

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»  
(наименование)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Производство и ремонт сварных конструкций газонефтехимического  
оборудования

(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

на тему Технология и оборудование сварки реторты  
для высокотемпературной обработки сыпучих материалов

Обучающийся

В.К. Петрушов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

д.т.н. профессор В.В. Ельцов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2024

## Содержание

Введение.....	4
1 Анализ конструкции высокотемпературной обработки .....	6
1.1. Особенности конструкции реторты и условий ее эксплуатации .....	6
1.2. Контроль качества сварных соединений реторты .....	8
1.3 Анализ и свойства основного материала сплава 10ХН45Ю.....	9
1.4 Технология сварки и анализ свойств сварных соединений .....	11
1.5 Анализ способов получения неразъемных соединений из сплава 10ХН45Ю.....	14
1.5.1 Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом в защитном газе .....	16
1.5.2 Сварка ручная дуговая покрытыми электродами.....	20
1.5.3 Газовая сварка .....	23
1.5.4. Сварка неплавящимся электродом сжатой дугой в защитном газе .....	25
1.5.5 Дуговая сварка плавящимся электродом в инертном газе.....	26
2 Сварка образцов .....	28
2.1 Выбор оптимальных режимов сварки.....	28
2.2 Контроль качества сварных образцов .....	33
2.3 Термическая обработка варианта 2 .....	34
3 Методика изготовления и исследования образцов .....	37
3.1 Методика изготовления и исследования сварных образцов на макроструктуру .....	37
3.2 Методика изготовления и исследования сварных образцов на микроструктуру.....	39

3.3	Методика изготовления и исследования сварных образцов на микротвердость .....	41
3.4	Методика изготовления и исследования сварных образцов на стойкость против к МКК.....	43
3.6	Методика изготовления и исследования сварных образцов на СФФ.. .....	47
4	Результаты исследований сварных образцов.....	50
4.1	Результаты исследований сварных образцов на макроструктуру....	50
4.2	Результаты исследований сварных образцов на микроструктуру ...	54
4.3	Результаты исследований сварных образцов на микротвердость....	58
4.4	Результаты исследований сварных образцов на стойкость против к МКК .....	63
4.5	Результаты исследований сварных образцов на определение СФФ	66
	Заключение .....	69
	Список используемых источников.....	71

## Введение

Учитывая наиболее важные направления и передовые технологии развития науки, технологии и техники в Российской Федерации (РФ) жаропрочные и жаростойкие никелевые сплавы входят в список первостепенных стратегических направлений развития материалов и технологий. Анализ развития науки за рубежом показывает, что в мире активно прогрессирует и продолжит свое развитие в будущем среди других материалов литейные и деформируемые жаропрочные никелевые сплавы. Их условия работы характеризуются длительным воздействием агрессивных сред и нагрузок под влиянием высоких температур. Эти материалы, с улучшенными служебными характеристиками, необходимы для создания изделий авиационной, космической и все чаще атомной техники нового поколения.

В настоящее время при проведении НИОКР все чаще возникает необходимость обработки сыпучих продуктов в газовых средах различного состава при температурах, достигающих 1000°C и выше, что подразумевает использование жаропрочных и жаростойких сплавов на хромоникелевой основе. Применение обычных сталей в данном случае не представляется возможным ввиду потери ими коррозионной стойкости, механических свойств и прочностных характеристик.

Недостатком жаропрочных сплавов на никелевой основе является их ограниченная свариваемость и, соответственно, необходимость разработки и подтверждения технологии сварки для каждого применяемого материала.

В гонке за экономической выгодой предприятия все чаще используют основные и сварочные материалы, зачастую отсутствующие в нормативной документации на изготовление оборудования, а также импортного производства.

Данная проблема является предметом ряда публикаций, в том числе иностранных ученых, в которых объектом исследований служат жаропрочные и жаростойкие сплавы на никелевой основе [39].

Точный импортный аналог сплава 10ХН45Ю отсутствует. Имеется ряд других импортных материалов NiCr20Ti, GH2747, но они намного ниже своими технологическими характеристиками таких, как например сопротивление коррозии и износостойкости при повышенных температурах в течение длительного времени, окалиностойкость, стойкость к разрушению поверхности в различных агрессивных средах. Отличие особенно проявляется при эксплуатации в агрессивных средах при повышенной температуре

К настоящему времени оценка качества сварных соединений сплава на основе никеля 10ХН45Ю, выполненных аргонодуговой сваркой, проводилась недостаточно полно, чтобы рекомендовать этот способ для сварных соединений, работающих в агрессивных средах.

Данный сплав не внесен в число допущенных нормативной документацией для выполнения сварных соединений оборудования для атомной энергетики и оценка качества сварных соединений сплавов на основе никеля, выполненных аргонодуговой сваркой, проводилась не достаточно полно, чтобы рекомендовать этот способ для сварных соединений, работающих в агрессивных средах при высоких температурах. Дальнейшие испытания оборудования позволят рекомендовать данный сплав для обсуждения вопроса о работах по обоснованию внесения данного сплава в нормативную документацию.

Целью работы является повышения качества сварных соединений путем сравнительной оценки качества сварного соединения из сплава 10ХН45Ю, выполненного с последующей термической обработкой (ТО) и без нее, ручной аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом на примере сварки реторты для высокотемпературной обработки сыпучих продуктов.

# 1 Анализ конструкции высокотемпературной обработки

## 1.1. Особенности конструкции реторты и условий ее эксплуатации

Реторта для обработки сыпучих продуктов показана на рисунке 1. Все детали реторты изготавливаются из жаропрочного и жаростойкого никелевого сплава 10ХН45Ю ГОСТ 5632–2014[8]. Сварные соединения работают при температуре  $900 \pm 50$  °С в течение  $48 \pm 8$  часов и должны быть герметичны по требованиям конструкции.

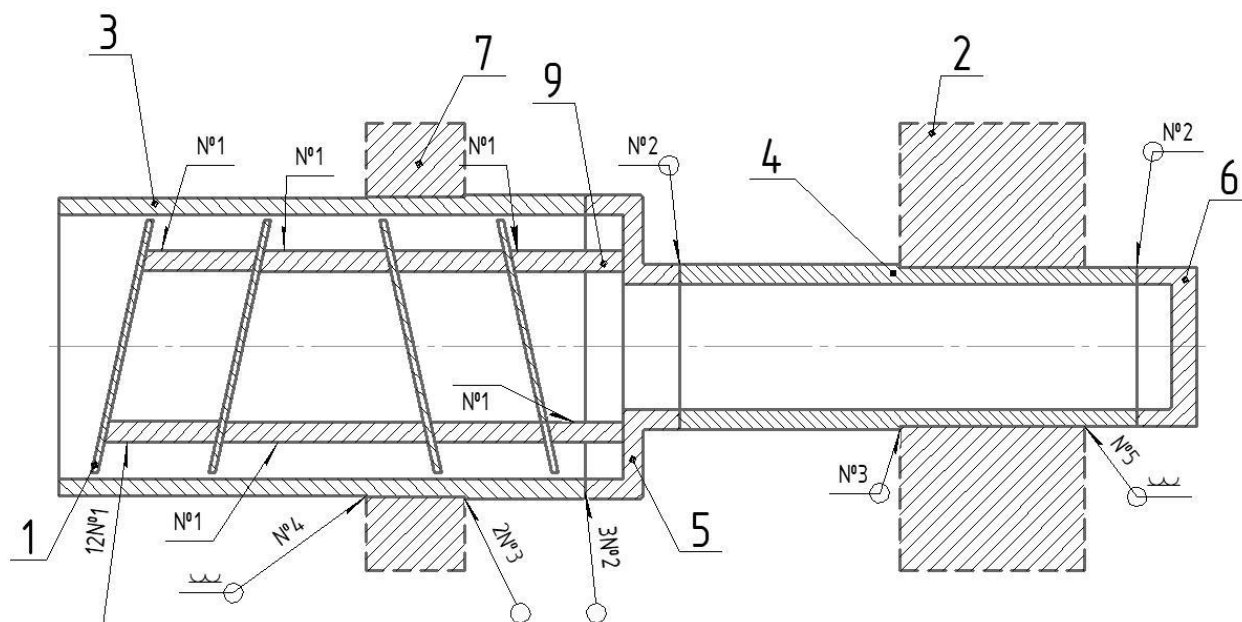


Рисунок 1 – Реторта

Корпус реторты и шнековая часть, представленный на рисунке 1, состоит из:

1. Перо шнека – шнековая часть, выполнено из сплава 10ХН45Ю;
2. Ступица задняя – приводная часть, выполнена из сплава 10ХН45Ю;
3. Труба – корпус реторты сплав 10ХН45Ю;
4. Труба – корпус реторты сплав 10ХН45Ю;



термического нагрева. Позиции 3, 4, 5, 6 свариваются между собой стыковым сварным соединением. Зона термического нагрева 500 мм, начиная от стенки позиции 5 рисунка 2. Сварное соединение №2, которое находится в зоне термического нагрева между позициями 5 и 3 влияет на герметичность и радиационную опасность при разрушении. Данное сварное соединение взято для оценки в данной работе.

## 1.2. Контроль качества сварных соединений реторты

Сварные соединения реторты различны по толщине основного материала и по типу сварных швов, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Сварные соединения реторты

Номер сварного соединения	Толщины свариваемых деталей s и s <sub>1</sub> , мм	Сварное соединения по типу	Протяжённость сварного шва, мм	Объем наплавленного металла*, см <sup>3</sup>
№1	s=16	ТЗ	800	11
	s <sub>1</sub> =8			
№2	s=16	С17	1600	392,2
	s=16			
№3	s=9	Н1	2400	219,84
	s <sub>1</sub> =16			
№4	s=4	С17	400	8,84
	s <sub>1</sub> =4			
№5	s=4	ТЗ	2240	200,7
	s <sub>1</sub> =8			
Примечание – без учета выгорания металла и отдельных элементов				

Контроль качества сварных соединений реторты проводился по ОСТ 95 39-2002 [30], представленный в таблице 2.



Таблица 2 – Контроль качества сварных соединений реторты

Номер сварного соединения	Сварное соединение по типу	Наименование операции						
		Визуальный контроль	Измерительный контроль	Радиографический контроль	Контроль герметичности	Испытание на прочность	Вакуумметрические испытания	Капиллярный контроль Примечание
№1	T3	+	+	-	-	+	+	+
№2	C17	+	+	+	+	+	+	+
№3	H1	+	+	-	-	+	+	+
№4	C17	+	+	+	-	-	+	+
№5	T3	+	+	-	-	+	+	+
Примечание: Визуальный и измерительный контроль по ГОСТ Р 50.05.08-2018 [15]. Радиографический контроль по ОСТ 95 39-2002, ГОСТ Р 50.05.08-2018 [14] Класс герметичности V по ГОСТ Р 50.05.01-2018 [15]. Испытание на прочность пробным давлением 0,125, время выдержки не менее 10 мин. Течи, подпотевания и остаточные деформации не допускаются. Испытания при температуре 900 °С на устойчивость рабочим вакуумметрическим давлением 50 КПа. Капиллярный контроль проводить в соответствии с ГОСТ Р 50.05.09 [16], класс чувствительности II –100 %								

Нормы оценки качества сварных соединений приведенных в таблице 2 в соответствии II категории [30].

