сито с 600—900 отв/см<sup>2</sup>.

Измельченные и просеянные компоненты взвешиваются в соответствии с рецептурой флюса и тщательно перемешиваются в «пьяной бочке» до получения равномерной по составу сухой смеси. Затем полученная смесь загружается в шнековый или бегунковый смеситель; к ней

добавляется водный раствор жидкого стекла плотностью 1,32—1,35 в количестве 18—20% от веса сухой шихты. После введения жидкого стекла смесь тщательно перемешивается до получения однородной по вязкости флюсовой массы.

Таблица 52

Химический состав компонентов, входящих в шихту керамического флюса ЖН-1

Наименование компонентов	Химический состав, %		ГОСТ или ТУ на компоненты	
Мрамор электродный	CaCO <sub>3</sub> , не менее 92,0 MgO не более 3,0 S до 0,04 P до 0,015		4416-48	
Флюоритовый концентрат	CaF <sub>2</sub> не менее 95,0 SiO <sub>2</sub> не более 1,6 S до 0,01		ЦМТУ 3342-53	
Глинозем	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> не менее	Г-00 98,4	Г-0 98,3	6912-54
	SiO <sub>2</sub> не более	0,06	0,08	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> не более	0,03	0,03	
	Na <sub>2</sub> O не более	0,5	0,6	
Титановый порошок, ИМП-1А	C не более 0,03 Si не более 0,09 Fe не более 0,1 Al не более 0,035 Ni не более 0,075		ЦМТУ 5058-55	
Марганец металлический	C не более	Мр-0 0,1	Мр-1 0,1	6008-51
	Mn не менее	99,7	95,0	
	Si не более	—	0,8	
	Fe не более	—	2,5	
	P не более	0,01	0,05	
Алюминиевый порошок	Al не менее	ПА-2 87,0	ПА-3 82,0	6058-51
	Fe не более	0,7	0,7	
	Si не более	0,7	0,7	
Силикат натрия электродный — раствор	SiO <sub>2</sub> 25—39 Na <sub>2</sub> O 10—13,5 S не более 0,07 Модуль 2,6—3,0 Удельный вес при 20°C		1,43—1,55	Класс А, 4419-48

Приготовленный сырой замес флюса протирается вручную через сито с ячейкой 2×2 мм или гранулируется на специальных машинах типа МГКФ-4 и др.

В настоящее время предложено много различных способов грануляции керамических флюсов, однако ни один

из них полностью не удовлетворяет требованиям производства.

Большинство разработанных приспособлений и машинок обладают низкой производительностью и не всегда надежны в работе.

Кафедра сварки Ждановского металлургического института для грануляции флюсовой массы применяет гранулятор собственной конструкции (фиг. 53). Указанный гранулятор прост, обладает высокой производительностью и надежностью в работе. Он состоит из цилиндрической обечайки — корпуса 7, на боковой поверхности которой высверлены отверстия диаметром 2 мм. От электродвигателя через червячный редуктор обечайка приводится во вращение со скоростью 30—50 об/мин. Внутри обечайки помещен продавливающий ролик 4, прижимаемый к корпусу специальными пружинами, давление которых может регулироваться. Ролик приводится во вращение от обечайки гранулятора за счет сил трения, возникающих между их поверхностями.

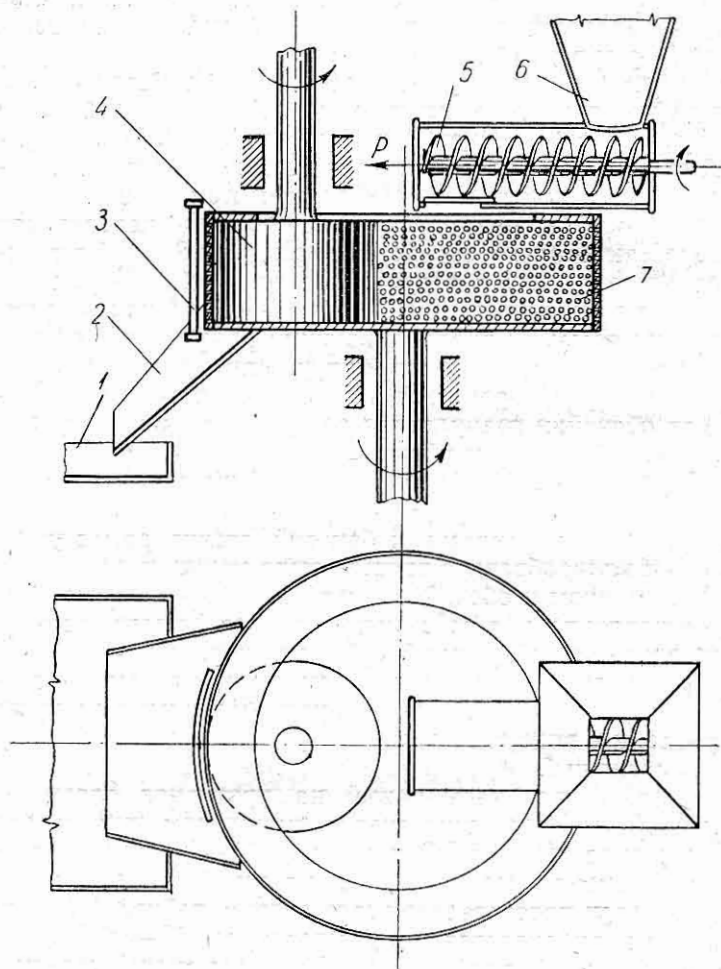
Сырой замес флюса из бункера 6 шнековым питателем 5 подается в корпус гранулятора. Отбрасываемый центробежными силами к боковой стенке замес увлекается в клинообразное пространство между продавливающим роликом и обечайкой, где развивается весьма высокое давление, под действием которого флюсовая масса выдавливается изнутри обечайки наружу.

Продавленная таким образом флюсовая масса срезается специальными ножами 3, установленными снаружи корпуса, и в виде отдельных гранул поступает по желобу 2 на противни 1.

Сырой флюс, насыпанный на противнях слоем не более 25 мм, просушивается в сушильном шкафу при температуре 120—150°С в течение 15—20 мин. Просушенный флюс с целью разъединения слипшихся в процессе сушки зерен просеивается через сито с ячейкой 3×3 мм, а затем прокаливается при температуре 350—400°С при периодическом перемешивании. Толщина слоя флюса при прокаливании не должна превышать 50 мм. После прокалики флюса производится отсев пыли через сито с 400—600 отв/см<sup>2</sup>.

От каждой партии флюса отбирается проба, под которой осуществляется сварка опытных образцов. Готовый и принятый ОТК флюс должен храниться в закрытых

ларях. После длительного хранения перед употреблением флюс рекомендуется прокалить.



Фиг. 53. Схема гранулятора керамического флюса конструкции Ждановского металлургического института.

Следует отметить, что предлагаемая технология автоматической и полуавтоматической сварки никеля с применением керамического флюса ЖН-1 является в настоя-

щее время наиболее удовлетворяющей запросы производства, так как дает возможность получать сварные соединения из никеля всех промышленных марок, равноценные основному металлу как по механическим, так и по антикоррозионным свойствам.

Весьма важно, что сварка никеля под флюсом ЖН-1 выполняется обычно без каких-либо дополнительных технологических операций на том же оборудовании и почти так же легко, как и сварка обычных малоуглеродистых сталей.

Все это позволяет надеяться на широкое промышленное внедрение способов дуговой сварки никеля под керамическими флюсами.

---

## **V. ДЕФЕКТЫ ШВОВ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ НИКЕЛЯ**

Современное состояние сварочной техники в большинстве случаев позволяет получать металл швов, сварные соединения и конструкции в целом высокого качества. Однако при сварке отдельных металлов и сплавов приходится принимать специальные меры против образования различного рода дефектов. Дефекты, встречающиеся в сварных соединениях, а также причины их появления весьма разнообразны и имеют характерные особенности для каждого из видов сварки. Одной из основных трудностей, которую приходится преодолевать при сварке никеля, является склонность сварных швов к образованию горячих (кристаллизационных) трещин и пор.

### **Трещины при сварке технически чистого никеля**

Трещины являются одним из наиболее опасных и недопустимых дефектов в сварных швах, так как они могут развиваться в процессе эксплуатации конструкции даже при весьма низких средних рабочих напряжениях, особенно при циклическом характере нагружения.

Концы трещин представляют собой самые сильные концентраторы напряжений, в результате чего металл в микрообъемах, прилегающих к концам трещины, всегда испытывает огромные напряжения объемного характера.

Известно, что при некоторых видах объемных напряжений, например при всестороннем равномерном растяжении, тангенциальные напряжения в металле не возникают, протекание пластических деформаций затрудняется, становится возможным хрупкое разрушение конструкции под действием нормальных напряжений отрыва.

Этим объясняется тот факт, что даже в металлах, обладающих высокими пластическими свойствами, трещины всегда имеют хрупкий характер излома, без следов пластической деформации.

Сопротивляемость металлов развитию трещин в процессе работы конструкции прежде всего зависит от их пластичности. С улучшением пластических свойств облегчается перераспределение напряжений в случае их большой неравномерности, снижаются концентрация напряжений на концах трещины, хрупкое разрушение и рост трещины затрудняется.

По своему характеру трещины, возникающие в сварных соединениях из никеля, можно разделить на две группы:

а) трещины, образующиеся в процессе работы сварного соединения, — эксплуатационные;

б) трещины, появляющиеся еще при изготовлении конструкции, например при сварке, термообработке, ковке, прокатке и т. д., — технологические.

Эксплуатационные трещины в конструкциях из никеля возникают редко, вследствие того, что никель и многие из сплавов на его основе имеют высокие пластические свойства и потому сравнительно мало чувствительны к надразам, трещинам и другим концентраторам напряжений. Никелевые конструкции хорошо переносят вибрационные, ударные и взрывные нагрузки, что является одной из причин широкого использования никеля и его сплавов в технике.

Вместе с тем, опыт изготовления сварных конструкций из никеля показывает, что при использовании несовершенных методов сварки никеля и при нарушении технологического процесса сварки в сварных соединениях наблюдаются трещины. Форма и характер расположения трещин в сварных соединениях весьма разнообразны. Наиболее крупные из них выходят на поверхность швов и легко различимы невооруженным глазом. Характерной особенностью трещин, возникающих при сварке никеля и многих сплавов на его основе, является их межкристаллитный характер (фиг. 54).

Механизм образования трещин в сварных швах пока еще недостаточно изучен и по современным представлениям является весьма сложным. Он связан с процессами нагрева, охлаждения и особенно кристаллизации металла.

При сварке металл шва претерпевает быстрое нагревание до температур, превышающих температуру плавления никеля, а затем более медленно охлаждается до

температуры окружающей среды. В результате объемных изменений, связанных с нагревом и охлаждением, металл шва с самого начала его кристаллизации и формирования подвергается упруго-пластическим деформациям, особенно значительным в направлении, перпендикулярном к оси шва [53, 54]. В шве могут возникать собственные напряжения растяжения, величина которых с изменением температуры меняется и почти всегда достигает значений предела текучести металла для данной температуры —  $\sigma_s(T)$ .



Фиг. 54. Межкристаллитные трещины в сварных швах никеля,  $\times 135$ :

а — флюс ОСЦ-45; б — флюс ФЦ-6.

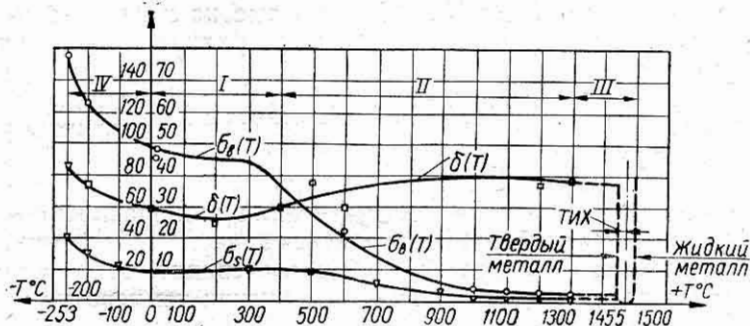
Механические свойства металла в процессе нагрева и охлаждения также сильно изменяются. Разрыв сплошности металла и возникновение трещин при сварке, очевидно, будет возможным в том случае, когда собственные напряжения в металле шва превысят значения предела текучести никеля для данной температуры, а величина деформации исчерпает деформационную способность металла. В этом случае нарушатся атомные или молекулярные связи и в каком-то участке шва возникнет зародышевая трещина, которая может развиваться либо в процессе дальнейшего охлаждения шва, либо при эксплуатации изделия.