### 1.3 Анализ и свойства основного материала сплава 10ХН45Ю

Сплав 10ХН45Ю – это жаропрочный сплав на железоникелевой основе, поэтому основными элементами в составе считаются железо и никель, а также легирующие добавки – хром, алюминий, марганец.

Легированный сплав Al повышает его прочность, окалиностойкость и способность противостоять трещинообразованию. Al также обеспечивает стойкость поверхности к образованию царапин и вмятин. Легированный сплав Mn повышает прочность, а Cr и Ni увеличивают стойкость к коррозионному разрушению, и повышают жаропрочность.

Химический состав сплава 10ХН45Ю основного конструкционного материала указан в таблице 3.

Таблица 3 Типичный «химический состав сплава 10ХН45Ю» в % [20]

Fe	Si	Mn	Ce	Al	Ni	P	C	C	S	Ba
30,825 - 38,1	< 1	< 1	<0,03	2,9-3,9	44 - 46	< 0,025	< 0,1	15-17	< 0,02	< 0,1

Фактически химический состав был получен с помощью портативного многоосновного оптико-эмиссионного анализатора химического состава металлов и сплавов PMI-MASTER UVR, показанный в таблице 4.

Таблица 4 – Химический состав сплава 10ХН45Ю в %

Fe	Si	Mn	C	Cr	Mo	Ni	W	Al	Nb	V	Co	Cu	S	Ti	Pb
37,8	0,375	0,593	0,195	16,6	0,125	41,3	0,05	1,50	0,0729	0,108	0,05	0,0087	0,015	0,0229	0,025

Справочные механические свойства приведены в таблице 5.

Таблица 5 Типичные механические свойства сплава 10ХН45Ю [20]

$t_{исп}, ^\circ C$	$\sigma_B, Н/мм^2$	$\sigma_{0,2}, Н/мм^2$	$\delta_5, \%$	$\psi, \%$
20	590 – 740	295 – 340	50 – 60	55 – 58
800	150 – 180	98 – 147	33 – 36	30 – 36
900	70 – 90	59 – 69	35 – 40	35 – 40
1000	50 – 60	29 – 39	40 – 50	40 – 50
1100	30 – 40	20 – 29	70 – 80	55 – 60
1200	20 – 30	–	90 – 100	75 – 85

Примечание:  
 $t_{исп}$  – температура испытаний;  
 $\sigma_B$  – предел кратковременной прочности;  
 $\sigma_{0,2}$  – предел пропорциональности (предел текучести для остаточной деформации);  
 $\delta_5$  – относительное удлинение при разрыве;  
 $\psi$  – относительное сужение;  
 \* Сертификатные данные.

Справочные данные жаростойкости приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Типичная жаростойкость сплава 10ХН45Ю, по справочнику [20]

Среда	t <sub>исп</sub> , °С	Увеличение массы, г/м <sup>2</sup>	Скорость окисления мм/год	База испытаний, ч
Воздух	1200	25	0,08	100
		46		1000
		60		2000
	1250	28	0,1	100
		42		500
		61		1000
	1300	75	0,24	2000
		33		100
		65		500
		174	2000	
Среда	t <sub>исп</sub> , °С	Увеличение массы, г/м <sup>2</sup>	Скорость окисления мм/год	База испытаний, ч
Воздух	1350	45	–	100¢
		130		500

Примечание – в атмосфере спокойного воздуха сплав обладает длительной высокой жаростойкостью при температурах до 1350 °С. Скорость окисления при 1050 °С и продолжительности испытания 100 ч в потоке воздуха составляет 0,8 мм/год, а воздуха содержащего 1,5% SO<sub>2</sub>, ≈ 1,0 мм/год

Сплав 10ХН45Ю характеризуется хорошим сопротивлением пластической деформации и разрушению под действием высоких температур в окислительных средах. Ему свойственна жаропрочность, то есть способность изделий из этой стали работать под напряжением при повышенных температурах без деформации крошения и разрушения. Ползучесть сплава явно выражена, а также стойкий к радиационному разбуханию.

«Сплав 10ХН45Ю применяют не только в качестве жаростойкого, но и жаропрочного сплава. Максимальная температура 1250 ± 50 °С, при которой возможна эксплуатация сплава основного металла в течение длительного времени без ущерба для эксплуатационных характеристик» [20].

#### 1.4 Технология сварки и анализ свойств сварных соединений

Сплав 10ХН45Ю ГОСТ 5632–2014 подвержен горячему растрескиванию в процессе сварки. Охрупчивающие межкристаллические разрушения металла – сплава сварного шва и зоны термического влияния, возникающие в твердом состоянии при высоких температурах и твердо-жидком состоянии при окончании кристаллизации.

Сплав 10ХН45Ю не имеет точных импортных аналогов, что помогло бы для сравнения и анализа технологических свойств, а также подбору сварочных материалов.

Сварные конструкции из дисперсно-твердеющих – стареющих сплавов склоны к растрескиванию при ТО. «Большинство исследователей связывают этот вид разрушения с суммарным действием остаточных сварочных напряжений, объемных напряжений, вызванных выделением из твердого раствора  $\gamma$ -фазы и термических напряжений» [31].

Все фотографии были сделаны непосредственно на производстве в процессе анализа и изучения свариваемости сплава 10ХН45Ю.

Особые физико-химические свойства, большая чувствительность к наличию примесей и растворению газов затрудняют сварку никелевых сплавов [1]. «С и S также отрицательно влияют на качество сварных швов. S обладает большим химическим сходством с никелем» [4]. Особенно это заметно при температурах выше 400 °С, когда в течение короткого времени образуется  $Ni_3S_2$ , дающий легкоплавкую эвтектику с никелем с температурой плавления примерно 645 °С. Поэтому  $Ni_3S_2$  располагается по границам зерен металла (выделяется соль металла) и может привести к появлению кристаллизационных трещин, как показано на рисунке 3 [4]. «Одним из способов предупреждения горячих трещин при сварке может стать обеспечение преимущественной доли присадочного металла в шве (до 70 – 85 %)» [30]. Для этого предусматривается зазор в корне разделки кромок или расширение разделки в корневой части.

К дополнению выше указанным химическим элементам С и S, негативно влияют на свойства никелевых сплавов, относятся Ag, As, Bi, Cd, Ga, Ge, In, Pb, Sb, Se снижают долговечность, Te негативно влияет на прочность и пластичность при высокотемпературном растяжении, поэтому насыщенность Se и Te в никелевых сплавах должны быть ниже 0,05 мкг/г, Sn и Tl [40].

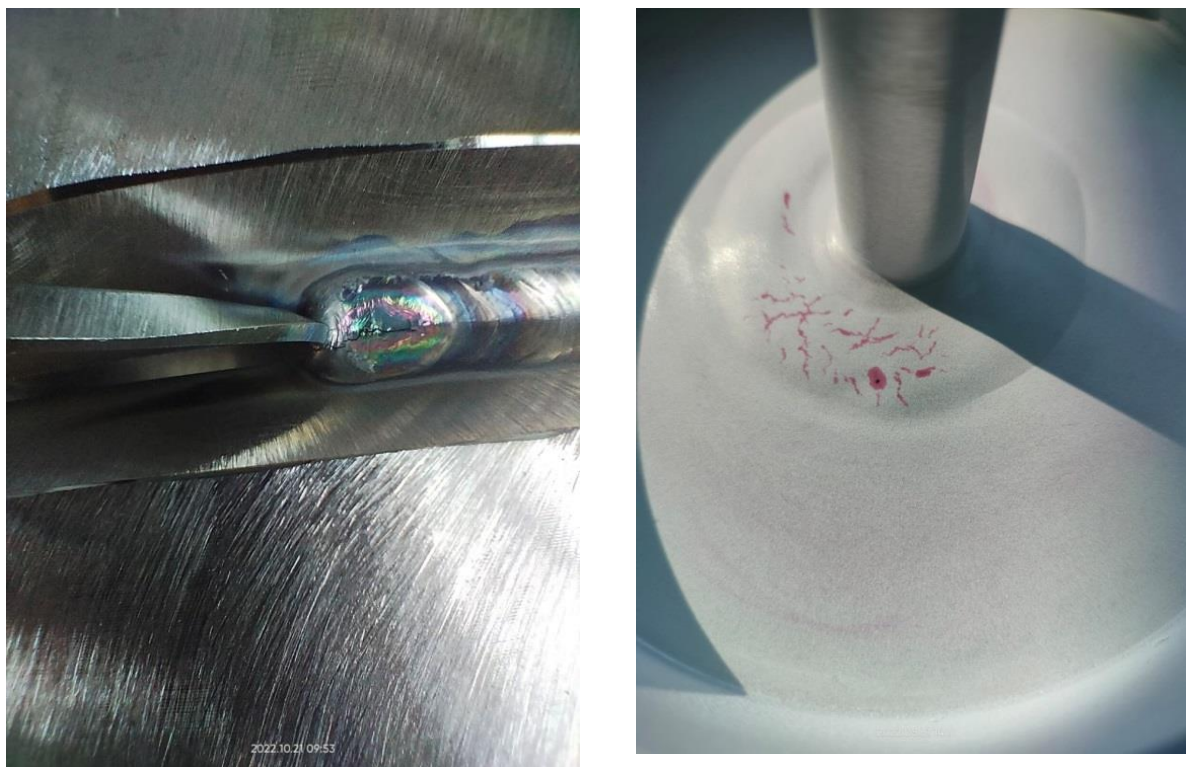


Рисунок 3 – Кристаллизационные трещины

В никеле хорошо растворяется Н и в меньшей степени N [38]. К тому же Н способен объединяться с NiO и образовывать воду. N взаимодействует с оксидом никеля NiO и образует летучие нитриды Ni<sub>3</sub>N. Углерод также вступает в реакцию с NiO и образует CO. Эти процессы и приводят к образованию пор, как показано на рисунке 4 [40].

Легирование шва Ti, Cr и V уменьшает пористость, а легирование Mn, C, Si, Fe увеличивает. При аргодуговой сварке вероятность образования пор уменьшается с повышением качества защиты зоны сварки инертными газами Ar, He, либо их смесей [4].

В свою очередь, легирование одним из элементов Cr, Fe, Mo, W, Ta увеличивает прочность. Легирование элементами Al и Ti обеспечивает высокую температурную прочность. Al, Cr, Ta увеличивают стойкость к окислению. В, C, Zr увеличивают стойкость к ползучести [40].



Рисунок 4 – Пористость внутри сварного шва

Некоторые никелевые сплавы, особенно с Сг и Мо, проявляют склонность к межкристаллитной коррозии, для предотвращения которой сварное соединение подвергают отжигу или иной ТО. Сваривать такие сплавы газовой сваркой нежелательно, так как длительное воздействие высокой температуры может привести к понижению коррозионной стойкости.