Для оценки возможности возникновения трещин при сварке никеля необходимо рассмотреть совместно диаграммы изменения напряжений, прочности и пластичности в зависимости от температуры. На фиг. 55 показан характер изменения показателей механических свойств



и напряжений в интервале температур — 253—1300° С по данным В. Д. Дженкинса [55], Т. Г. Диггеса [56], А. П. Смирягина [4] и других авторов.

В интервале температур выше 1300° С нанесены условно предполагаемые значения величин.



Фиг. 55. Изменение показателей механических свойств и напряжений никеля при различных температурах.

Следует отметить, что с увеличением температуры предел прочности и предел текучести никеля падают, тогда как его пластические свойства остаются высокими и даже возрастают до 1300° С.

По характеру изменения свойств никеля можно условно выделить несколько областей температур (фиг. 55).

В области I (0° С—400° С) показатели механических свойств никеля изменяются незначительно. Особенностью никеля является большая разница между пределом прочности —  $\sigma_b$  и пределом текучести —  $\sigma_s$  во всех интервалах температур. Если для малоуглеродистых сталей при нормальных температурах  $\frac{\sigma_s}{\sigma_b} \approx 0,5 \div 0,7$ , то для никеля это

отношение значительно меньше и составляет всего  $\frac{\sigma_s}{\sigma_b} \approx 0,15 \div 0,3$ . Исходя из отмеченного свойства никеля можно утверждать, что собственные напряжения в сварных никелевых конструкциях будут менее опасными, чем при сварке конструкций из стали.

В области II (400°—1300° С) все показатели механических свойств никеля резко изменяются. Как в I, так и во II области возможная величина собственных напряжений —  $\sigma_s(T)$ , соответствующих появлению пластических

деформаций металла, не достигает значений предела прочности —  $\sigma_d(T)$ , что свидетельствует о малой вероятности возникновения трещин в этих областях температур. При этом необходимо также принять во внимание, что деформационная способность металла шва при температурах от  $0^\circ\text{C}$  до  $1300^\circ\text{C}$  очень высока и характеризуется значениями относительного удлинения —  $\delta$  не ниже 50%.

Следовательно, возникновение технологических трещин при сварке в I и II зонах температур практически невозможно.

В области температур III, по существу, следует различать два участка. До температуры начала плавления —  $T_{\text{сол}}$  металл продолжает находиться в твердом состоянии, изменение его характеристик будет, очевидно, подчинено тем же законам, что и при более низких температурах. На этом участке, так же, как в I и II областях, пластические свойства очень высоки, а  $\sigma_s(T)$ , хотя и убывает, но постоянно остается больше  $\sigma_s(T)$ .

С момента начала плавления  $T_{\text{сол}}$  в некотором интервале температур металл будет представлять собой двухфазную систему, состоящую из твердых кристаллов, окруженных жидким маточным раствором. Естественно, что свойства металла, находящегося в таком состоянии, будут отличными от свойств твердого или жидкого тела. Как и для большинства других металлов для технического никеля этот интервал температур характеризуется потерей прочности и пластичности.

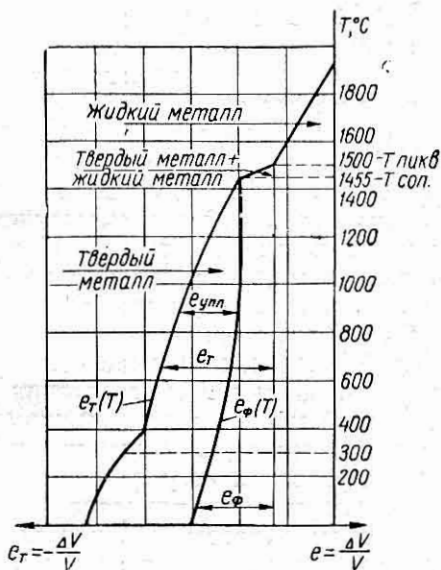
В настоящее время считается установленным, что при сварке технологические (горячие) трещины возникают в температурном интервале хрупкости (в дальнейшем сокращенно ТИХ), который составляет часть интервала кристаллизации и расположен между температурами солидуса  $T_{\text{сол}}$  и ликвидуса  $T_{\text{ликв}}$  [53, 57, 58, 59].

Упрощенную схему возникновения кристаллизационных трещин можно представить следующим образом.

В процессе охлаждения и кристаллизации сварочной ванны происходит объемная усадка металла, как в самом металле ванны, так и в прилегающих к шву нагретых областях основного металла.

Выделим условно некоторый малый объем ванны и проследим его изменения при охлаждении. Если бы этот объем не был связан с окружающим более холодным

металлом, то его деформация при охлаждении происходила бы свободно в соответствии с температурным коэффициентом объемного сокращения [кривая  $e(T)$  на фиг. 56]. Но так как выделенный объем не свободен, а находится в связи с прилегающими к нему слоями металла, то свободно-го температурного сокращения не произойдет, так как этому мешает общая жесткость конструкции. Так как конструкция под действием сил усадки шва все-таки деформируется, то это изменение формы может облегчить температурное сокращение, потому что направление усадки шва и деформации конструкции чаще всего совпадают. Это изменение выделенного объема, связанное с жесткостью конструкции, зависит от температуры и изображено на фиг. 56 кривой  $e_f(T)$ .



Фиг. 56. Деформации в металле шва при его охлаждении.

Для того чтобы не нарушилась сплошность металла шва и не возникли трещины, необходимо, чтобы разность между свободной температурной усадкой  $e_m(T)$  и той, которую допускает имеющаяся жесткость конструкции  $e_f(T)$ , была компенсирована упруго-пластическими деформациями металла шва  $e_{упл}(T)$ , т. е.

$$e_{упл}(T) = e_m(T) - e_f(T).$$

Это означает, что деформационная способность металла шва  $e_m(T)$  должна быть больше  $e_{упл}(T)$ :

$$e_m(T) > e_{упл}(T).$$

Для сварных соединений из никеля, обладающего, как указывалось ранее, высокими пластическими свойствами в области температур от  $0^\circ\text{C}$  до  $T_{сол}$  деформационная

способность всегда оказывается достаточной даже в самых жестких конструкциях, когда  $e_{\phi}(T)$  практически равно нулю. Поэтому, если трещины не возникли в температурном интервале хрупкости (ТИХ), то при дальнейшем охлаждении металла их возникновение уже невозможно.

При переходе металла из жидкого в твердое состояние удельный объем его сильно уменьшается, т. е. происходит значительная, главным образом пластическая деформация металла.

В начальный момент кристаллизации, когда количество кристаллитов твердого никеля еще мало, а жидкого маточного раствора много, деформационная способность ванны обеспечивается смещением кристаллов и перетеканием жидкого раствора. При увеличении количества и величины кристаллов объем жидкой фазы уменьшается и количество ее может оказаться недостаточным для обеспечения сплошности системы при сдвигах кристаллов. В указанном случае возможно образование микротрещин. С момента срастания отдельных кристаллов в общий каркас в шве возникают упруго-пластические деформации и напряжения, которые при соответствующих условиях могут увеличить начавшуюся трещину до макроскопических размеров.

Таким образом, возникновение горячих трещин при сварке определяется главным образом соотношением величины деформации, которой подвергается ванна в период ее кристаллизации  $e_{упл}(T)$  и соответствующей деформационной способности  $e_m(T)$ .

Величина деформации ванны  $e_{упл}(T)$  зависит от многих факторов и, в первую очередь, от среднего коэффициента объемного или линейного расширения при нагреве. Значительное влияние на деформацию ванны оказывает также характер теплового поля, который, в свою очередь, зависит от режимов сварки и теплофизических свойств свариваемого металла.

Средний коэффициент теплового расширения для никеля значительно выше, чем для железа (табл. 53), поэтому при одинаковых тепловых полях величина упруго-пластических деформаций никелевой ванны в период ее кристаллизации значительно больше, чем стальной.

Это обстоятельство является одной из причин повышенной склонности никеля к образованию кристаллиза-

ционных трещин в сравнении с железом и малоуглеродистыми сталями.

Таблица 53

Зависимость коэффициента линейного расширения никеля и железа от температуры [1]

Температура, °С		0	100	200	300	370	390	400	500	600
Коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^6$	Ni 99,98%	13,5	—	—	16,6	26,0	15,0	17,6	—	17,8
	Fe 99,86%	11,0	12,1	13,9	14,2	15,3	15,8	16,2	16,2	16,0

При сварке никеля кристаллизирующаяся ванна обладает низкой деформационной способностью, что, в свою очередь, также увеличивает возможность возникновения трещин в сварных швах.

Низкая деформационная способность никеля в интервале кристаллизации объясняется следующими причинами:

1. Грубой крупнокристаллической структурой металла швов. Характерной особенностью кристаллизации сварных швов из никеля является их чисто аустенитная структура, ярко выраженное дендритное строение, строгая направленность дендритов и отсутствие кристаллизационных слоев (см. фиг. 30).

В результате сдвига крупных кристаллов, происходящего в ходе деформации кристаллизующегося металла при незначительном количестве жидкой фазы образуются отдельные микроскопические пустоты, не заполненные маточным раствором. Эти пустоты или несплошности могут служить зародышами трещин. Кроме того, крупная дендритная структура металла приводит еще в процессе кристаллизации к образованию ликвационных ослабленных зон, чаще всего в местах встречи фронта растущих кристаллов, что опять-таки способствует возникновению трещин.

Вместе с тем необходимо отметить, что наличие жидких прослоек в момент разрушения и образования трещин не является обязательным. По мнению Б. А. Мовчана [58], низкая деформационная способность в температурном интервале хрупкости чисто аустенитных швов, к которым относятся и никелевые швы, объясняется

возникновением микротрещин внутри кристаллитов в результате процессов полигонизации и скопления структурных несовершенств. Такое представление не находится в противоречии с гипотезой о прочности металлов в процессе кристаллизации при сварке [53], а также с приведенными выше рассуждениями.

2. Деформационную способность никеля сильно ухудшает неизбежное наличие в нем таких примесей, как свинец, висмут и др. Указанные элементы практически не растворяются в никеле и даже при ничтожном содержании образуют избыточную фазу, обладающую низкой температурой плавления и располагающуюся по границам кристаллов.

3. Наличие в металле шва серы, кислорода и водорода увеличивает склонность к образованию горячих трещин, хотя механизм влияния этих элементов различен.

Сера не растворяется в никеле, но может образовывать с ним соединения, например сульфид никеля  $Ni_3S_2$ . Сульфид никеля образует с никелем хрупкую эвтектику с температурой плавления  $644^\circ C$ . При кристаллизации эта эвтектика затвердевает в последнюю очередь, располагается по границам зерен и очень сильно снижает прочность и особенно пластичность никеля при высоких температурах. При содержании серы в никеле свыше  $0,01\%$  в швах, как правило, появляются трещины. Ковка и горячая прокатка такого никеля также становится невозможной.

Следует иметь в виду, что насыщение никеля серой и снижение его пластических свойств может происходить даже при газовом нагреве в серосодержащей атмосфере. Поэтому при газовой сварке или подогреве никеля ацетилено-кислородным пламенем необходимо применять дополнительные меры для очистки газа от сернистых соединений.

Влияние кислорода на свойства никеля достаточно подробно освещалось ранее. Здесь только целесообразно указать на то, что тугоплавкие включения закиси никеля ( $\approx 2090^\circ C$ ) вытесняются при кристаллизации на границы зерен и резко снижают деформационную способность металла.

4. Имеются опытные данные о том, что наличие углерода в никелевых швах более  $0,15\%$  резко снижает деформационную способность кристаллизующегося металла

и вызывает появление в нем горячих трещин. Так, например, при сварке никеля с углеродистыми сталями возникают весьма серьезные трудности в связи с поражением швов трещинами и порами.

Все меры, предупреждающие возникновение горячих трещин при сварке, должны быть направлены на:

а) уменьшение величины деформации в процессе кристаллизации металла шва;

б) улучшение деформационной способности кристаллизующегося металла.

Величина деформации снижается при сокращении зон разогрева свариваемых изделий, что достигается некоторым уменьшением сварочного тока по сравнению с применяющимся для сварки сталей. Для этой же цели следует уменьшать жесткость свариваемых конструкций (конечно, если это возможно) и выбирать такой порядок сварки элементов, который обеспечивает свободную усадку швов.

Повышение деформационной способности никеля в процессе его кристаллизации достигается в основном металлургическим воздействием.

Для предупреждения возникновения горячих трещин в металле сварных швов его нужно предохранить или очистить от вредных примесей, таких как сера, кислород, водород, углерод и др. С этой целью необходимо в процессе сварки надежно защищать шлаком, защитными газами или другими средствами сварочную зону от атмосферных газов и строго ограничить количество вредных элементов в сварочных материалах. Раскисление никеля удобнее всего производить алюминием, марганцем и титаном.

Значительное улучшение деформационной способности в интервале температур кристаллизации достигается путем легирования никеля марганцем (до 2—3%) и модифицирования титаном.

Небольшие количества марганца в никеле улучшают его механические свойства при обычных температурах и ослабляют вредное влияние серы, связывая ее в сравнительно тугоплавкие ( $\sim 1325^\circ\text{C}$ ) соединения  $\text{MnS}$ , располагающиеся равномерно внутри зерен, а не по их границам.

Небольшая присадка титана измельчает грубую дендритную структуру сварных никелевых швов, делает ее

мелкозернистой и дезориентированной. Грубые межкристаллитные прослойки раздробляются и в результате модификации сплошная межкристаллитная сетка превращается в систему отдельных мелких включений (фиг. 30). Мелкокристаллитная структура является более подвижной в процессе кристаллизации, легко деформируется без нарушения сплошности, в результате чего горячие трещины в никелевых швах, модифицированных титаном, не возникают.

Предварительный подогрев конструкции перед сваркой до  $300^{\circ}\text{C}$  также снижает опасность возникновения горячих трещин.

Применение перечисленных мероприятий позволяет получать сварные соединения из никеля промышленных марок без горячих трещин.

Отдельного рассмотрения заслуживают свойства никеля и никелевых сварных соединений при отрицательных температурах.

Известно, что большинство металлов и сплавов, в том числе железо и углеродистые стали, с понижением температуры становятся хрупкими. Например, ударная вязкость и относительное удлинение конструкционных сталей при понижении температуры от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-100^{\circ}\text{C}$  снижаются в 5—10 раз.

В процессе эксплуатации стальных сварных конструкций при пониженных температурах (на морозе) пластичность металла снижается, затрудняются процессы перераспределения напряжений в случае неравномерного нагружения. Прочность конструкции в таких условиях в значительной степени зависит от величины собственных напряжений и их концентрации.

Так как в любой реальной сварной конструкции всегда существуют собственные напряжения и всегда есть концентраторы, то снижение пластических свойств при низких температурах приводит к появлению трещин. Эти трещины имеют совершенно другую природу, чем горячие, хотя в большинстве случаев начинаются с участков металла, имеющих дефекты кристаллизации.

В отличие от железа пластичность никеля с понижением температуры повышается (фиг. 55). При снижении температуры от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-253^{\circ}\text{C}$  предел прочности никеля возрастает с  $47 \text{ кг/мм}^2$  до  $75 \text{ кг/мм}^2$ ; относительное удлинение также растет с 60% при  $0^{\circ}\text{C}$  до 87% при  $-253^{\circ}\text{C}$ .



Эта особенность никеля позволяет применять его для изготовления различного рода деталей, работающих не только при повышенных, но и минусовых температурах.

### Поры в сварных соединениях из никеля и способы их предупреждения

Одним из наиболее часто встречающихся дефектов сварных никелевых соединений являются поры. По мнению многих исследователей [27, 41, 60, 61], главными причинами повышенной склонности никелевых сварных соединений к образованию пор являются:

а) насыщение расплавленного металла сварочной ванны водородом, кислородом, азотом, окисью углерода и другими газами;

б) резкое снижение растворимости газов при переходе металла ванны из жидкого состояния в твердое.

С физической точки зрения, в максимально упрощенном виде процесс образования пор можно представить следующим образом.

Во время расплавления основного и электродного металла электродные капли, а также металл сварочной ванны находятся в контакте с газовой фазой, имеющей весьма высокую температуру и насыщенную активными, в значительной мере диссоциированными газами. В таких условиях насыщение металла сварочной ванны газами происходит очень интенсивно и даже в короткий срок существования ванны успевает достигнуть значений соответствующих парциальным давлениям газов, а иногда и предельных растворимостей для данной температуры.

В процессе охлаждения жидкого металла растворимость газов в нем падает незначительно. В интервале же температур кристаллизации никеля  $T_{ликв} - T_{сол}$ , при переходе его из жидкого состояния в твердое, растворимость большинства газов в никеле падает скачкообразно, например для водорода в 2—3 раза, для кислорода в 20 раз и т. д. Избыток растворенных газов начинает бурно выделяться из жидкого металла и коагулировать в мелкие, а затем и в более крупные пузырьки. Пузырьки выделившихся газов стремятся всплыть на поверхность жидкой ванны. Крупные пузырьки газа всплывают быстрее, чем мелкие, вследствие того, что на них действуют большие силы выталкивания. Максимальное время,

в течение которого всплывают выделившиеся газы, очевидно, будет равно времени существования жидкой ванны и зависеть от параметров режима сварки. Так как обычно время существования жидкой ванны мало, то газовые пузыри не успевают всплыть на поверхность жидкого металла и образуют при затвердевании шва поры.

Возможность выхода со дна ванны на поверхность пузырька газа определяется скоростью его всплывания  $v_n$  глубиной ванны  $H$  и временем ее пребывания в жидком состоянии  $t_0$ .

Если не учитывать перемешивания ванны под действием дуги, то, очевидно, для того чтобы пузырек успел всплыть, время его подъема должно быть меньше или в крайнем случае равно времени пребывания ванны в жидком состоянии:

$$\frac{H}{v_n} \leq t_0. \quad (22)$$

Скорость всплывания газового пузырька в вязкой жидкости может быть найдена из выражения

$$v_n = \frac{2r^2(\gamma_{ж.н} - \gamma_г) \cdot g}{9\eta}, \quad (23)$$

где  $r$  — радиус газового пузырька, см;  
 $\gamma_{ж.н}$  — удельный вес жидкого никеля, г/см<sup>3</sup>;  
 $\gamma_г$  — удельный вес газа в пузырьке, г/см<sup>3</sup>;  
 $g$  — ускорение силы тяжести, 981 см/сек<sup>2</sup>;  
 $\eta$  — коэффициент вязкости, дин·сек/см<sup>2</sup>.

Удельный вес жидкого никеля для температуры плавления 1455°С может быть принят равным 8 г/см<sup>3</sup>. Удельный вес газа в сравнении с удельным весом металла очень мал и его можно считать равным нулю. Коэффициент вязкости расплавленного никеля близок к коэффициенту вязкости жидкой стали и составляет ~ 0,025 пуаз.

Время существования ванны в зависимости от режима сварки и теплофизических характеристик основного металла, по Н. Н. Рыкалину [62], выразится формулой:

$$t_0 = \frac{q}{2\pi\lambda T_{на} v_{св}}. \quad (24)$$

Глубину ванны можно с некоторыми допущениями определить на основании следующих соображений. Примем, что в поперечном сечении ванна представляет собой

полукруг радиуса, равного глубине ванны —  $H$ . Тогда площадь проплавления основного металла  $F_{пр}$  равна:

$$F_{пр} = \frac{1}{2} \pi H^2$$

и может быть выражена через параметры режима сварки следующим образом [62]:

$$F_{пр} = \frac{0,24UI\eta_u\eta_t}{v_{св} \cdot \gamma_{ж.н} S_{пл}} = \frac{1}{2} \pi H^2, \quad (25)$$

где  $0,24 \cdot U \cdot I \cdot \eta_u = q$  — эффективная тепловая мощность сварочной дуги;

$\eta_t$  — термический к. п. д. — отношение части тепловой мощности дуги, расходуемой на нагрев изделия, ко всей тепловой мощности дуги;

$v_{св}$  — скорость сварки, см/сек;

$\gamma_{ж.н} \cdot S_{пл}$  — теплосодержание расплавленного никеля,  $\approx 2100$  кал/см<sup>3</sup>.

Из выражения (25) после преобразования имеем:

$$H = A \left( \frac{q}{v_{св}} \right)^{\frac{1}{2}} \eta_t^{\frac{1}{2}}, \quad (26)$$

где  $A$  — постоянная, зависящая от теплофизических свойств никеля и равная

$$A = \sqrt{\frac{2}{\pi \cdot \gamma_{ж.н} S_{пл}}}$$

После подстановки выражений (23), (24), (26) в формулу (22), соответствующих преобразований и упрощений получим выражение, связывающее параметры режима сварки (погонную энергию) с минимальным размером газового пузыря, который успеет всплыть при указанном режиме:

$$r = T \sqrt{\frac{\eta_t}{\frac{q}{v_{св}}}}, \quad (27)$$

где  $T$  — постоянная для никеля, равная

$$T = \sqrt{\frac{9 \cdot A \cdot \eta \cdot \pi \cdot \lambda \cdot T_{пл}}{\gamma_{ж.н} \cdot g}}$$

Выражение (27) выведено с серьезными допущениями и вряд ли пригодно для количественных расче-

тов, тем не менее качественные зависимости оно, по-видимому, иллюстрирует правильно.

На основании этого выражения можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение погонной энергии сварки улучшает условия дегазации сварных швов.

2. Режимы сварки, характеризующиеся малым значением  $\eta$ , — швы с малой глубиной проплавления, улучшают дегазацию сварочной ванны.

3. Изменение режима сварки оказывает большое влияние на дегазацию швов. Однако решающее значение приобретает металлургическое воздействие.

Конечно, процесс порообразования является значительно более сложным, чем это представлено выше. Физические процессы растворения и выделения газов на самом деле сопровождаются достаточно сложными химическими реакциями в газовой фазе, металле, шлаке и на границах их раздела. Некоторые из этих реакций будут рассмотрены далее.

*Влияние водорода.* Широко распространенным является мнение, что главную роль в возникновении пор при сварке никеля играет водород. Не отрицая несомненного влияния водорода на образование пор, следует тем не менее, сказать, что степень этого влияния в условиях сварки никеля иногда очень сильно преувеличивается.

Никель в расплавленном состоянии действительно хорошо растворяет водород. Однако высокая растворимость водорода в никеле еще не может служить доказательством его особо вредного влияния.

Дело в том, что растворимость водорода в никеле при переходе его из жидкого в твердое состояние изменяется сравнительно мало — всего в 2—3 раза, тогда как для других газов изменение гораздо более резкое — 20—30 раз.

Более плавный характер изменения растворимости водорода в никеле объясняется тем, что при кристаллизации и затвердевании никеля растворимость водорода в нем хотя и уменьшается, однако остается все еще высокой  $\approx 0,18 \text{ см}^3/\text{г}$ .

При температуре конца кристаллизации —  $T_{\text{сол}}$  в никеле растворяется водорода втрое больше, чем в малоуглеродистой, и вдвое больше, чем в хромоникелевой

аустенитной стали. Поэтому избыточные количества водорода в металле шва, образовавшиеся вследствие падения растворимости, оказываются сравнительно небольшими.

При отсутствии в никеле кислорода небольшие количества избыточного водорода не являются опасными, так как успевают выделиться из металла и пор не образуют.

В практике аргонодуговой сварки никеля известно, что примесь к аргону водорода до 20% не только не приводит к образованию пор, но является надежным средством предупреждения их появления в сварных швах.

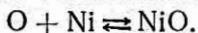
Таким образом, образование пор в сварных соединениях из никеля от воздействия собственно водорода возможно лишь при весьма высокой его концентрации в атмосфере дуги — свыше 20%.

*Влияние кислорода.* Кислород является наиболее опасным для никелевых швов, так как он не только вызывает появление пористости металла, но также резко ухудшает механические свойства сварных соединений.

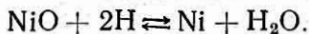
Расплавленный никель способен растворять большое количество кислорода. Так, например, при 1720°С в никеле растворяется до 1,2% кислорода [1]. Кислород избыточный, сверх предельной растворимости, может находиться в никеле в виде закиси NiO. В процессе кристаллизации растворимость кислорода в никеле очень резко падает и при 1470°С уже составляет всего 0,06%.