### **1.5 Анализ способов получения неразъемных соединений из сплава 10ХН45Ю**

В зависимости от способа сварки никеля могут быть применены различные методы легирования металла шва.

При сварке никеля и его сплавов возникает высокое поверхностное натяжение расплавленного никеля, что уменьшает глубину проплавления металла. Это требует увеличения угла разделки кромок деталей, как показано на рисунке 5, или применения активирующих флюсов.

В сварочной ванне сплав 10ХН45Ю очень текуч, из-за чего возникают сложности при выборе положений сварки.

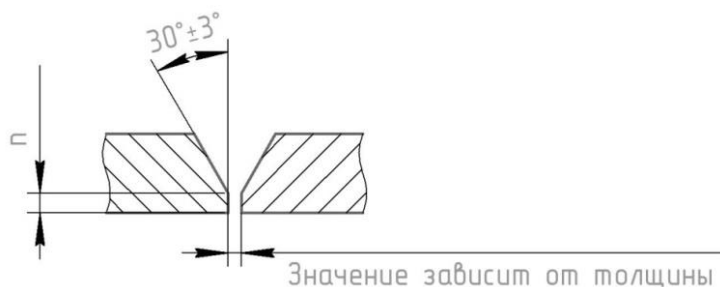


Рисунок 5 – Конструктивные элементы подготовленных кромок стыкового сварного соединения

Возможные способы сварки реторты показаны на рисунке 6.



Рисунок 6 – Возможные способы сварки для реторты

«Сварка является эффективным способом создания неразъемных соединений материалов, сплавов и получения ресурсосберегающих заготовок, максимально приближенных к оптимальной по геометрической форме готовых деталей или конструкций. Во многих случаях разные способы сварки являются единственно возможными или наиболее эффективными способами создания неразъемных соединений материалов и сплавов, позволяющие снизить трудоемкость изготовления, повысить коэффициент использования материала, снизить энергоемкость готовых изделий, повысить экономический результат» [22].

### **1.5.1 Аргодуговая сварка неплавящимся электродом в защитном газе**

«Преимуществом ручной аргодуговой сварки является надежная защита от атмосферы, позволяет получить сварной шов высокого качества во всех пространственных положениях различной толщины, возможность обеспечения качественной защиты инертным газом сварочной ванны, в результате чего предупреждается порообразование, трещинообразование и другие дефекты» [4].

«При недостаточной защите поверхность шва становится складчатой, и на рентгенограммах сварных соединений оксидные пленки в складках шва могут расшифровываться как трещины» [4].

При сварке никелевого сплава для улучшения свариваемости приходится вводить в зону сварки легирующие компоненты, поэтому химический состав сварного шва отличается от основного металла.

Важным условием получения качественной наплавки никелевого сплава является обеспечение чистоты. Соответственно перед самым началом сварки уделяется особое внимание зачистке механическим способом и обезжириванию сварочных кромок и околошовных зон, а также обезжириванию и очищению поверхностных окислов присадочных материалов.

Прихватки выполнять без присадочной проволоки. Присадочный материал следует применять в случае, если без присадки в прихватках образуются дефекты в виде трещин, которые можно наблюдать невооруженным глазом. При выполнении прихваток и последующей сварке следует особо внимательно обращать на заделку кратеров для предупреждения образований усадочной пористости и трещин. Кратеры швов, которые показаны на рисунке 7, должны быть тщательно заплавлены или выведены на удаляемый припуск детали, или выходную планку.

В

ы

в

е

л





Рисунок 7 – Кратер сварного шва

Заканчивая процесс сварки сварного шва и наплавки, необходимо уменьшить подачу сварочного тока для предотвращения образования трещин, в том числе в кратере. В инверторном сварочном аппарате типа TIG для аргонодуговой сварки данный процесс называется затуханием и задается временем в секундах. Затухание – плавно спадание напряжения дуги после окончания дуги до заданного параметра в амперах [38].

В процессе сварки никелевых сплавов применяют присадочные материалы с повышенным содержанием Ti, Mn и Mo. Данное легирование необходимо для обеспечения высокой стойкости металла шва против образования горячих трещин. Для повышения стойкости против горячих трещин предусматривают гарантированный зазор между свариваемыми кромками стыковых соединений для обеспечения свободной усадки металла. Также допускается выполнять предварительный и сопутствующий подогрев 250 – 350 °С. Процесс подогрева на участке сварки показан на рисунке 8.



Рисунок 8 – Предварительный и сопутствующий подогрев сварного шва

При сварке никелевых сплавов для предотвращения горячих трещин применяют сварочную проволоку Св-06Х15Н60М15 [27] по ГОСТ 2246–70 [7], допускаемая температура эксплуатации сварного соединения не выше 600 °С. Высокое содержание в сварочном материале марганца и молибдена дает обеспечение высокой стойкости металла шва против образования горячих трещин [33].

«По принципу легирования сварочной проволоки можно разделить на две группы» [32]:

1 «Сварочные (присадочные) материалы из гомогенных сплавов, имеющие в своем составе ограниченное количество Ti, Al и другие легированные добавки Mo, W и Nb, которые в свою очередь упрочняют твердый раствор и при определенном содержании эффектно повышают стойкость против образования горячих трещин» [32]. Пример таких сварочных материалов приведен в таблице 7.

Таблица 7 Сварочные материалы 1 группы

Сварочная проволока	Содержание, %									
	C	Si	Mn	Cr	Nb	Mo	W	Al	Ti	Прочее
	Не более									
Св-06X15H60M15	0,08	0,5	1,0	14-16	-	14-16	-	-	-	≤4,0Fe
Св-Х11Н60М23	0,1	0,5	1,0	9,5-13	-	21,5-24,5	-	-	-	≤7,0Fe
Св-ХН64КБММЮВФ	0,15	0,5	1,0	14-16	3-4	2-4	2-4	0,5-1,1	-	8-12 Co, 0,5-1,2V

Примечание – во всех случаях основа Ni.

2 «Сварочные (присадочные) материалы, где в химическом составе содержание, Ti и Al выше, при сварке которыми наплавленный металл после старения упрочняется в результате выделения  $\gamma$ -фазы. Таким образом это обеспечивает получение сварных соединений с более высокой жаропрочностью по сравнению с первой группой» [32]. Пример таких сварочных материалов приведен в таблице 8.

Таблица 8 – Сварочные материалы 2 группы

Сварочная проволока	Содержание, %									
	C	Si	Mn	Cr	Nb	Mo	W	Al	Ti	Прочее
	Не более									
Св-06X20H57M8B8T3P	0,1	0,6	0,5	19-22	-	7-9	7-9	Σ 3,3		≤3,0 Fe
Св-ХН77Ю	0,06	0,6	0,4	19-22	-	-	-	0,5-0,95	2,3-2,7	≤1,0 Fe
Св-ХН50ВМТЮБ	0,1	0,4	0,5	32-35	4,3-5,3	2,3-3,3	0,5-1,1	0,5-1,1	0,5-1,1	≤4,0 Fe

Примечание – во всех случаях основа Ni (никель).

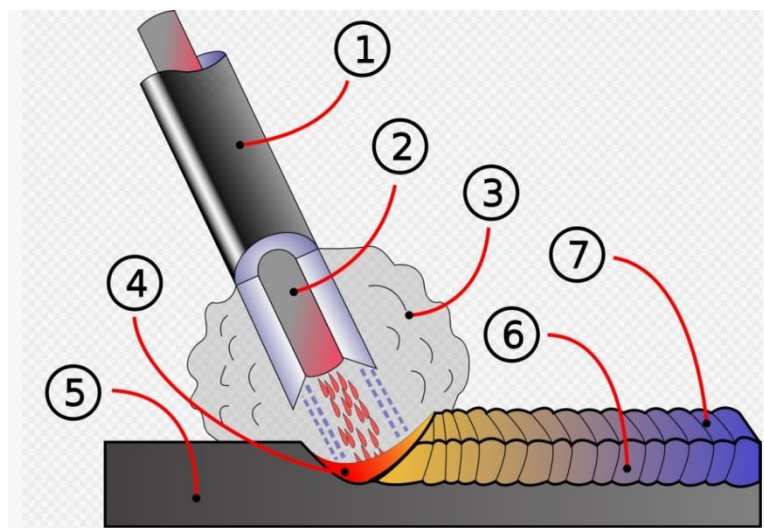
Если невозможно полностью исключить присутствие воздуха или кислорода при сварке, выбор сварочных материалов может иметь немалое значение для коррозионного поведения сварных соединений [39].

Преимуществами аргонодуговой сварки неплавящимся электродом в среде защитных газов с присадочным материалом являются:

- минимизация количества дефектов в сварных швах в результате действия защитного инертного газа;
- уменьшение деформации металла за счет небольшой зоны нагрева;
- получение аккуратных швов;
- исключение разбрызгивания металла ввиду отсутствия его капельного переноса.
- отсутствие шлака, в результате чего нет необходимости в механической обработке сварных швов;
- возможность сварки в любых пространственных положениях.

### **1.5.2 Сварка ручная дуговая покрытыми электродами**

Сварка ручная дуговая покрытыми электродами, показанная на рисунке 9, применяется в основном для соединения листов толщиной более 1,5 мм и ведется электродами с качественным покрытием (чаще основным) на постоянном токе обратной полярности. Для предупреждения перегрева электрода и получения возможно меньших напряжений в сварном соединении используют пониженный сварочный ток, что также уменьшает угар стабилизирующих и раскислительных элементов, содержащихся в электродной проволоке. При этом необходимо поддерживать короткую дугу и сварку вести на небольшой скорости. Поперечные движения электрода не должны превышать трех его диаметров [4].



1 – электродное покрытие, 2 – электродный стержень,  
3 – защитный газ, 4 – сварочная ванна, 5 – заготовка,  
6 – шов, 7 – шлаковая корка

Рисунок 9 – Сварка ручная дуговая покрытыми электродами

Сварка деталей с толщиной от 15 мм, рекомендуется выполнять предварительный подогрев до температуры 200–250 °С для обеспечения хорошего формирования шва и предотвращения образования горячих трещин, как показано на рисунке 10. Широкое применение сварки, для проплавления и отсутствие дефектов в корне шва, на медных подкладных пластинах или колец с зазором между разделкой кромок 2–3мм [4], [19].



Рисунок 10 – Образования горячих трещин

Сварка должна быть многопроходной «с предварительным подогревом кромок до 200–250 °С, при этом требуется тщательная зачистка поверхности промежуточных слоев». [4].

Скорость сварки также понижена на 15 %. Рекомендуется вести сварку в нижнем положении короткой дугой для уменьшения угара стабилизирующих и раскисляющих элементов, содержащихся в электродной проволоке.

После сварки рекомендуется провести ТО (в зависимости от сплава) сварного соединения. ТО в свою очередь повышает качество сварного шва и снижает риск возникновения холодных трещин [4].

При сварке никелевых сплавов применяют покрытые электроды ОЗЛ-35, Допускаемая температура эксплуатации сварного соединения не выше 1300 °С [29].

Обеспечивают получение металла шва с высокой жаростойкостью и достаточной жаропрочностью при температуре 800 °С.