Избыточный кислород может не успеть выделиться из жидкого металла и образует поры.

Однако, будучи весьма химически активным элементом, кислород образует с никелем химическое соединение



Выделяющийся из никеля в результате падения растворимости одновременно с кислородом водород восстанавливает закись никеля по реакции:



При протекании этой реакции в сварочной ванне наблюдается бурное кипение жидкого металла в результате выделения паров воды, а после окончания кристаллизации швы, как правило, поражены порами.

Реакция восстановления закиси никеля водородом может протекать в жидкой и закристаллизовавшейся ванне, так как атомарный водород легко диффундирует в глубь металла, где реагирует с NiO, в то же время

образовавшиеся пары воды не могут выйти из твердого металла вследствие больших размеров молекулы, собираются в микропустотах, развивают там огромные давления и разрывают металл.

В результате вредного совместного действия кислорода и водорода резко падают пластические свойства металла — такое сварное соединение становится совершенно непригодным к эксплуатации. Здесь мы встречаемся с явлением, аналогичным широко известной «водородной болезни» меди.

Следует иметь в виду, что при выполнении многослойных швов содержание газов в металле от слоя к слою возрастает.

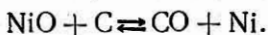
*Влияние азота.* Никель с азотом практически в реакцию не вступают и не создают сколько-нибудь устойчивых соединений. В связи с этим влияние азота на возникновение пор при сварке никеля может объясняться лишь физическими процессами растворения азота в никеле при расплавлении и выделении его из никеля при кристаллизации шва.

Химическая пассивность азота по отношению к никелю позволяет надеяться на возможность использования его в качестве защитного газа при сварке. Однако неоднократные попытки использования азота для этих целей пока не дали положительных результатов. Это, по нашему мнению, может быть объяснено недостаточной чистотой используемого азота.

*Влияние углерода.* Применяющийся для изготовления сварных конструкций технический никель марок НП-1, НП-2 и НП-3 имеет в своем составе незначительное количество углерода. Влияние его на возникновение пор при сварке практически не отмечается.

В особых случаях, например при сварке никеля с углеродистой сталью, концентрация углерода в сварочной ванне может быть гораздо более высокой.

Здесь уже имеют значение реакции связывания свободного кислорода и восстановление никеля углеродом из окиси никеля.



В том и другом случаях образующаяся в результате реакций окись углерода практически не растворяется

в никеле и может явиться причиной сильной пористости сварных швов.

*Способы предупреждения пор при дуговой сварке никеля.* Меры предупреждения пор в основном сводятся к защите жидкой сварочной ванны от насыщения кислородом и водородом, а также к подавлению реакции раскисления закиси никеля водородом. Для того чтобы газы не попадали в сварочную ванну, прежде всего необходимо, чтобы сварочные материалы были чистыми. Поэтому ГОСТ 849-56 и 492-52 предусмотрены ограничения по содержанию вредных элементов в основном металле и в сварочных проволоках (табл. 4 и 5).

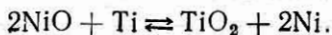
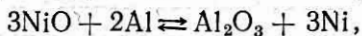
Особое внимание при всех существующих способах сварки никеля обращается на создание надежной защиты сварочной реакционной зоны от атмосферных газов, главным образом от кислорода и водорода.

Главными источниками водорода при сварке никеля являются влага, масло и другие загрязнения, находящиеся на кромках свариваемых деталей, и особенно на поверхности электродной проволоки.

Источником водорода в реакционном дуговом пространстве может служить также влага, содержащаяся в отсыревших или плохо прокаленных флюсах и электродных покрытиях. Вследствие этого перед сваркой никеля необходимо производить тщательную очистку и обезжиривание свариваемых кромок, а также поверхности электродной проволоки. Электроды и флюсы после длительного хранения перед употреблением должны быть тщательно прокалены.

При отсутствии производственной возможности произвести обезжиривание свариваемых кромок в ряде случаев можно обойтись прогревом их выше 400°; при этом масла и другие органические соединения выгорают.

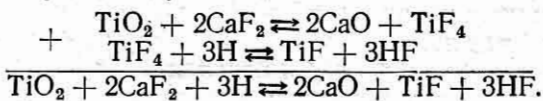
Несмотря на все меры защиты жидкого металла сварочной ванны от водорода и кислорода, попадание их в реакционную зону практически неизбежно, вследствие чего необходимо принимать меры для раскисления никеля и связывания водорода. Раскисление никеля при сварке может осуществляться марганцем, алюминием, титаном и другими раскислителями по реакциям типа:



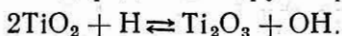
Так, например, в состав покрытия электродов «Прогресс-50», а также в керамический флюс для сварки никеля ЖН-1 в качестве раскислителей введены порошкообразные Al, Ti, Mn.

Наиболее эффективным связыванием водорода является перевод его в стойкое летучее соединение HF или гидроксил OH. Фтористый водород и гидроксил практически нерастворимы в никеле и удаляются в атмосферу.

Для этой цели при дуговой сварке никеля в состав флюсов и покрытий вводят плавленый шпат — CaF<sub>2</sub> и некоторое количество сильных кислых окислов TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>. Механизм связывания водорода в этом случае, очевидно, будет следующий:



Практически вполне вероятно возможность окисления избыточного водорода и по другой реакции:



Термодинамические расчеты, произведенные Б. И. Медоваром и Ю. В. Латашем [60], показали, что при воздействии CaF<sub>2</sub> и TiO<sub>2</sub> водород в аустенитных швах связывается в OH и HF. Данные термодинамических расчетов величины свободной энергии для возможных реакций приведены на фиг. 57.

Практика автоматической и полуавтоматической сварки никелевых конструкций под керамическим флюсом ЖН-1 и ручной дуговой сварки никеля электродами «Прогресс-50», содержащими в своем составе CaF<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> и обеспечивающими надежное получение качественных швов без пор, еще раз подтверждает справедливость приведенных выше соображений и выполненных термодинамических расчетов.

При достаточно высокой степени раскисленности основного металла и надежной защите ванны от атмосферного кислорода образования пор при сварке никеля можно избежать путем подавления реакции образования закиси никеля, вследствие чего реакция NiO + 2H  $\rightleftharpoons$  Ni + H<sub>2</sub>O оказывается невозможной и поры в швах не возникают. Таким путем достигают получения беспористых швов при сварке никеля в аргоне. Установлено,



что при сварке никеля в чистом аргоне избежать пор не удастся. При добавке к аргону 15—20% водорода, который энергично связывал весь случайно попадающий в реакционную зону кислород, образование NiO прекратилось и поры в швах больше не возникали.

В качестве одной из мер борьбы с порами в швах аустенитных сталей типа 18-8 Д. М. Рабкин [63] рекомендует применение постоянного тока и обратной полярности дуги.

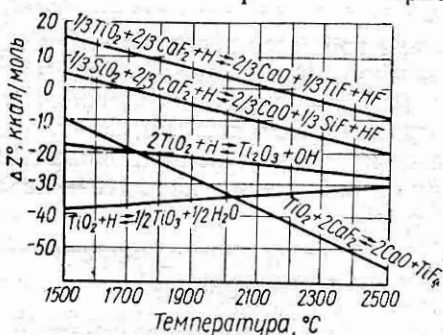
По его мнению, при сварке на обратной полярности обеспечивается наиболее совершенная защита сварочной ванны от водорода вследствие образования над ней слоя ионов фтора или избытка электронов, если флюс в своем составе фтора не содержит.

При этом насыщение металла шва водородом снижается. Снижается также возможность порообразования. Б. И. Медовар и Ю. В. Латаш [60] подтверждают справедливость этого утверждения применительно к сварке никеля и стали ЭИ-417 под флюсами БКФ-1 и АН-26.

Автоматическая сварка никеля под керамическим флюсом, так же как и ручная дуговая сварка электродами «Прогресс-50», выполняется на постоянном токе при обратной полярности.

Хотя выбор рода тока и полярности в этом случае обусловлен не борьбой с порами, а технологическими особенностями покрытия и флюса, тем не менее очень вероятно, что постоянный ток и обратная полярность способствуют получению стабильного и высокого качества сварных соединений никеля при использовании этих способов сварки.

В ряде работ [27, 60] в качестве одной из мер предупреждения пористости в чистоаустенитных швах рекомендуется увеличение длины дуги. На основании экспе-



Фиг. 57. Изменение свободной энергии образования фтористого водорода и гидроксидов в зависимости от температуры.

риментальных данных Б. И. Медовар и Ю. В. Латаш приходят к выводу, что с увеличением длины дуги содержание водорода в швах снижается, а пористость устраняется.

Отмеченное явление применительно к автоматической и полуавтоматической сварке никеля под флюсом ЖН-1 и ручной дуговой сварке электродами «Прогресс-50» не подтвердилось. Более того, при увеличении напряжения на дуге значительно выше рекомендованного в таблицах режимов (табл. 49) заметно ухудшалось формирование швов, а в отдельных случаях появлялись поры. При указанных способах сварки отсутствие пор обеспечивается строгим соблюдением рекомендованных режимов и применение дополнительной меры — увеличения напряжения на дуге — не вызывается необходимостью.

### **Некоторые особенности контроля качества сварных соединений из никеля**

Специфические свойства никеля как конструкционного материала, а также особенности сварки никеля в сравнении со сваркой конструкционных сталей, отражаются и на методах контроля качества сварных соединений из никеля.

Сварные конструкции из никеля обычно должны иметь высокие механические свойства и высокую коррозионную стойкость. Организация системы контроля качества в условиях производства должна быть подчинена этим главным требованиям.

Система контроля должна включать в себя следующие элементы:

1) контроль за соблюдением технических условий на основной металл и сварочные материалы — проволоку, флюс, электроды и т. п.;

2) контроль за соответствием квалификации сварщика сложности выполняемой работы;

3) контроль за соблюдением технологического процесса заготовки, сборки и сварки изделия;

4) проверку качества готовой продукции.

Первые три элемента контроля являются общими для любого вида сварочного производства. Их содержание подробно излагается в специальных курсах [64] и в данной работе не рассматривается.

При проверке никелевых сварных конструкций ответственного назначения обычно производятся следующие испытания:

1) выявление внешних дефектов швов (подрезов, наружных пор, крупных трещин, нарушения геометрических размеров швов и т. п.) путем осмотра конструкций;

2) определение внутренних дефектов (непроваров, пор, шлаковых включений и т. п.) рентгенографированием;

3) определение показателей механических свойств (предела прочности, относительного удлинения, угла загиба);

4) выявление скрытых мелких трещин путем травления вырезанных из шва образцов или методом засверловки и травления шва;

5) определение коррозионной стойкости сварных соединений.

Внешний осмотр швов производится в удобном положении, при хорошей освещенности и с использованием лупы пятикратного увеличения.

Поверхность осматриваемых швов должна быть тщательно очищена от шлаковой корки, пригара и других загрязнений.

В связи с тем, что при сварке никеля возможность возникновения пор, трещин и других дефектов гораздо большая, чем при сварке обычных малоуглеродистых или аустенитных сталей, внешний осмотр швов в этом случае приобретает особо важное значение. Следует иметь в виду, что выявление таких дефектов, как мелкие трещины, вообще связано с большими затруднениями, так как даже такие, казалось бы весьма совершенные методы контроля качества металла, как рентгенография, магнитография, надежных результатов не дают.

Известны многочисленные случаи из практики, когда сетка мелких трещин, сравнительно легко различимая невооруженным глазом, не выявлялась на рентгенограммах и только после вырезки шлифа и металлографического исследования было бесспорно доказано наличие трещин в швах.

Методы рентгеноконтроля и его организация сварных соединений из никеля практически та же, что и сталей.

По сравнению со сталями никель требует большего процента просвечивания швов.

На фиг. 58 показана рентгенограмма сварного соединения из никеля очень сильно пораженного порами, причем интересно отметить, что внешний вид швов этого соединения был безупречным. Пор и даже побитости на поверхности шва не наблюдалось.

В ответственных сварных конструкциях из никеля обычно подвергают рентгенографированию 100% швов.

Определение механических свойств сварных соединений из никеля ничем не отличается от таких же испытаний для сталей.



Фиг. 58. Рентгенограмма сварного шва никеля, пораженного порами.

При оценке механических свойств никеля большое внимание следует обращать на его пластические свойства, относительное удлинение, угол загиба, так как при нарушении технологии сварки эти свойства снижаются в первую очередь.

В отдельных случаях, когда имеется подозрение, что металл швов поражен скрытыми мелкими трещинами, производится засверловка шва в нескольких местах с последующим травлением внутренней поверхности для выявления трещин. Диаметр засверловки обычно принимают несколько больше ширины шва.

В качестве реактива-травителя используют свежеприготовленную смесь, состоящую из 50% ледяной уксусной и 50% концентрированной азотной кислот. Необходимо отметить, что этот вид испытаний не является обязательным и назначается в зависимости от ответственности конструкции и особенностей условий ее работы.

Для определения коррозионной стойкости сварных соединений из никеля стандартной, или хотя бы установленной методики в настоящее время не существует. Поэтому в каждом отдельном случае рекомендуется проводить коррозионные испытания никелевых образцов в средах и при температурах, соответствующих условиям эксплуатации изделий.

Несмотря на то, что специфические свойства никеля вызывают дополнительные трудности при его сварке, связанные с большой склонностью к образованию пор и трещин, возникновение этих дефектов в сварных швах может вполне надежно предупреждаться средствами металлургического воздействия в реакционной сварочной зоне.

Для стабильного получения высококачественных сварных соединений из никеля необходима высокая степень культуры производства, соблюдение режимов сварки и более строгая организация системы контроля, чем мы обычно имеем на производствах, изготавливающих конструкции из малоуглеродистых сталей.

---

---

#### **IV. ПРИМЕРЫ ВЫПОЛНЕНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НИКЕЛЯ**

Специфические свойства никеля, как конструкционного материала, обуславливают некоторые особенности формы сварных конструкций и технологические приемы их изготовления.

В последнее время авторами предложены новые методы автоматической и полуавтоматической сварки никеля под флюсом ЖН-1, а также ручной дуговой сварки электродами «Прогресс-50».

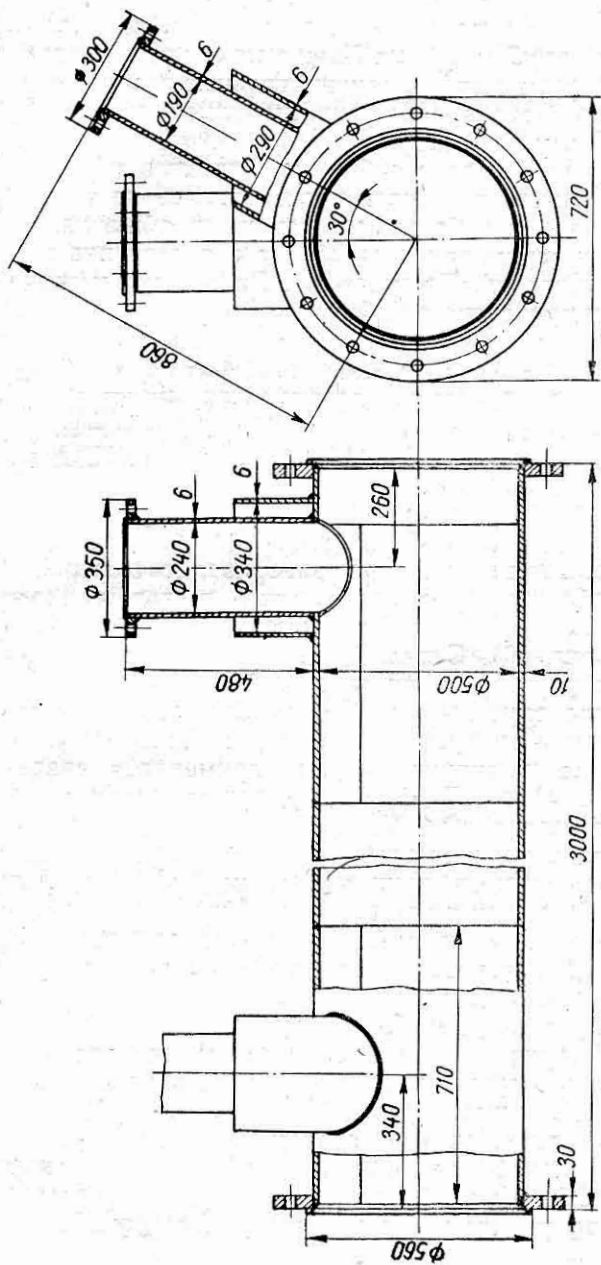
С помощью этих методов впервые в отечественной практике получены сварные соединения никеля, по механическим и коррозионным свойствам почти не уступающие основному металлу.

Описанные выше методы сварки технически чистого никеля нашли промышленное применение при изготовлении химической аппаратуры на бердичевском заводе «Прогресс», Московском экспериментальном заводе НИИхиммаша, киевском заводе «Большевик» и других.

##### **Промышленное использование новых методов сварки никеля**

Разработанные методы автоматической и полуавтоматической и ручной дуговой сварки никеля применяются на бердичевском заводе «Прогресс» при изготовлении аппаратов А-25 из никеля марки НП-2 (фиг. 59).

Аппарат состоит из корпуса диаметром 500 мм, длиной 3000 мм с приваренными к нему патрубками и фланцами. Толщина стенки корпуса 10 мм, а патрубков 6 мм. Аппарат снабжается мешалкой, представляющей собой стальную трубу с опорными цапфами, облицованную никелем толщиной 3 мм. К стальной трубе привариваются П-образные лопасти из никеля толщиной 8 мм.



Фиг. 59. Схема никелевого аппарата А-25.

В местах приварки лопастей никелевая облицовка вырубается на ширину 20 мм. Торцы мешалки в местах приварки опорных цапф, а также стальные крышки корпуса с грузочными и разгрузочными люками облицованы никелем толщиной 6 мм.

Никелевый корпус собирается из пяти обечаек. Холодная вальцовка обечаек производилась на трехвалковых вальцах с небольшими усилиями обжатия. После вальцовки осуществлялась сборка и постановка прихваток электродами «Прогресс-50». Расстояние между прихватками приведено в табл. 54.

Таблица 54

Постановка прихваток при сварке никеля

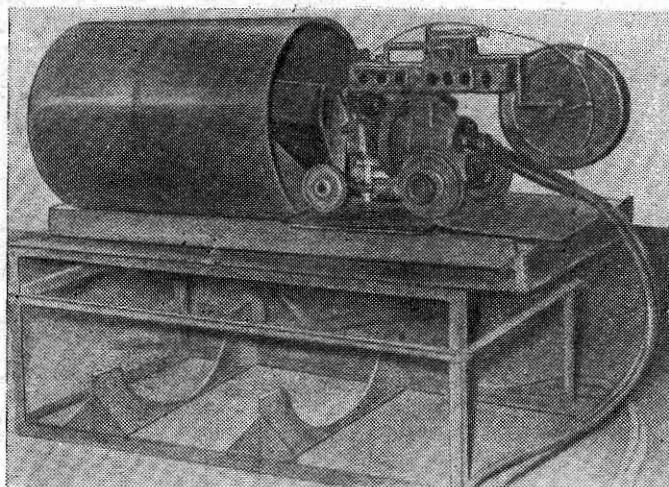
Тип соединения	Толщина металла, мм	Расстояние между прихватками, мм	Длина прихватки, мм
Стыковое . . . . .	8—12	250—300	50—70
Угловое . . . . .	8—12	200—250	50—70

Продольные швы обечаек заваривались в специальном приспособлении вначале изнутри, а затем снаружи. Сварка осуществлялась автоматом ТС-17М под флюсом ЖН-1 (фиг. 60). С целью свободного перемещения автомата внутри обечайки кассета для электродной проволоки была опущена на 100 мм. Сварка производилась на флюсовой подушке электродной проволокой НП-2. В качестве источника питания применялся сварочный преобразователь ПС-500. Параметры режима сварки и форма разделки кромок выбирались с учетом получения сварных швов с малым усилением. С этой целью угол раскрытия кромок принят равным  $60^{+50}$ , притупление 2,5 мм. Кромки и прилегающие к ним участки на ширину 30—40 мм зачищались до металлического блеска. Режим автоматической сварки обечаек под флюсом ЖН-1 приведен в табл. 55.

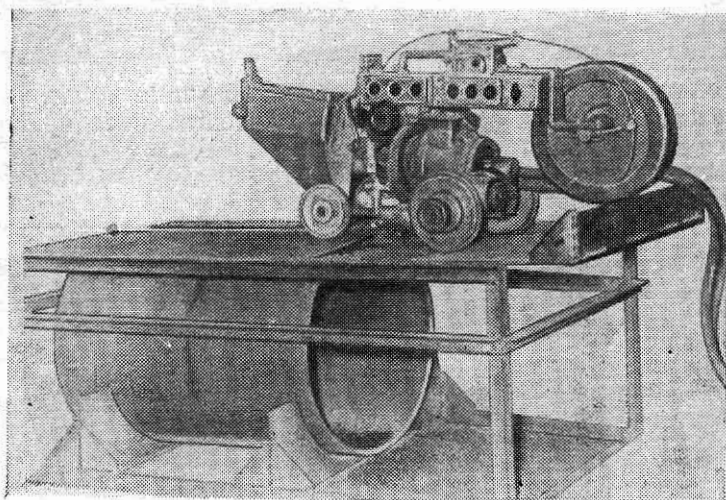
После сварки внутренних продольных швов производилась расчистка корня шва пневматическим зубилом и заварка наружных швов в том же приспособлении и на тех же режимах (фиг. 61).

Сваренные обечайки перед сборкой в корпус подвергались холодной калибровке с допуском по диаметру 1,5 мм. Обечайки собирались в корпус с зазором 1,5 мм и прихватывались электродами «Прогресс-50». Угол



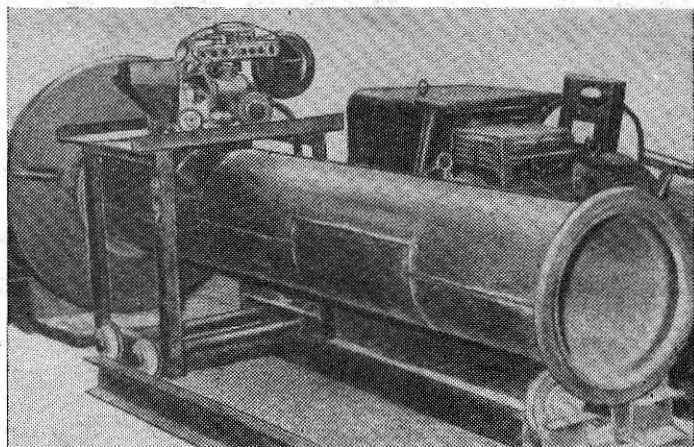


*Фиг. 60.* Автоматическая сварка внутренних швов никелевых обечаек.



*Фиг. 61.* Автоматическая сварка наружных швов никелевых обечаек.

раскрытия кромок обечаек выбран равным  $60^{+5^\circ}$ , а при-  
тупление 1 мм. Для сварки кольцевых швов применялся  
сварочный манипулятор Т-22 и трактор ТС-17М, уста-  
новленный на специальном приспособлении (фиг. 62).



Фиг. 62. Автоматическая сварка кольцевых швов корпуса  
никелевого аппарата.

Сварка производилась на медных разъемных кольцах  
в один проход электродной проволокой диаметром 4 мм.  
Режим автоматической сварки кольцевых швов приве-  
ден в табл. 55.

Таблица 55

Режимы сварки отдельных деталей и узлов химической аппаратуры

Вид сварки	Толщина металла, мм	Диаметр электрода, мм	Ток дуги, а	Напряже- ние дуги, в	Скорость сварки, м/ч	Скорость подачи проволо- ки, м/ч
Авто- мати- ческая	10,0	3,0	360—380	30—32	19,5	—
	10,0	4,0	450—470	32—34	22,0	—
Полу- авто- мати- ческая	6,0	2,5	260—300	28—30	—	95,0
Руч- ная	6,0—10,0	4,0	160—180	28—30	—	—

Сварка никелевых патрубков из двух полуобечаек и приварка их к корпусу осуществлялись полуавтоматом ПШ-5 проволокой НП-2 диаметром 2,5 мм.