### 1.5.3 Газовая сварка

Газовую сварку на никелевых сплавах, показанную на рисунке 11, применяют при малой толщине до 4 мм. «В основном используется активный газ смеси ацетилена и кислорода» [4]. Пламя необходимо поддерживать в рабочем состоянии, так как избыток кислорода вызывает окисление расплавленного металла, что приводит к хрупкости.

При сварке никелевых сплавов, содержащих хром более 10%, пламя должно быть более восстановительным (меньше в пламени кислорода), так как избыток кислорода может вызвать пористость [1] металла шва, но не настолько, чтобы насыщать углеродом наплавленный металл, «насыщать ее водородом, закисью углерода и другими газами» [1]. считается более восстановительное [4].

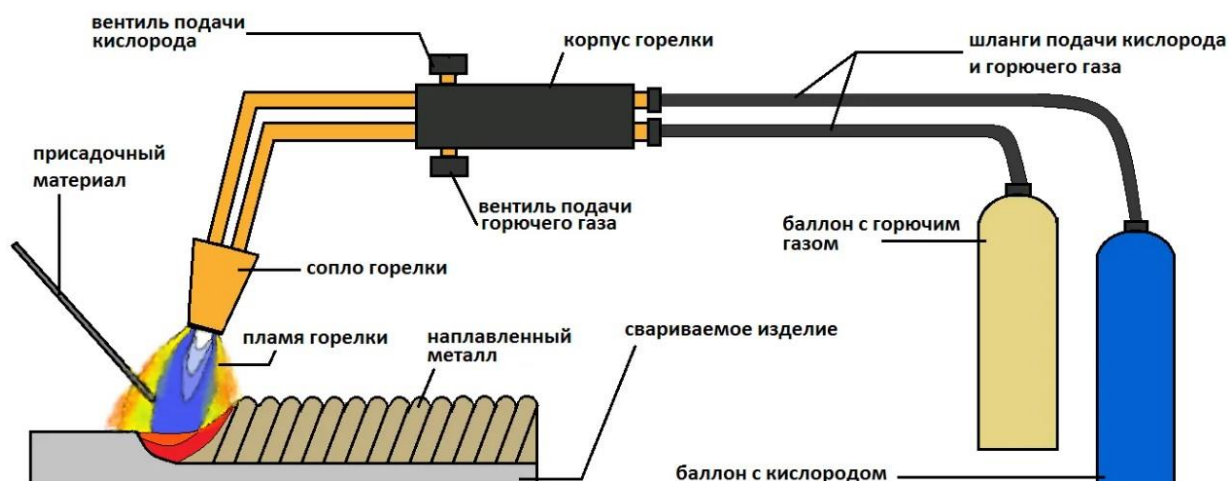


Рисунок 11 – Газовая сварка

Пора является одним из главных дефектов при данном способе сварки. Из пор могут проявиться трещины даже при незначительных нагрузках. Подбор пламени в нужных пропорциях соотношения смеси ацетилена и кислорода довольно затруднительно. Необходимы специальные точные газоанализаторы для более точных пропорций смеси газов.

Качество сварки зависит от состава флюсов и раскислителей, конструкции соединения, положения швов. При газовой сварке никеля и его сплавов используют многокомпонентные флюсы: керамические, плавленые, фторидные, высокоосновные марки. «Флюсы применяют главным образом для облегчения растворения окислов, защиты сварочной ванны от действия окружающего воздуха и улучшения жидкотекучести металла» [1]. Их обычно готовят в виде пасты и наносят на присадочный пруток и свариваемый металл. При изготовлении пасты сухую смесь замешивают на воде или спирте.

При сварке никелевых сплавов применяют «левый» и «правый» способы. При «левом» способе сварочная ванна более интенсивно взаимодействует с кислородом окружающей атмосферы, его следует применять для сварки тонких листов (1—2 мм). При «правом» способе охлаждение сварочной ванны происходит медленнее, при этом уменьшается окисление расплавленного металла и пористость. Для сварки никелевых сплавов рекомендуется применение присадочной проволоки такого же состава, что и основной металл [1].

Для избежание главного дефекта «пор» в сварное соединение присадочная проволока и центр горелки не должны касаться ванны и расплавленного металла это условие строго должно соблюдаться. «Сварку никелевых сплавов следует выполнять без задержек и возврата на сваренный участок для предотвращения перегрева околошовной зоны, сопровождающегося образованием» [1] околошовных и кристаллизационных трещин. Следует также избегать многослойной газовой сварки. Металл толщиной 1 – 2 мм сваривают в один проход без скоса кромок. Для стыковых швов металла больших толщин делается V-образная разделка [4], [21].

Проволоку для сварки рекомендуют применять такого же состава, что и основной материал. Особенно сварочные материалы легированные Mn, Mg, Si и Ti.



При правильном выборе марки присадочной проволоки, мощности и вида пламени получают высококачественные швы. Медленный нагрев и остывание свариваемых поверхностей уменьшают зону термического влияния.

#### 1.5.4 Сварка неплавящимся электродом сжатой дугой в защитном газе

«Ионизация газовой струи в плазмотронах происходит за счет нагрева от горения электрической дуги. Тепловое расширение приводит к увеличению объема газа, которое может составить от 50 до 100 раз, и его выбрасыванию из сопла на высокой скорости. Следовательно, мощный энергетический поток при плазменно-дуговой сварке формируется за счет тепловой и кинетической энергии. Как правило, горелки используют постоянный ток» [32].

В сварке неплавящимся электродом сжатой дугой в защитном газе, представленная на рисунке 12, используется вольфрамовый электрод и также защитный (инертный) газ аргон, что и в аргонодуговой сварке неплавящемся электродом (свободной дугой) [4].

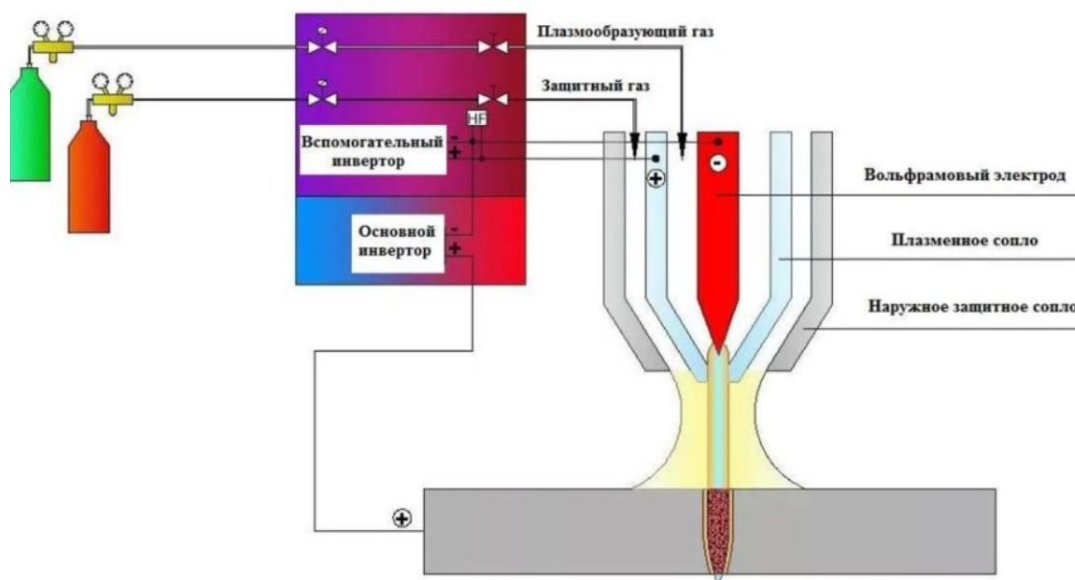


Рисунок 12 – Плазменно-дуговая сварка

«В зависимости от толщины свариваемых деталей величина тока может быть:

- микроплазменной – сила рабочего тока не больше 25 А,
- средними токами – сила рабочего тока до 150 А,
- рабочим током свыше 150 А» [32].

«Сваривание заготовок происходит за счет термической энергии плазмы, которая создается в пространстве, отделяющим неплавкий электрод от соединяемых деталей» [32]. При постепенном возбуждении сварочной дуги происходит формирование дежурной струи, переходящей в дугу прямого действия при контакте с поверхностью заготовок.

В сварке неплавящимся электродом сжатой дугой в защитном газе используется вольфрамовый электрод и также защитный (инертный) газ, что и в аргонодуговой сварке неплавящимся электродом (свободной дугой) [23].

### 1.5.5 Дуговая сварка плавящимся электродом в инертном газе

Механизированная сварка плавящимся электродом, представленная на рисунке 13, ведется на постоянном токе обратной полярности. Чтобы защитный газ ионизировался, электродуга должна быть стабильна. При обратной полярности заготовка нагревается меньше, чем электрод.

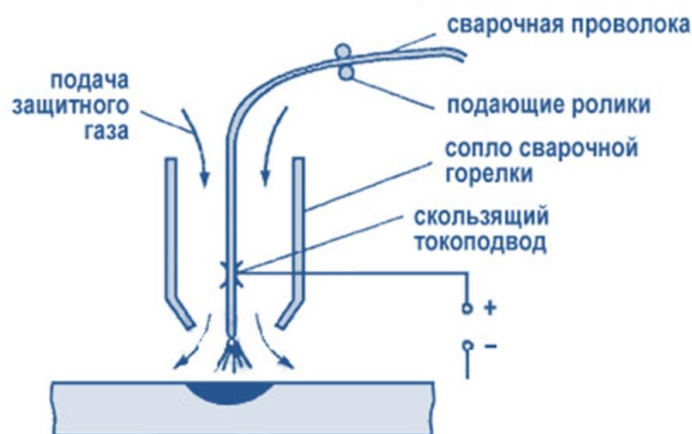


Рисунок 13 – Механизированная сварка плавящимся электродом в инертном газе

Этот способ особенно актуален для заготовок с толщиной более 1,0 мм и выше. Регулируя потенциал тока, можно уменьшить температуру заготовки соответственно учитывая глубину проплавления. Сварку плавящимся электродом можно производить в среде инертных газов аргона или гелия и в их смеси. Гелий и его смеси применяют, когда необходимо получить более глубокое проплавление деталей при меньшем потенциале тока. Проблема сварки данным способом является текучесть никелевых сплавов. Текучесть в процессе сварки влияет на геометрию сварного шва при различных положениях при сварке, а также на герметичность при толщинах менее 2,0 мм. Регулируя жесткость сварки и подачу сварочной проволоки, движение горелки – манипуляция, в процессе сварки крайне отличается от способа аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом в инертном газе. Остальные технологические приемы схожи со способом аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом [26].

## 2 Сварка образцов

На основании анализа способов получения неразъемных соединений из никелевого сплава 10ХН45Ю, для сварки реторты и образцов применялась аргонодуговая сварка неплавящимся электродом с присадочным материалом.

### 2.1 Выбор оптимальных режимов сварки

Необходимые режимы сварки, приведённые в таблице 9, а также технологические приемы выполнялись на сварных образцах. Тип сварного соединения стыковой ГОСТ 14771-76–С17 [12] с последующими разрушающими и неразрушающими методами контроля.