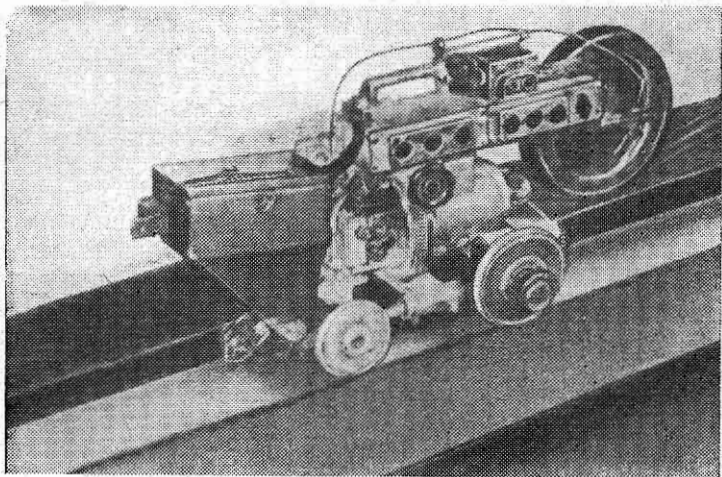
Режим полуавтоматической сварки приведен в табл. 55.

Фланцы из стали Ст. 3 к корпусу аппарата и патрубкам приваривались полуавтоматом с использованием манипулятора Т-22. При сварке никеля со сталью Ст. 3 никелевой проволокой в швах наблюдалось появление горячих трещин. Предварительный подогрев участков сварки до температуры 200—250° С при сварке последующих фланцев значительно уменьшил количество трещин, но полностью не ликвидировал их возникновение. При изготовлении указанной аппаратуры были опробованы аргонодуговая сварка проволокой НМц-2,5, сварка электродами ЭНТУ-3, Н-10 и Н-37, но положительных результатов получить не удалось. Поэтому, с целью минимального проплавления стальной детали для уменьшения доли ее участия в металле шва последняя была облицована наплавкой никелевых валиков. Облицованная стальная деталь затем приваривалась полуавтоматом к никелю никелевой проволокой под флюсом ЖН-1. Выявленные в процессе испытания дефекты вырубались пневматическим зубилом, зачищались до металлического блеска и заваривались электродами «Прогресс-50».

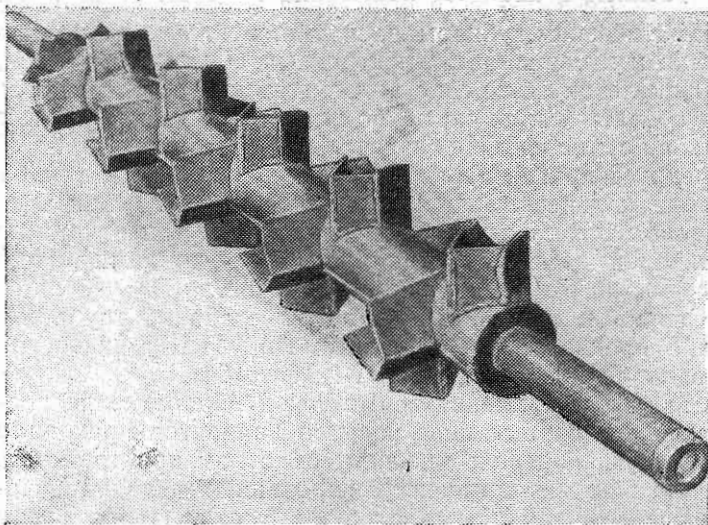
Никелевая облицовка вала мешалки состоит из трех полуобечаек и двух частей по длине. Сварка продольных стыков облицовки производилась автоматом ТС-17М на режиме, приведенном в табл. 55, и показана на фиг. 63. Сварка кольцевого стыка облицовки вала, приварка торцовых никелевых колец, облицовка крышек корпуса и заварка дефектов выполнялись электродами «Прогресс-50» на режиме, приведенном в табл. 55.

Сварка и приварка лопастей к стальной трубе мешалки производились полуавтоматом ПШ-5 никелевой проволокой под флюсом ЖН-1 (фиг. 64).

Сварные соединения термической обработке не подвергались. Сварные швы корпуса аппаратов проходили тщательный контроль внешним осмотром при трехкратном увеличении, рентгенографированием и гидравлическим испытанием под давлением 2 ати. Параллельно с изготовлением корпусов заваривались и испытывались контрольные планки.



**Фиг. 63.** Автоматическая приварка облицовки к стальной трубе вала-мешалки.

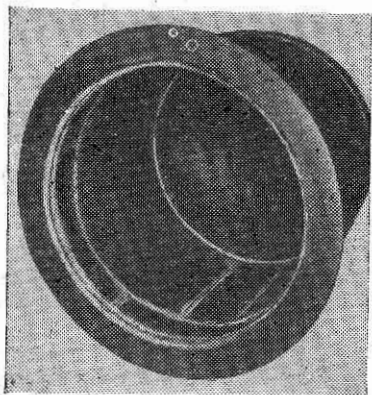


**Фиг. 64.** Сварной вал-мешалка никелевого аппарата.

Результаты механических испытаний образцов показали стабильные и высокие результаты. Мешалки и крышки контролировались визуальным осмотром. Все сварные швы были плотными, без пор, трещин и других дефектов.

Примененные при изготовлении никелевых аппаратов новые методы сварки показали хорошую технологичность, обеспечили высокое качество сварных соединений и позволили заводу снизить себестоимость выпускаемой аппаратуры.

Примером сварочных работ при использовании метода автоматической сварки никеля под керамическим флюсом ЖН-1 может служить изготовление Экспериментальным заводом НИИхиммаша никелевых вакуум-ковшей (фиг. 65). Вакуум-ковш выполняется из никеля марки НП-2 толщиной 10 мм и состоит из корпуса, собранного из двух



Фиг. 65. Никелевый вакуум-ковш.

к нему никелевым фланцем и сферическим днищем. Сварка продольных и кольцевых швов корпуса осуществлялась на медных подкладках в приспособлении, состоящем из роликового кантователя и переносных рельсовых путей для сварочного трактора ТС-17М.

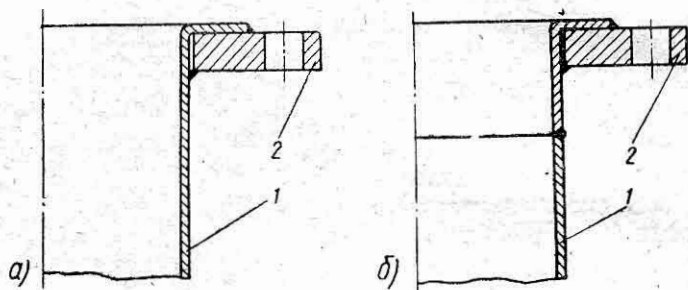
Листовые заготовки днища сваривались на флюсовой подушке, после чего производилась горячая штамповка, обрезка и подготовка кромок. Все сварные соединения выполнялись при X-образной подготовке кромок проволокой НП-2 диаметром 5 мм на режиме, приведенном в табл. 49.

Испытания сварных швов и соединений показали их высокие механические и коррозионные свойства при отсутствии каких-либо дефектов.

Положительное применение новых методов дуговой сварки при изготовлении химической аппаратуры из никеля на упомянутых заводах позволяет рекомендовать их для внедрения в производство на других промышленных предприятиях страны.

## Некоторые особенности изготовления сварных деталей и узлов из никеля

Никелевые конструкции и аппаратура в настоящее время преимущественно изготавливаются с помощью электродуговой сварки. Клепка при изготовлении этих конструкций почти не применяется, так как материал заклепок и кромок в местах чеканки, будучи наклепанным, способствует развитию процесса коррозии.



Фиг. 66. Отбортованные никелевые обечайки со стальными фланцами:

1 — никель; 2 — малоуглеродистая сталь.

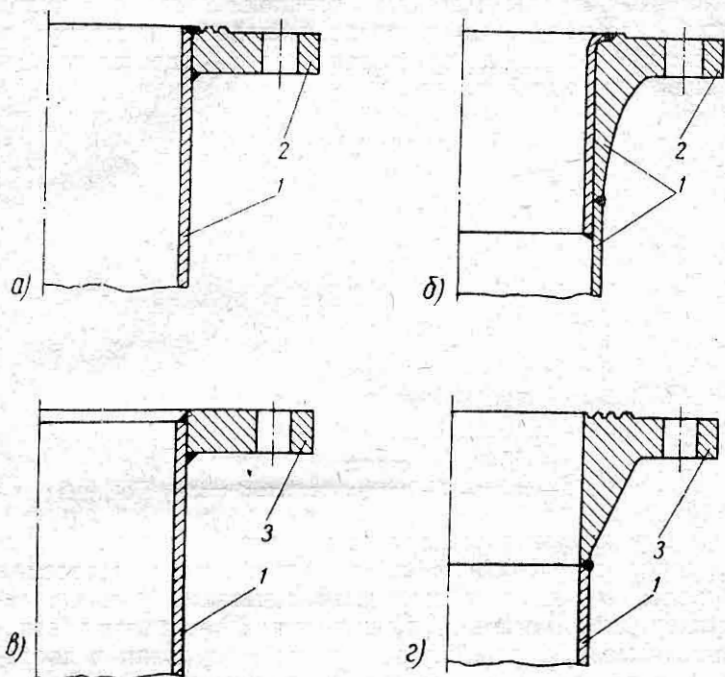
Высокая стоимость и дефицитность никеля вызывает необходимость упрощения конструкции некоторых сварных никелевых узлов и деталей. Так, для деталей и узлов, которые не соприкасаются с коррозионной средой, целесообразно с целью экономии никеля использовать малоуглеродистые или нержавеющей стали. В последнее время находит широкое применение также облицовка стальных деталей тонколистовым (1—3 мм) никелем.

Сочетание разнородных материалов в сварных никелевых узлах и деталях обуславливает их форму и конструкцию, которые нередко отличаются от обычно принятых.

Малоуглеродистая и нержавеющая стали в никелевой аппаратуре в большинстве случаев применяются для изготовления соединительных фланцев, крышек, различных конструкций опор и т. д.

Для аппаратуры, работающей при небольшом давлении и изготовляемой из тонколистового никеля (толщиной до 6 мм), фланцы из малоуглеродистой стали чаще всего крепят к отбортованным обечайкам (фиг. 66, а, б).

При изготовлении аппаратуры из толстолистового никеля (толщиной 10—12 мм) крепление фланцев из малоуглеродистой стали производится без отбортовки



Фиг. 67. Никелевые обечайки со стальными фланцами:  
1 — никель; 2 — малоуглеродистая сталь; 3 — нержавеющая сталь.

обечаек либо непосредственной приваркой фланца (фиг. 67, а), либо с применением приварного воротника из никеля (фиг. 67, б).

В случае изготовления фланцев из нержавеющей стали они привариваются к обечайке, как показано на фиг. 67, в, г.

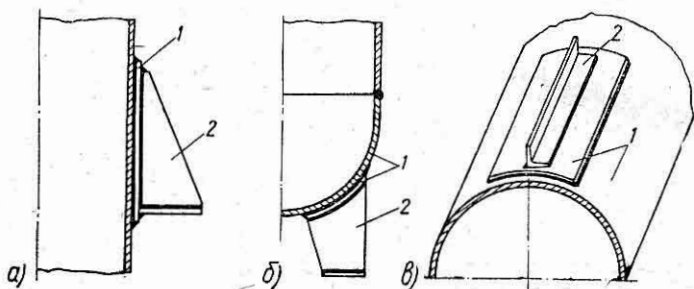
Фланцы к сферическим днищам привариваются по тому же методу, что и к обечайкам.

Опоры и элементы жесткости никелевых аппаратов изготавливаются в сочетании малоуглеродистых сталей с никелем, как показано на фиг. 68, а, б, в.

Валы центрифуг, мешалок и т. п. в целях экономии никеля изготавливают из малоуглеродистых сталей с после-

дующей облицовкой тонколистовым (толщиной 1—3 мм) никелем.

В химической промышленности широкое применение находят аппараты с двойной стенкой. В таких случаях чаще всего наружная стенка изготавливается из малоуглеродистой стали и непосредственно приваривается к внутренней никелевой стенке.



Фиг. 68. Конструкция лап и опор из малоуглеродистой стали:

1 — никель; 2 — малоуглеродистая сталь.