Таблица 9 – Характеристики и значения параметров режимов сварки образцов

Номера образцов / варианта	Основной материал	Номинальная толщина деталей в месте сварки, мм	Характеристика тока, полярность, род	Наименование параметра режима сварки				Предварительный и сопутствующий подогрев, °С	Последующая термообработка
				Сила тока, А		Расход аргона, л/мин			
				Корень	Заполнение	В горелку	На поддув		
1	10ХН45Ю	16 мм	Прямая, постоянный	126-127	164-165	14-15	7-8	270-290	–
2	10ХН45Ю	16 мм	Прямая, постоянный	126-127	164-165	14-15	7-8	270-290	+

Образцы, показанные на рисунке 13, изготавливались из идентичного материала основного изделия, сплава 10ХН45Ю диаметром 245 мм с толщиной стенки 16 мм.

Варианты параметров сварных образцов заключается в последующей ТО после сварки и без нее:

– Вариант 1 – образцы сваривались без последующей ТО после сварки;

– Вариант 2 – образцы сваривались с последующей ТО после сварки.



Рисунок 13 – Сварной образец из сплава 10ХН45Ю

В качестве присадочного материала использовался ХН70Ю ГОСТ 5632-2014 (присадочный пруток/лапша), который имеется в ОСТ 95 10441-2002.

Поддув горелки, поддув корня шва – инертный газ аргон газообразный, сорт высший ГОСТ 10157-2016 [11]. Баллон должен быть полным. Перед применением и подключением расходомера к баллону, производится проверка чистоты аргона на «технологическое пятно». Проверка на технологическое пятно производится полного и меньше половины баллона. Проверка производится чистой белой тканью (бязь). Вентиль баллона необходимо максимально открыть, предварительно прислонив ткань к штуцеру вентиля.

Если на ткани остается грязное или мокрое пятно, баллон с аргоном считается негодным.

Перед прихваткой образцы в зоне разделки зачищались механическим способом металлорежущим инструментом на ширину не менее 20 мм.

На образцах диаметром 245 мм выполнялись прихватки равномерно в 8 местах на сварочном позиционере, как показано на рисунке 14, и с поддувом корня сварного шва, изображенном на рисунок 15.



Рисунок 14 – Прихватка образца



Рисунок 15 – Поддув корня

Сварка многопроходная (6 проходов), выполнялась в условиях, обеспечивающих защиту места сварки от любых воздействий, отрицательно влияющих на качество сварных соединений, таких как подача инертного газа в горелку и поддув корня сварного шва.

После каждого прохода образец №1 и №2 в зоне сварки охлаждался до температуры не более 100 °С, далее зачищался в разделке механическим способом металлорежущим инструментом. Образцы перед сваркой подогревались кислородно-пропановым пламенем, как показано на рисунке 16, до рекомендованной температуры 250 – 300 °С. Измерения температуры проводились пирометром инфракрасным серии DT-8868H, показанный на рисунке 17.



Рисунок 16 – Предварительный и сопутствующий подогрев кислородно-пропановым пламенем



Рисунок 17 – Пирометр инфракрасный серии DT-8868H



«Каждый последующий слой в участке смещается относительно предыдущего на расстояние от 20 до 25 мм» [29]. Зажигание дуги производилось в разделке кромок на наплавленном металле. Кратер шва тщательно заправляли частыми короткими замыканиями электрода – процесс затухания дуги (раздел 1.6.1).

После окончания сварки поверхность шва и прилегающей к нему зоны основного металла были зачищены угловой шлифовальной машинкой (УШМ), щеткой для УШМ с нержавеющей витой проволокой от окисления и цветопобежалостей на ширину 20 – 25 мм, необходимую для последующего контроля.

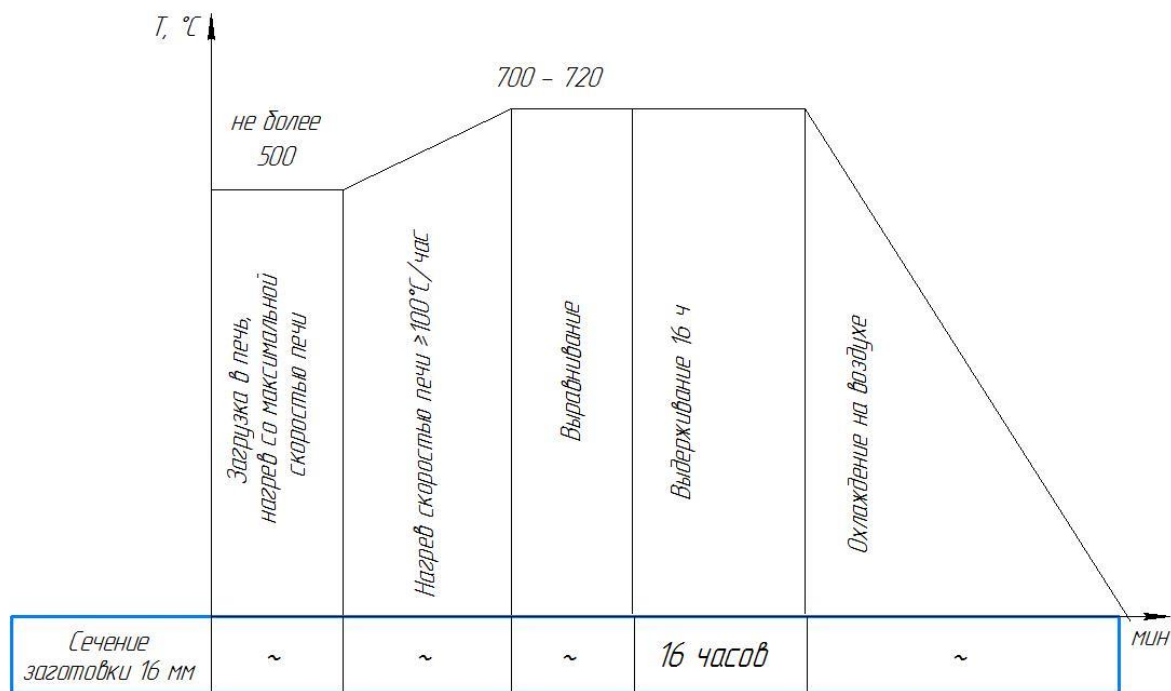
## 2.2 Контроль качества сварных образцов

Контроль качества сварных образцов проводился в соответствии с контролем качества основного изделия нормы оценки качества по ОСТ 95 10441-2002 в соответствии со II категорией сварных соединений:

- визуальный контроль и измерительный контроль сварных соединений проводились в соответствии с требованиями ГОСТ Р 50.05.08 – 100 % [15];
- радиографический контроль проводился в соответствии с ГОСТ 7512, ГОСТ Р 50.05.07 –100 % [14];
- капиллярный контроль проводился в соответствии с ГОСТ Р 50.05.09 [16], класс чувствительности II –100 %;
- испытание на герметичность, гидравлическим методом, класс герметичности V проводилось в соответствии ГОСТ Р 50.05.01 – 100 % [13];
- испытание на прочность проводилось гидравлическим давлением 0,125 МПа, время выдержки не менее 10 минут;
- устойчивость на вакуумметрию проводилось давлением 50 КПа, время выдержки не менее 10 минут.

### 2.3 Термическая обработка варианта 2

Образцы вариант 2 после сварки прошел ТО – старение с рекомендованными режимами такой же группы сплава [32]. Диаграмма ТО представлена на рисунке 18. Как и в любой ТО необходимо учитывать процесс выравнивания выход на заданные параметры.



Примечание – Нерегламентированные по длительности этапы режима обозначены «~».

Рисунок 18 – Диаграмма ТО, старение образца 2

Старение сплавов с карбидными упрочнениями проводят при температуре  $600-800 ^\circ\text{C}$ , с интерметаллидным упрочнения при температуре  $700-1000 ^\circ\text{C}$ , в зависимости от количества и состава избыточных фаз.

Сплавы же, содержащие более 8 % (Ti+Al), проводят двух- или трехступенчатую ТО, закалку с охлаждением на воздухе с последующим старением. Количество и время старения зависит от ступеней ТО.

Режимы старения, как температуру выдержки и время выдержки можно изменять в зависимости от требуемых механических или технологических свойств сплава.

Существуют ступенчатые режимы старения — двойные и более сложные, но они мало приемлемы для практики особенно в промышленности на территории Российской Федерации. Для кратковременных сроков службы, особенно для длительных сроков, применение многоступенчатых режимов старения совершенно не оправдано, так как полученные структуры в процессе сложных ТО неизбежно меняются в условиях длительной эксплуатации, при воздействии температуры и нагрузки. Процессы старения в сплавах продолжают протекать независимо от исходного структурного состояния. Частицы упрочняющей фазы коагулируют, а неустойчивые частицы растворяются в твердом растворе. Происходят повторные и неоднократные выделения новых, более равновесных частиц. Все эти процессы происходят одновременно.

Температура закалки за рубежом обычно ниже, и время выдержки значительно меньше, чем температура закалки, применяющаяся и описанная в нормативной документации и справочниках в РФ. В результате этого зарубежные сплавы более мелкозернистые, тем которые применяются в РФ. Вторую закалку за границей не применяют, тогда, как у нас она успешно применяется для многих сплавов.

Процессы дисперсионного выделения, растворения термодинамически неустойчивых частиц второй фазы происходят непрерывно. Эти процессы происходят регенеративно, цикл повторяется за циклом, поэтому, сколько сплав не состаривать предварительно и не усложнять режимы ТО, он при длительной тепловой выдержке будет изменять свои свойства, охрупчиваться в результате постоянного выделения частиц упрочняющей фазы и изменения структурного состояния.

Следует остановиться на оригинальном и простом режиме ТО дисперсионно-твердеющих горяче- или холоднодеформированных сплавов, который состоит из одинарного старения (без предварительной закалки).

Этот режим позволяет получать наилучшие прочностные свойства и пластичность в широком диапазоне температур, а также наивысшую жаропрочность и сопротивляемость усталости при температурах до 750 °С [38]. Кроме того, этот режим обеспечивает лучшее сопротивление тепловой хрупкости и нечувствительность к надрезам.

Сплавы на никелевой основе хорошо противостоят атмосферному окислению до температур 850–950° С. При более высоких температурах (температуры нагрева под закалку более 1000° С) они окисляются с поверхности и по границам зерен, поэтому для ТО жаропрочных сплавов при высоких температурах, желательно иметь вакуумные. Охлаждение металла по окончании выдержки достигается с помощью струи инертного газа, как например Ar или He. Если окисление недопустимо, необходимо применять печи с защитной атмосферой или специализированное приспособление с инертной средой.

Точность регулирования температуры при ТО должна быть для деформируемых сплавов в пределах 4 – 5 °С, а для литых 8 – 10 °С.

### **3 Методика изготовления и исследования образцов**

В ходе проведения сварочных работ получили 6 образцов со следующими размерами диаметр 245 мм, длина 120 мм и толщина стенки 16 мм.

Варианты параметров сварных образцов заключаются в последующей ТО после сварки и без нее:

- Вариант 1 – образцы сваривались без последующей ТО после сварки;
- Вариант 2 – образцы сваривались с последующей ТО после сварки.

#### **3.1 Методика изготовления и исследования сварных образцов на макроструктуру**

Исследование макроструктуры сварного шва представляет собой общую структуру и форму, а также макроскопическое распределение зерен сварного соединения, которое видно не вооруженным глазом или с помощью лупы.

От каждого сварочного образца были отрезаны по одному образцу вдоль диаметра поперек сварного шва.

Образцы зашлифованы на специальном станке с горизонтально-вращающимся плоским кругом, на который закрепляют наждачную бумагу. Сначала шлифовали грубой крупнозернистой наждачной бумагой P250–P600 до удаления неровностей. Далее шлифовали мелкозернистой наждачной бумагой P1000–P2500. Перед каждой шлифовкой более мелким зерном образцы переворачивали на 90°. При шлифовании образец и наждачную бумагу постоянно смачивали водой от перегрева.

После полного удаления рисок шлифованную поверхность отполировали войлоком с применением абразивной алмазной пасты АП-5 и АП-0,5, а при финишной полировке – неабразивной пастой POLISH WITHOUT SILICON.

Отбор проб проводился визуальным контролем – отсутствовали риски, мелкие царапины. Главным признаком хорошо полированной поверхности образца является отсутствие следов пасты на ней [9].

Травление проводилось несколько раз различными реактивами по справочным данным [5]. Макроструктура выявлена следующими реактивами:

- Раствор перекиси водорода 3 % – 10 мл;
- Водный раствор едкого натра 10 % 10 20 мл.

Данным раствором была проявлена макроструктура, образцы показаны на рисунках 19 и 20.



Рисунок 19 – Образец варианта 1 для исследования макроструктуры



Рисунок 20 – Образец варианта 2 для исследования макроструктуры

После травления образцы тщательно промыты водой и протерты спиртом.

### **3.2 Методика изготовления и исследования сварных образцов на микроструктуру**

Поскольку микроструктуру металла изучают в отраженном свете, поверхность образца (микрошлифа) должна удовлетворять двум требованиям:

- микрошлиф должен иметь максимальную отражающую способность;
- разные участки поверхности должны по-разному отражать свет, чтобы различить элементы микроструктуры.

Процесс подготовки образцов для исследования микроструктуры схож с подготовкой для исследования макроструктуры.

Образец 1 и 2 были отшлифованы и отполированы таким же методом, как и для исследования макроструктуры. Травление и реактивы были согласованы с АО «НИКИМТ–Атомстрой».

Травление проводили двумя этапами.

Первый этап. Приготовленный травитель, состоящий из реактивов: азотная кислота 50 %, соляная кислота 50 %, насыщенный раствор хлорного железа 30 %, обильно смачивался ватной палочкой и растирался по поверхности.

Второй этап. Образцы помещались в лабораторную колбу, в которой были смешаны реактивы, состоящие из серной кислоты 20 %, соли хромовой кислоты. Травление подвергалось кипячению при температуре 70 – 72°.

После травления образцы, показанные на рисунках 21 и 22, были тщательно обработаны медицинским спиртом.



Рисунок 21 – Образец варианта 1 для исследования микроструктуры





Рисунок 22 – Образец варианта 2 для исследования микроструктуры

Исследование микроструктуры проводилось на металлографическом оптическом микроскопе.

### **3.3 Методика изготовления и исследования сварных образцов на микротвердость**

«Микротвердость характеризует сопротивление материала локальной деформации или разрушение при внедрении в него более твердого тела – индентора. Характерным отличием микротвердости от твердости является наличие масштабного эффекта, т. е. зависимость микротвердости от нагрузки» [18].

Измерение микротвердости является одним из методов исследования, позволяющим количественно оценить прочность или пластичность металлических сплавов.

Измерение микротвердости по ГОСТ 2999-75 проводилось на полированных образцах после исследования микроструктуры. Исследования по измерению микротвердости проводились методом Виккерса с помощью

твердомера ИТВ модификации ИТВ-30-II-AЖ, показанный на рисунке 23. Нагрузка составляла 98,07 Н (10кгс). Время выдержки 15 сек.



Рисунок 23 – Твердомер ИТВ, модификация ИТВ-30-II-AЖ

Измерения проводились равномерно в 10 точках на сварном шве и в зоне термического влияния, как показано на рисунке 24.

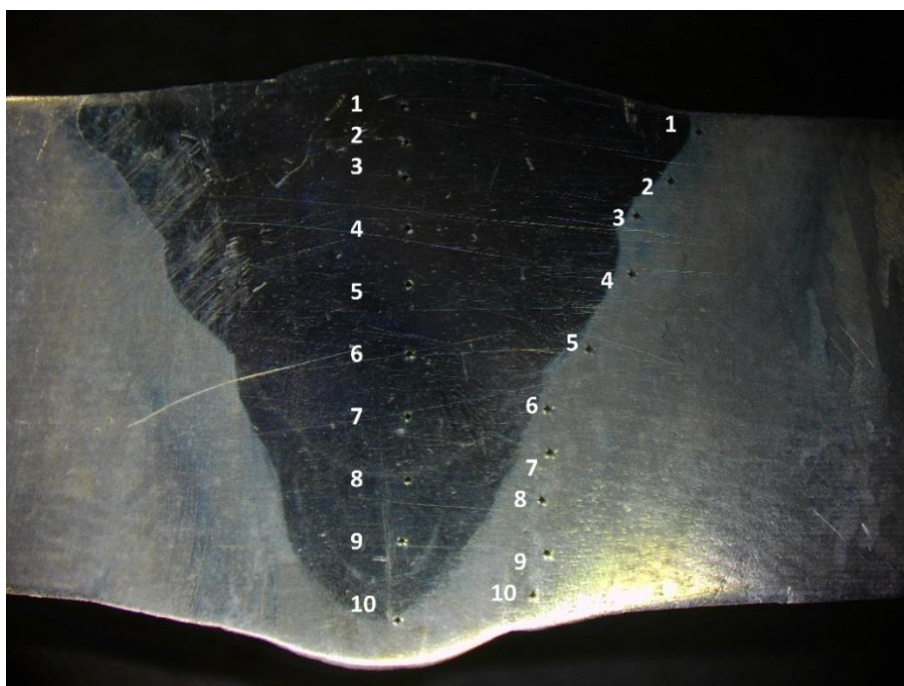


Рисунок 24 – Схема измерения твердости

Точки 1 и 10 сделаны на расстоянии от края темплета. На основном материале измерения проводились в 3 точках.

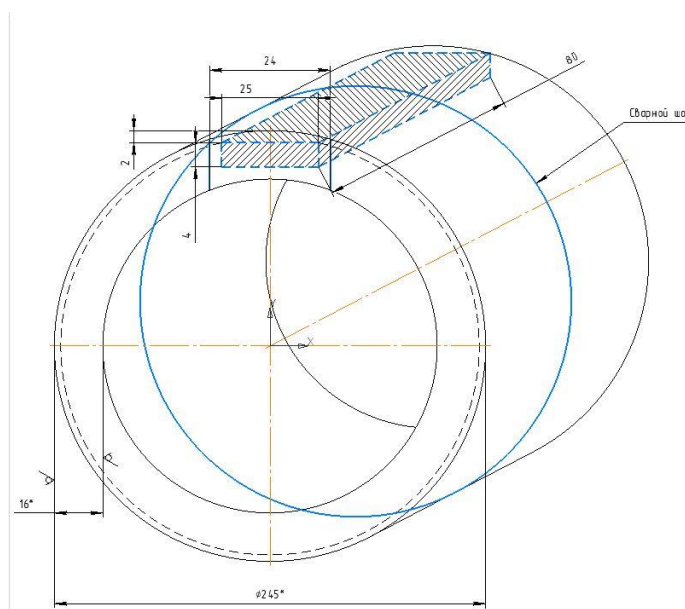
### **3.4 Методика изготовления и исследования сварных образцов на стойкость против к МКК**

Стойкость против к межкристаллитной коррозии (МКК) – один из наиболее опасных видов местной коррозии сталей и сплавов, вызывающих избирательное разрушение по границам зерен вглубь металла без заметных внешних признаков. При этом происходит потеря прочности, пластичности и преждевременное разрушение материала. К таким испытаниям склонны многие сплавы, имеющие неоднородную структуру и содержащие в своем составе Fe, Al и Ni.

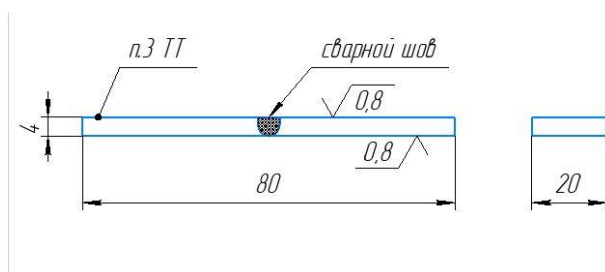
Жаропрочный и жаростойкий сплав 10ХН45Ю не нормируется испытанием на стойкость против к МКК. В ГОСТ 6032-2017 [10] для сплавов на железоникелевой основе есть метод ВУ, а оценка испытания по методу АМУ.

Обычно МКК возникает в месте сварного шва и зоны термического влияния (ЗТВ) или в условиях, когда проведена неправильная ТО металла. При неверно выбранном термическом режиме границы зерен остаются активными, а сами зерна пассивными. В результате содержание Cr на границах зерен уменьшается, и это способствует образованию коррозии и ржавчины.

Сваренные образцы имеют следующие размеры: диаметр 245 мм, длина 120 мм и толщина стенки 16 мм. Из середины шва механическим способом вырезали образец толщиной 4 мм, длиной 60 мм и шириной 20 мм. Размеры и вырезка образца показаны на рисунке 25.



*а*



*б*

*а* – схема вырезки образца; *б* – образец МКК  
Рисунок 25 – Сварной образец для исследования на стойкость против МКК

Изготовление и отбор образцов проводился в соответствии с ГОСТ 6032-2017[10]. Для исследований на стойкость против к МКК были изготовлены темплеты (образцы для исследования) 4 шт. из образца 1 и 4 шт. из образца 2.

После механической обработки образец полировался до шероховатости Ra 0,8 мкм ГОСТ 2789–73 [9]. Далее производился отбор проб и отправлялся на исследование стойкости против к МКК методом ВУ по ГОСТ 6032-2017.

На рисунке 26 а и 26 б показаны разрезанные образцы 1 и 2 соответственно, на рисунке 26 в изображены полированные образцы. Отбор проб проводился визуальным и измерительным контролем на завал кромок, подрезов, размеры габаритов и контроль шероховатости ГОСТ Р 50.05.08–2018 [15].



*а*



*б*



*в*

*а* – вариант 1; *б* – вариант 2;  
*в* – темплеты, варианты 1 и 2

Рисунок 26 – Последовательность изготовления темплета

Непосредственно перед испытанием проводился повторный визуальный и измерительный контроль, осмотр на наличие царапин, забоев и измерение шероховатости исследуемых поверхностей. Образцы неоднократно обезжировались.