В целях экономии дорогостоящего никеля необходимо шире применять в химическом аппаратостроении двухслойные металлы (например, сочетание никеля с малоуглеродистой сталью). Применение биметаллов обеспечивает высокую устойчивость против коррозии и достаточную прочность и долговечность конструкции в процессе эксплуатации.

В большинстве случаев двухслойные металлы свариваются дуговой электросваркой. Применение газовой сварки не рационально, так как может привести к изменению структуры биметалла.

Разделка кромок под сварку двухслойного металла выполняется с притуплением 1,5—3 мм со стороны стали и углом раскрытия кромок, равным 60—70° (фиг. 69, а).

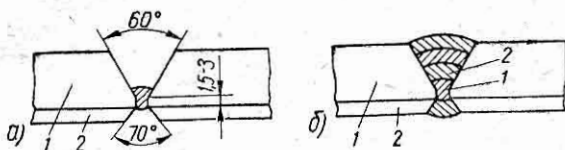
Перед сваркой кромки тщательно зачищаются и прихватываются со стороны стали. Наложение сварных швов на двухслойном металле производится в следующем порядке: сначала накладывается сварной шов со стороны стали, после чего осуществляется многослойная заварка стыка в последовательности, показанной на фиг. 69, б.

После наложения каждого слоя швы тщательно за-



чищаются металлической щеткой. Сварка двухслойного металла производится на постоянном токе обратной полярности.

Сварка биметалла со стороны стали осуществляется электродами УОНИИ 13/55 или под флюсом АН-348А. Со стороны никеля сварка производится электродами «Прогресс-50» или же под флюсом ЖН-1.



Фиг. 69. Разделка кромок и порядок сварки двухслойного металла:

1 — никель; 2 — малоуглеродистая сталь.

Наряду с применением двухслойных металлов рациональным, по нашему мнению, является использование в некоторых случаях различных пластмасс.

При конструировании химической аппаратуры, отдельных узлов и деталей необходимо выбирать конструкционный материал не только по его технологическим свойствам, но исходя также из экономической целесообразности. Указанное мероприятие значительно сократит расход никеля, снизит стоимость продукции и обеспечит народному хозяйству страны экономию денежных средств.

### Техника безопасности и гигиена труда при электродуговой сварке никеля

Одним из самых важных требований к любому виду производства в условиях социалистического общества является создание наиболее легких, гигиенических и безопасных условий труда для рабочих.

Забота о сохранении здоровья и работоспособности трудящихся является в Советском Союзе общегосударственным делом.

Соблюдение нормальных условий труда на любом предприятии нашей страны гарантируется законом и находится под неослабным контролем «Государственной санитарной инспекции СССР», профсоюзных и других общественных организаций.

Электродуговая сварка является весьма прогрессивным технологическим процессом, не только с точки зрения повышения производительности труда и улучшения качества продукции; применение сварки позволяет также значительно облегчить и улучшить условия работы трудящихся.

Переход с клепки на сварку стальных конструкций устранил тяжелый и страшно вредный труд котельщиков, приводивший, как правило, к глухоте и поражению нервной системы. С переходом на сварку значительно снизился травматизм среди рабочих.

Вместе с тем электродуговая сварка имеет свои особые свойства, свои специфические элементы вредности, о которых всегда необходимо помнить при выполнении сварочных работ.

Следует иметь в виду, что при соблюдении мер предосторожности и санитарно-гигиенических требований электросварка является совершенно безвредным и безопасным видом работы [65].

С точки зрения техники безопасности электродуговая сварка никеля мало чем отличается от дуговой сварки стали и потому при изготовлении никелевых, так же как и стальных, конструкций необходимо строго соблюдать все меры, предусмотренные «Правилами техники безопасности и производственной санитарии при электросварочных работах» [66].

Как в одном, так и в другом случае сварщик должен предохранить себя от поражения электрическим током, от облучения ультрафиолетовыми и инфракрасными лучами, от ожогов брызгами расплавленного металла и т. п. Для предупреждения поражений током сварщиков необходимо принимать следующие наиболее важные меры:

1) подключение и отключение сварочных трансформаторов, генераторов и других источников тока к сети высокого напряжения, а также их ремонт должен производиться только специалистами-электриками. Выполнение указанных работ сварщиками без специального на то разрешения запрещается;

2) все токоведущие части сварочных машин и установок, особенно со стороны высокого напряжения, должны быть надежно изолированы, а корпуса установок и машин заземлены;

3) должны быть приняты меры индивидуальной защиты сварщиков от поражения током, особенно при сварке внутри труб, котлов, а также в сырых помещениях. Сварщики должны иметь брезентовый костюм, прочные непромокающие ботинки, сухие брезентовые или прорезиненные рукавицы, резиновые подкладные коврики в соответствии с правилами [66].

Для защиты глаз и кожи лица сварщиков от излучения дуги совершенно необходимо использовать шлемы, маски или защитные щитки с темными стеклами разной степени плотности (ЭС-300, ЭС-400, ЭС-500). Кожа рук и других частей тела надежно предохраняется брезентовым костюмом и рукавицами. Не следует забывать при этом о возможности поражения излучением дуги рабочих других профессий, работающих на том же или смежном участке. В этом случае целесообразно применять стационарные или переносные щиты.

Более подробные сведения по вопросам техники безопасности при электросварочных работах приведены в специальной литературе [65, 66, 67, 68] и др.

В процессе сварки в электросварочной дуге выделяется большое количество мельчайшей пыли и газов, составляющих так называемый сварочный факел.

Вследствие малых размеров твердые частички пыли длительное время находятся в воздухе во взвешенном состоянии и в смеси с выделяющимися в дуге газами образуют аэрозоль.

Вредность аэрозоля для здоровья сварщика зависит главным образом от состава покрытия электродов, применяющихся флюсов, состава основного и присадочного металлов, а также ряда других причин, например от параметров режима сварки и т. п.

В состав электродных покрытий по причине технологической необходимости наряду с совершенно безвредными компонентами иногда вводятся вещества оказывающие вредное влияние на организм сварщика. К числу таких наиболее токсических веществ относятся соединения марганца, фтора, кремния. Окислы марганца могут воздействовать на здоровье сварщика, вызывая необратимые нарушения нервной деятельности.

Фтористые соединения, такие как  $\text{HF}$ ,  $\text{SiF}_4$  и другие, оказывают раздражающее действие на слизистую оболочку дыхательных путей.

Окислы кремния являются одной из главных составляющих сварочной пыли и вместе с окислами железа при весьма длительном вдыхании вызывают специфическое заболевание легких — пневмокониоз.

В состав сварочных флюсов и покрытий электродов, применяющихся при сварке никеля и его сплавов, обычно входят марганец и плавиковый шпат, являющийся источником фтористого водорода. Количество марганца удается свести к минимально возможному, тогда как содержание фтористых соединений в покрытиях и флюсах остается довольно высоким.

Для оценки степени вредности флюсов и электродных покрытий при сварке никеля были произведены анализы проб воздуха и вблизи дуги и на некотором от нее расстоянии по содержанию в воздухе пыли, фтористых и марганцовистых соединений. Эксперименты производились в одинаковых условиях для различных электродов и флюсов, например при отсутствии вентиляции, в комнате с маленькой кубатурой и т. д. Эти испытания имели своей целью сравнить новые, разработанные для сварки никеля электроды и флюсы: «Прогресс-50» и ЖН-1 по их санитарно-гигиеническим свойствам с широко известными и давно применяющимися электродами и флюсами для сварки стали, такими как УОНИИ-13/55, ЦМ-7, ОСЦ-45. Результаты экспериментов приведены в табл. 56.

Исследованиями установлено, что при использовании электродов ЦМ-7, а также флюса ОСЦ-45 сильно загрязняется атмосфера пылью и окислами марганца, в то же время электроды типа УОНИИ считаются наиболее безвредными из числа применяющихся в Советском Союзе. Поэтому сравнение новых сварочных материалов с применяющимися позволяет сделать следующие выводы:

1. Санитарно-гигиенические условия при сварке никеля электродами «Прогресс-50» вполне удовлетворительные. В этом отношении электроды «Прогресс-50» значительно лучше электродов ЦМ-7 и приближаются к электродам УОНИИ-13/55.

2. При автосварке никеля под флюсом ЖН-1 санитарно-гигиенические условия такие же, а по соединениям марганца лучшие, чем при сварке стали под флюсом ОСЦ-45.

3. При всех случаях сварки никеля рекомендуется применять общую или местную вытяжную вентиляцию.

## Загрязненность воздуха при различных видах сварки

Способ сварки и условия эксперимента	Пыль	MnO <sub>2</sub>	HF
	норма, мг/м <sup>3</sup>		
	4,0	0,3	1,0
Электросварка электродами марки ЦМ-7, проба взята под маской	10,0	0,3	—
То же, электродами марки УОНИИ-13/55	4,1	0,09	—
То же, при сварке никеля электродами «Прогресс-50»	5,0	0,2	1,5
Электросварка электродами марки ЦМ-7, проба взята под щитком	20,0	0,5	—
То же, электродами УОНИИ-13/55	8,3	0,04	—
То же, при сварке никеля электродами «Прогресс-50»	10,7	0,3	2,3
Электросварка электродами марки ЦМ-7, проба взята за щитком на уровне дыхания сварщика с двух сторон:			
слева	66,6	3	—
справа	26,6	0,5	—
То же, электродами УОНИИ-13/55:			
слева	10,0	0,2	—
справа	5,0	0,06	—
То же, при сварке никеля электродами «Прогресс-50»:			
слева	15,1	0,4	7
справа	5,0	0,1	0,5
Электросварка электродами марки ЦМ-7, проба взята на расстоянии 1 м от дуги с двух сторон:			
слева	11,6	0,8	—
справа	10,0	0,3	—
То же, электродами УОНИИ-13/55:			
слева	13,3	0,08	—
справа	5,0	0,04	—
То же, при сварке никеля электродами «Прогресс-50»:			
слева	12,0	0,5	1,0
справа	8,3	0,09	0,9
Электродуговая автосварка под флюсом ОСЦ-45, проба взята на уровне дыхания сварщика	—	0,46	1,3
То же, при автосварке никеля под флюсом ЖН-1	—	0,25	1,6
Электродуговая автосварка под флюсом ОСЦ-45, проба взята на расстоянии 1 м от дуги:			
слева	—	0,17	0,6
справа	—	0,28	0,6
То же, при автосварке никеля под флюсом ЖН-1:			
слева	—	0,19	0,75
справа	—	0,09	1,3

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В развитии способов сварки плавлением цветных, редких металлов и специальных сплавов в настоящее время наметились две основные тенденции:

1. Совершенствование защиты сварочной зоны от воздействия газов окружающей атмосферы при сравнительно малой металлургической обработке металла шва.

2. Сознательное регулирование физико-химических процессов в сварочной зоне, определяющих металлургию и, в конечном счете, результат сварки.

Типичными представителями технологических процессов первого направления являются сварка в среде аргона, дуговая сварка в контролируемой атмосфере, сварка электронным лучом в вакууме и другие.

Так, например, при электронно-лучевой сварке в вакуум-камерах создаются идеальные условия для предотвращения контакта с вредными газами.

Естественно, что в таких условиях удастся избежать значительного насыщения металла шва газами даже при сварке весьма активных металлов, таких как Мо, Та, Zr, Ti и др.

Более того, в ряде случаев электронно-лучевой переплав металла в вакууме позволяет уменьшить содержание вредных примесей в металле и улучшить его качество.

Электронно-лучевая, аргонодуговая и другие способы сварки этого направления имеют также и недостатки, к числу которых следует отнести усложнение технологических приемов, сужение технических возможностей, высокую стоимость защитных газов и т. п.

Всеми технологическими процессами, отнесенными нами условно к первому направлению, выполняется большое количество самых ответственных сварочных работ и обеспечивается высокое качество сварных соединений. Вследствие этого прогрессивность и дальнейшее развитие способов первого направления не вызывает никаких сомнений.

Типичными представителями технологических процессов, основанных на управлении металлургическими процессами, являются способы дуговой сварки с применением активных керамических флюсов и электродных покрытий.

Это направление пока еще развивается недостаточно. Возможности металлургического воздействия на металл в процессе сварки используются далеко не полностью.