Испытание образцов, как выше было изложено, проводились по ГОСТ 6032-2017 методом ВУ.

В подготовленный раствор из сернистого оксидного железа и серной кислоты помещались исследуемые образцы, время кипячения составило 48,5 ч. После кипячения образцы согнули на угол равный 85–95°, далее проводили оценку испытаний.

Оценку результата испытаний по методу АМУ проводили осмотром с помощью лупы с 10-кратным увеличением.

### **3.6 Методика изготовления и исследования сварных образцов на СФФ**

Известно, что присутствие ферритной фазы изменяет технологические и эксплуатационные свойства стали. В отсутствие ферритной фазы или при малых ее содержаниях обнаружена склонность металла сварного шва к образованию горячих трещин, а при более высоких содержаниях ферритной фазы (СФФ) наблюдается тенденция к снижению пластичности и ударной вязкости после выдержки при повышенных температурах. Определение СФФ в никелевых сплавах, где содержание Сг в металле или сплаве от 8 % до 25 % является обязательным условием для исследования, особенно если сварной шов эксплуатируется при температуре выше 350 °С согласно ОСТ 95 39–2002 [28] и НП-105–18 [24].

Контроль СФФ важно осуществлять при выполнении сварки, особенно с предварительным подогревом, а также при эксплуатации сварных швов и основного материала в температурном диапазоне от 350 °С и выше.

Торцевые поверхности исследуемых сварных образцов обработаны механическим способом до шероховатости Ra 3,2, как показано на рисунке 27. Толщина образца имеет размер 16 мм, что позволяет провести несколько измерений на контролируемой поверхности, как показаны на рисунке 27.



Рисунок 27 – Образцы для измерения СФФ

Отбор проб проводился визуальным и измерительным контролем по ГОСТ Р 50.05.08–2018 на отсутствие наклепа и измерение шероховатости.

Исследования на определение СФФ проводились многофункциональным прибором вихретоковый МВП-2М с преобразователем Ф010 (измерение ферритной фазы в диапазоне от 0,1 % до 25,0 %), показан на рисунке 28.



Рисунок 28 – Прибор многофункциональный вихретоковый МВП-2М, преобразователь Ф010



На рисунке 29 изображены контролируемые участки измерения на образце.



1 – зона основного материала; 2 – ЗТВ; 3 – зона сварной шва;  
4 – зона корня сварной шва.

Рисунок 29 – Контролируемые участки измерения СФФ

Исследования проводились семи измерениями на каждый обозначенный участок согласно ГОСТ Р 53686–2009 [17].

#### **4 Результаты исследований сварных образцов**

Варианты параметров сварных и изготовленных образцов для исследований заключаются в следующем:

- Вариант 1 – образцы сваривались без последующей ТО после сварки;
- Вариант 2 – образцы сваривались с последующей ТО после сварки.

Изготовленные темплеты из сваренных образцов были исследованы. Результаты приведены ниже.

##### **4.1 Результаты исследований сварных образцов на макроструктуру**

Полученные образцы, показанные на рисунках 30 и 31, были изучены и описаны ниже.



Рисунок 30 – Образец исследования макроструктуры варианта 1



Рисунок 31 – Образец исследования макроструктуры варианта 2

При оценке качества на образцах с вариантом 1 и 2 выявлен крупнозернистый излом. Трещин на границах зерен не обнаружено. Зона сплавления и крупнозернистость больше выражена на образце варианта 2. Отсутствуют газовые пузыри, пористости, пустоты и химическая неоднородность, что говорит о высоком качестве сварки.

На образце варианта 1 были выявлены четкие зоны основного сплава, ЗТВ, зоны сплавления и зоны сварного шва. В то время как на варианте 2 выявлены только четкие зоны основного сплава, зоны сплавления и зоны сварного шва.

К особенностям строения сварного шва на образцах с вариантом 1 и 2, выполненных аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом с предварительным подогревом, отнесем наличие комплекса структур, состоящих из нескольких участков. На рисунке 32 показана схема деления образца на участки [25]:

- участок 1 – зона сварного шва (наплавленного металла),

- участок 2 – зона сплавления,
- участок 3 – ЗТВ,
- участок 4 – зона основного материала.

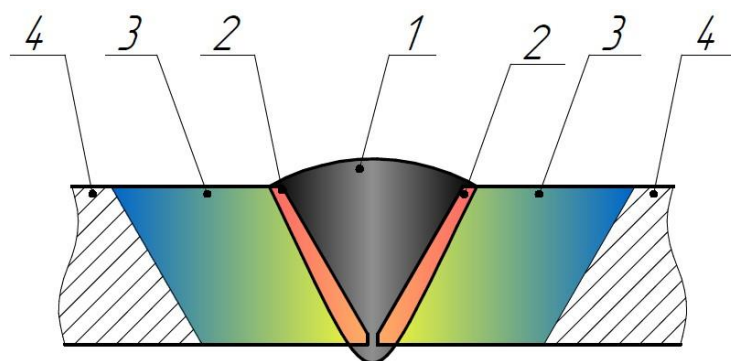


Рисунок 32 – Схема разделения сварного шва на участки

На имеющихся образцах с вариантом 1 и 2 выявили и изучили три участка, показанные на рисунках 33 и 34.

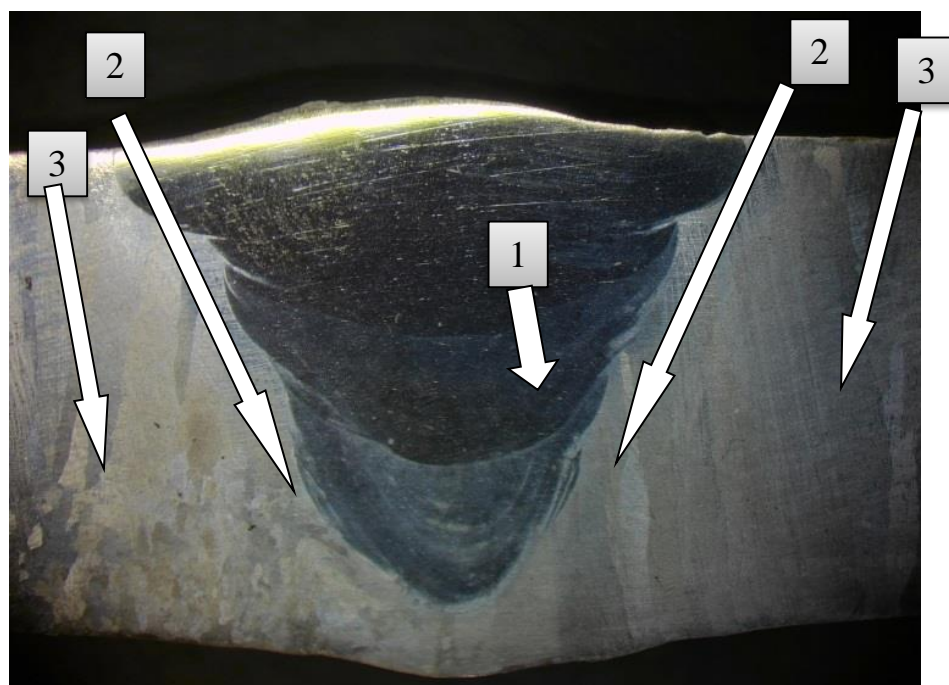


Рисунок 33 – Схема разделения сварного шва на участки  
Образцы варианта 1

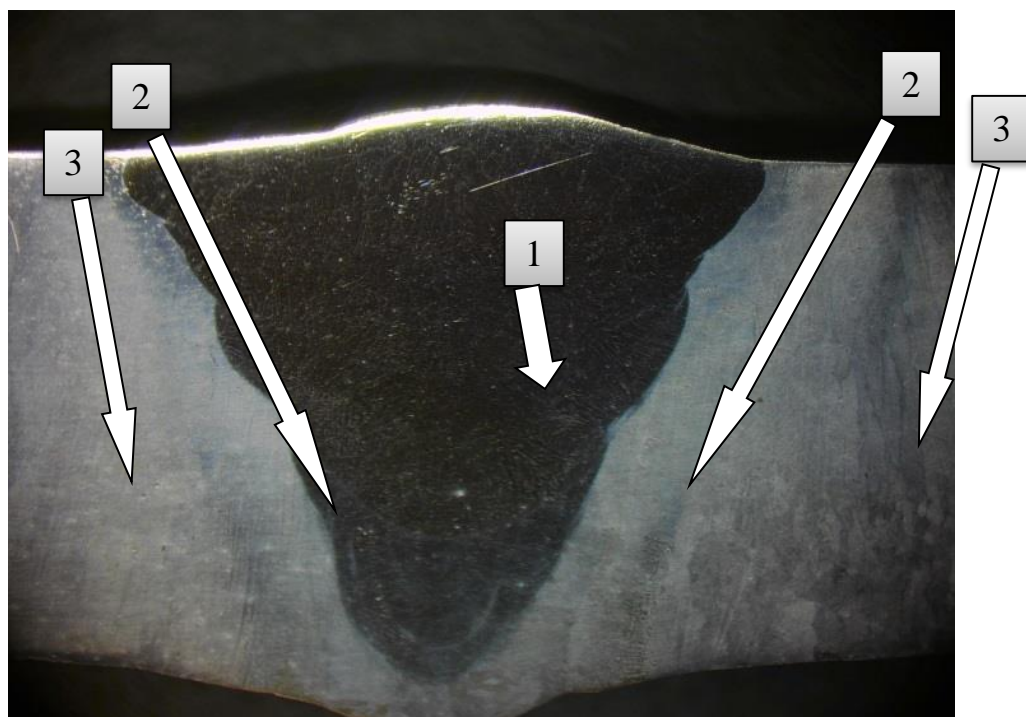


Рисунок 34 – Схема разделения сварного шва на участки  
Образцы варианта 2

На участке 1 кристаллы сварного шва (наплавленного металла) вытянуты вверх. В корне кристаллы имеют общее основание и вытянуты елочным строением. Данное строение является дендритной структурой [1].

Участок 2 во время сварки находился в температурном диапазоне ликвидус – солидус. В результате большого тепловложения сплав приобрел строение кристаллов со столбчатой структурой. Визуально можно определить, что часть зерен частично подверглась расплавлению.

Так как сварное соединение выполнено за 6 проходов, толщина свариваемого материала 16 мм, ближе к корню шва можно выявить мелкую структуру.

Участок 3 во время сварки находился в температурном диапазоне солидус. Данный участок, также как и участок 2, имеет крупнозернистое строение структуры.

Так как толщина свариваемого материала 16 мм, сварное соединение было сварено за 6 проходов с учетом корня и лицевого прохода. На участках сплавления и ЗТВ выявлена мелкозернистая структура ближе к корню шва.

На образце варианта 1 средняя ширина общей ЗТВ, начиная с зоны сплавления, в некоторых местах шлифа рисунка 33 выявлены реактивом синим цветом и равна от 3 до 10 мм.