На основании опыта работы по применению керамических флюсов для сварки специальных сталей, выполнению наплавочных работ, по сварке меди, никеля, других металлов и сплавов авторы пришли к твердому убеждению, что многие из металлов, считающихся в настоящее время трудносвариваемыми и требующие применения дорогих и сложных приемов сварки, могут гораздо проще и удобней свариваться дуговой сваркой под специальными керамическими флюсами.

В наиболее трудных случаях сварки, по нашему мнению, целесообразно сочетать оба направления, т. е. совершенную защиту сварочной зоны с активным металлургическим воздействием на металл шва.

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Славинский М. П.* Физико-химические свойства элементов. Металлургиздат, 1952.
2. *Корнилов И. И.* Никель и его сплавы. Издательство АН СССР, 1958.
3. Справочник по машиностроительным материалам, т. 2. Машгиз, 1959.
4. *Смирязин А. П.* Промышленные цветные металлы и сплавы. Metallurgizdat, 1956.
5. *Мальцев М. В., Барсукова Т. А., Борин Ф. А.* Металлография цветных металлов и сплавов. Metallurgizdat, 1960.
6. *Хренов К. К.* Сварка, резка и пайка металлов. Машгиз, 1959.
7. *Шрон Р. З.* Сварка цветных металлов. Машгиз, 1960.
8. *G. R. Pease.* The practical welding metallurgy of Nickel and High—Nickel alloys. Welding Journal, № 7, 1957.
9. *Цейдлер А. А.* Металлургия никеля. Metallurgizdat, 1947.
10. *Чижиков Д. М.* Металлургия тяжелых цветных металлов. Издательство АН СССР, 1948.
11. *Смирнов В. И.* Металлургия никеля. Metallurgizdat, 1950.
12. *Липецкий И. А.* Изменение металлов при сварке. Машгиз, 1956.
13. Справочник по сварке, под редакцией Е. В. Соколова, т. 1. Машгиз, 1960.
14. *Погодин-Алексеев Г. И.* Теория сварочных процессов. Машгиз, 1950.
15. *Дятлов В. И.* Особенности металлургических процессов при сварке под флюсом. Юбилейный сборник, посвященный Е. О. Патону. АН УССР, 1951.
16. *Фрумин И. И.* Автоматическая электродуговая наплавка. Metallurgizdat, 1961.
17. *Мерфи А. Дж.* Плавка и литье цветных металлов и сплавов. Издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1959.
18. *Багрянский К. В., Кузьмин Г. С.* Керамический флюс ЖН-1 для автоматической и полуавтоматической дуговой сварки никеля. «Автоматическая сварка», № 5, 1961.
19. *Хренов К. К., Кушнеров Д. М.* Керамические флюсы для автоматической дуговой сварки. Гостехиздат УССР, 1954.
20. *Хренов К. К., Кушнеров Д. М.* Керамические флюсы для автоматической сварки и наплавки. Гостехиздат УССР, 1961.
21. *Ростовцев С. Т.* Теория металлургических процессов. Metallurgizdat, 1956.
22. *Кубашевский О., Эванс Э.* Термохимия в металлургии. Изд-во иностранной литературы, 1954.



23. *Доброхотов Н. Н.* Применение термодинамики в металлургии, Издательство АН УССР, 1955.
24. *Струсельба М. М., Зоткин В. Е.* Физико-химическое исследование реакций сталеплавильного процесса. Издательство академии артиллерийских наук, 1951.
25. *Кассов Д. С.* Некоторые металлургические процессы, протекающие при сварке меди под плавленными флюсами. Сборник Донецкого НТО ЧМ, № 8, 1958.
26. *Мовчан Б. А.* Полигонизация литых металлов. Известия АН СССР, ОТН, № 10, 1958.
27. *Медозар Б.И.* Сварка хромоникелевых аустенитных сталей. Машгиз, 1958.
28. *Любавский К. В., Пашуканис Ф. И.* Некоторые особенности сварки литых аустенитных сталей. «Сварочное производство», № 9, 1955.
29. *Багрянский К. В., Кузьмин Г. С., Кассов Д. С.* Автоматическая сварка технически чистого никеля под керамическим флюсом. «Сварочное производство», № 11, 1959.
30. *R. S. Zena, H. L. Leslie,* The inert ore welding of thinwalled tubing, The Welding Journal, № 11, 1951.
31. *Медовар Б. И., Латаш Ю. В.* Влияние водорода и кислорода на образование пор при сварке стабильноаустенитных сталей и никеля. «Автоматическая сварка», № 1, 1957.
32. *W. G. Lepkowski, R. E. Monroe, P. G. Rieppel,* Studies on Repair Welding Age — Hardenable Nickel — Base Alloys, Welding Journal, № 9, 1960.
33. НИИхиммаш. Сварка в химическом машиностроении. Отраслевая нормаль ОН 12-20-59 М, 1960.
34. *Клебанов Н. Н.* Технология газовой сварки и резки металлов. Машгиз, 1947.
35. *Глиманенко Д. Л., Евсеев Г. Б.* Газовая сварка и резка металлов, Машгиз, 1954.
36. Справочник рабочего-сварщика. Машгиз, 1961.
37. *Рабкин Д. М., Гуревич С. М., Бугрий Ф. С.* Сварка цветных металлов. Машгиз, 1959.
38. *Давыденко И. Д.* Справочник по сварочным электродам. Ростовское книжное издательство, 1961.
39. *Друскин М. С.* Сварка заготовок уплотнительных колец из ковкого никеля. Техническая информация, «Металлургия», № 6, 1959.
40. *Петров Г. Л., Корнилов В. И.* Сварка никеля и монель-металла. Сварочное производство. Труды ЛПИ, № 189, 1957.
41. *Багрянский К. В., Кузьмин Г. С., Павлюк С. К.* Новые электроды для ручной дуговой сварки никеля. «Сварочное производство», № 4, 1961.
42. *Хренов К. К.* Электрическая сварочная дуга. Машгиз, 1949.
43. *Казеннов Ю. И., Носов А. В.* Сварка никелекремнистого сплава, «Передовой научно-технический и производственный опыт», № М-58-385/28, М., 1959.
44. Справочник электросварщика, III издание. Машгиз, 1961
45. *Гельман А. С.* Контактная электросварка. Машгиз, 1949.
46. *Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В.* Металловедение сварки. Машгиз, 1954.
47. *Лайнер В. И.* Травление цветных металлов и сплавов. «Цветные металлы», № 6, 27, 1944.

48. Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В. Пайка металлов. Машгиз, 1959.
49. Лакедомонский А. В., Хряпин В. Е. Справочник паяльщика. Машгиз, 1959.
50. H. A. Saller, G. I. Stacy, H. L. Klebanow, Braging nichrome V. with LE-81 alloy, Unated States Atomic Energy Commission BMG-947, August 27, 1954; BMG-933, August, 2, 1954.
51. Goining Nimonic, Aircraft Production, 12, 143, 265, 1950.
52. Хренов К. К., Кушнерев Д. М. Механизированный способ гранулирования керамических флюсов. «Сварочное производство», № 9, 1957.
53. Прохоров Н. Н. Горячие трещины при сварке. Машгиз, 1952.
54. Багрянский К. В. Исследование упруго-пластических деформаций в шве в процессе сварки. Сборник МВТУ им. Баумана, Машгиз, 1955.
55. W. D. Genkins, Th. G. Digges, G. of Res. of the Nat Bureau of Stand, v. 48, № 4, 1952.
56. W. D. Genkins, Th. G. Digges, C. R. Gohnson, G. of Res, of the Nat Bureau of Stand, v. 53, № 6, 1954.
57. Багрянский К. В. К вопросу о возникновении горячих трещин при сварке. Сборник трудов Ждановского металлургического института, № 3, 1955.
58. Мовчан Б. А. О причинах и механизме горячих трещин в сварных швах с однофазной аустенитной структурой, «Автоматическая сварка», № 6, 1959.
59. Медовар Б. И. К вопросу о природе кристаллизационных трещин при сварке аустенитных сталей и сплавов. «Автоматическая сварка», № 8, 1959.
60. Медовар Б. И., Латаш Ю. В. Влияние водорода и кислорода на образование пор при сварке стабильноаустенитных сталей и никеля, «Автоматическая сварка», № 1, 1957.
61. Кушнерев Д. М. О стойкости швов против образования пор, вызываемых ржавчиной при сварке под керамическим флюсом. «Автоматическая сварка», № 4, 1959.
62. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. Машгиз, 1951.
63. Рабкин Д. М. Энергетическое исследование приэлектродных областей мощной сварочной дуги, «Автоматическая сварка», № 2, 1951.
64. Погодин-Алексеев Г. И., Назаров С. Т., Гапченко М. Н. Методы испытаний сварных соединений и конструкций. Машгиз, 1952.
65. Воронцова Е. И. Гигиена труда электросварщика. Медгиз, 1960.
66. Правила техники безопасности и производственной санитарии при электросварочных работах. Машгиз, 1960.
67. Абдуллаев М. К. Техника безопасности при сварке металлов. Профиздат, 1954.
68. Мигай К. В. Оздоровление условий труда электросварщиков. Судпромгиз, 1960.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Предисловие</i> . . . . .	3
<i>I. Свойства никеля и его сплавов</i> . . . . .	5
Физические свойства никеля . . . . .	5
Механические свойства никеля . . . . .	7
Химические свойства никеля . . . . .	15
Сплавы никеля . . . . .	19
Влияние примесей на свойства никеля и его сплавов . . . . .	22
Влияние газов на свойства никеля и его сплавов . . . . .	29
Обработка никеля . . . . .	33
<i>II. Особенности металлургических процессов при дуговой сварке никеля и его сплавов</i> . . . . .	35
Некоторые особенности процесса электродуговой сварки плавлением . . . . .	35
Металлургические процессы при электродуговой сварке никеля . . . . .	41
Химический состав и структура сварных швов технического никеля . . . . .	58
<i>III. Способы сварки и пайки никеля и его сплавов</i> . . . . .	68
Аргонодуговая сварка никеля . . . . .	68
Газовая сварка никеля . . . . .	70
Ручная дуговая сварка никеля . . . . .	73
Сварка никеля электродами Н-10 . . . . .	73
Сварка никеля электродами Н-37 . . . . .	75
Сварка никеля электродами 48-Нк-1 . . . . .	77
Сварка никеля электродами «Прогресс-50» . . . . .	79
Сварка никелекремнистого сплава . . . . .	84
Сварка нихрома и никелемолибденового сплава . . . . .	86
Сварка медноникелевых сплавов . . . . .	87
Контактная сварка никеля и его сплавов . . . . .	88
Пайка никеля и его сплавов . . . . .	89
<i>IV. Автоматическая и полуавтоматическая электродуговая сварка никеля</i> . . . . .	95
Автоматическая сварка никеля под стандартными плав- ленными флюсами . . . . .	95
Керамический флюс ЖН-1 для автоматической и полу- автоматической сварки никеля . . . . .	97
Автоматическая и полуавтоматическая сварка никеля с малоуглеродистой сталью под флюсом ЖН-1 . . . . .	108
Технология изготовления керамического флюса ЖН-1 . . . . .	112

V. Дефекты швов и контроль качества сварных соединений из никеля . . . . .	118
Трещины при сварке технически чистого никеля . . .	118
Поры в сварных соединениях из никеля и способы их предупреждения . . . . .	129
Некоторые особенности контроля качества сварных соединений из никеля . . . . .	138
VI. Примеры выполнения сварных конструкций из никеля . .	142
Промышленное использование новых методов сварки никеля . . . . .	142
Некоторые особенности изготовления сварных деталей и узлов из никеля . . . . .	150
Техника безопасности и гигиена труда при электродуговой сварке никеля . . . . .	153
Заключение . . . . .	158
Литература . . . . .	160

*Багрянский Константин Владимирович, Кузьмин Геннадий Сергеевич*  
**Сварка никеля и его сплавов**

Редактор *К. В. Синтовский*. Техн. редактор *М. С. Горностайпольская*.  
 Корректоры *Л. П. Комарова, Р. С. Коган*

Подписано к печати 29.VI 1963 г. Формат 84×108/32. Физ. печ. л. 5,125  
 Усл. печ. л. 8,4. Уч.-изд. л. 9,07, Т08089. Тираж 6000. Цена 55 коп.  
 Зак. № 2202.

Харьковская типография Госгортехиздата, Харьков, ул. Энгельса, 11.