На образце 2 средняя ширина общей ЗТВ, начиная с зоны сплавления, как показано на рисунке 34, и почти по прямой линии вдоль всего сварного шва, выявлена реактивом синим цветом и равна от 6 до 15 мм. На образце варианта 1 участки 1 и 2 менее отчетливо проявлены после травления.

#### **4.2 Результаты исследований сварных образцов на микроструктуру**

Полученные образцы варианты 1 и 2, показанные на рисунках 35 и 38, были изучены на световом микроскопе и описаны ниже.

Сварной шов имеет структуру литого металла, которая сформировалась в результате развития первичной и вторичной кристаллизации. При сварке, состоящей из 6 слоев, корневой слой, слои заполнения разделки, лицевой слой, центрами кристаллизации служат поверхности кристаллитов предыдущего слоя. Несмотря на множество слоев, в сварном соединении при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом в микроструктуре образцов варианты 1 и 2 отсутствуют трещины, мелкие поры, включения и другие дефекты.

На рисунках 35 – 38 получена микроструктура с 300-кратным увеличением на микроскопе. Структура аустенитная на 99,9 %. В структуре не просматривается граница между соседними слоями, которая при эксплуатации может служить концентратором напряжений. Несмотря на медленную скорость охлаждения (толщина свариваемой стенки основного металла 16 мм, охлаждение проводилось на воздухе – окружающей атмосфере  $25\pm 5\text{ C}^\circ$ ) в структуре присутствуют зоны с равноосной структурой.

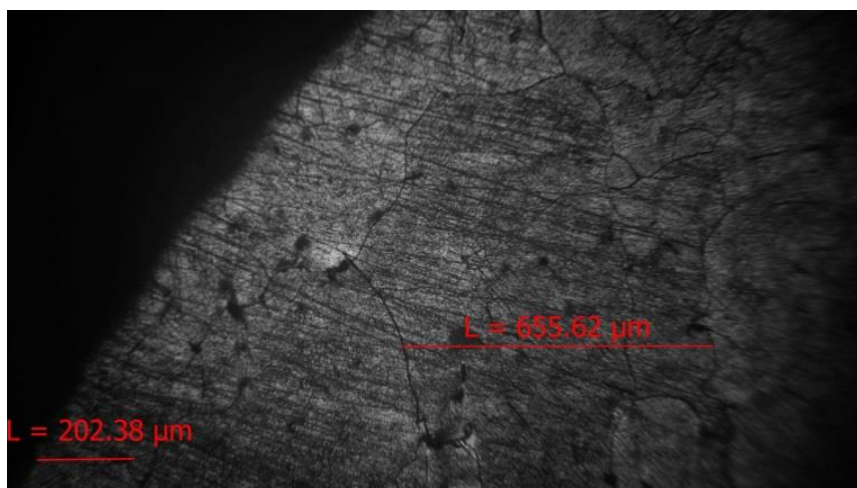


Рисунок 35 – 300-кратное увеличение образца варианта 1, ЗТВ корня



Рисунок 36 – 300-кратное увеличение образца варианта 1,  
сварной шов (зона сплавления)

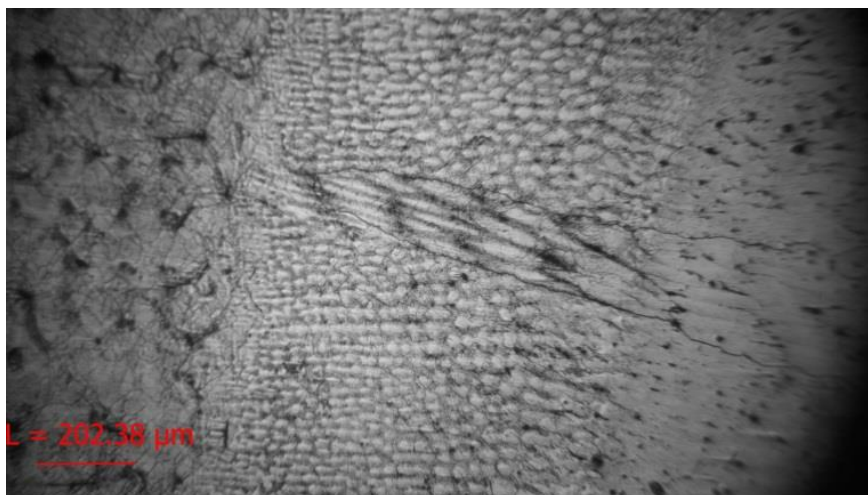


Рисунок 37 – 300-кратное увеличение образца варианта 2, ЗТВ корня

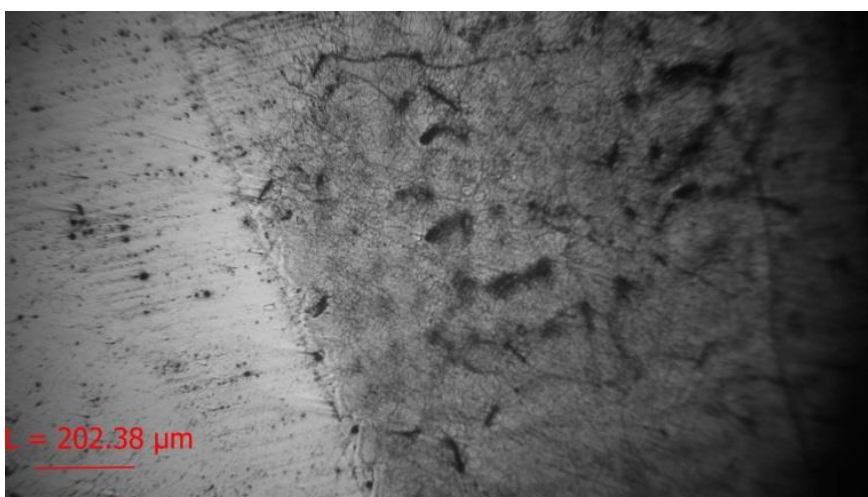


Рисунок 38 – 300-кратное увеличение образца варианта 2,  
сварной шов (зона сплавления)

На образце варианте 1 рисунка 35 визуально выявлена граница ЗТВ – структура крупнозернистая. На образце варианте 2 рисунка 37 визуально выявлена граница ЗТВ – структура мелкозернистая под влиянием ТО. Структура полностью рекристаллизованная.

Структура на образцах с вариантом 1 и 2 равномерная однофазная, в основе твердый раствор  $\gamma$ -фазы и имеющая упорядоченную ГЦК структуру. Наличие  $\gamma$ -фазы повышает жаропрочность и одновременно указывает на



склонность к образованию горячих трещин при сварке. Данная структура характерна для сплавов аустенитного класса на никелевой основе при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом [25].

На микроскопе имеются 3 источника света, которые наклонены под разным углом. Данные источники позволяют оценить отсутствие неметаллических включений.

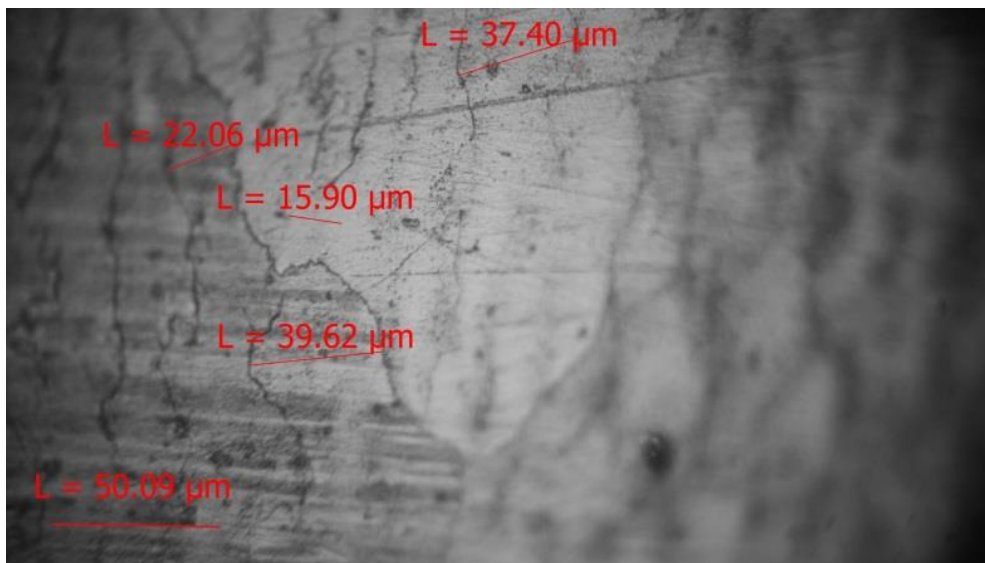


Рисунок 39 – 1000-кратное увеличение образца варианта 2, сварной шов

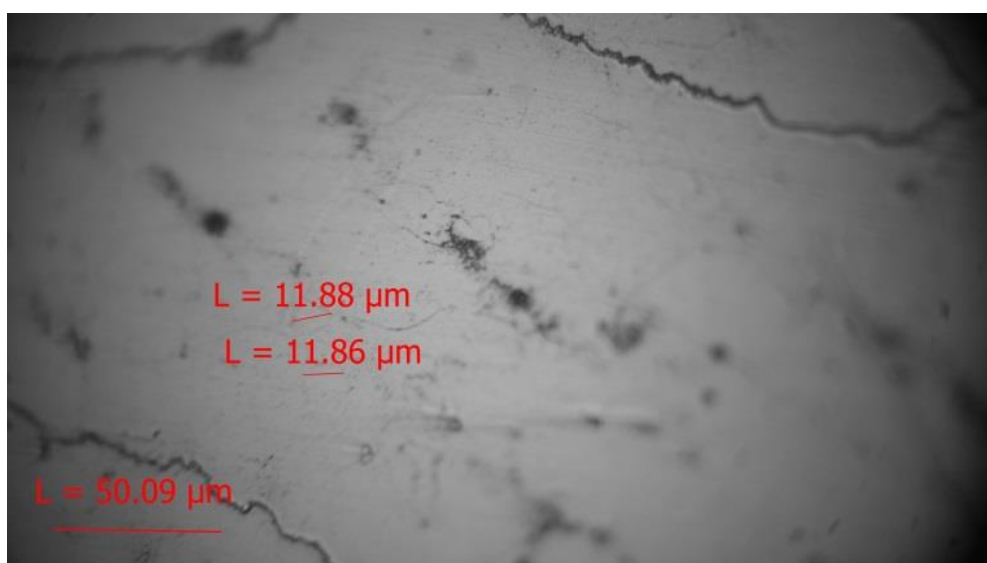


Рисунок 40 – 1000-кратное увеличение образца варианта 2, сварной шов

На рисунках 39, 40 с 1000-кратным увеличением на микроскопе отчетливо видна форма и расположение карбонитридной фазы. Первичные карбонитриды выделились в процессе затвердевания в виде эвтектических составляющих в межосных участках. Температура растворения карбидов, нитридов и карбонитридов зависит не только от химической природы данной фазы, но и от состава сплава. Это объясняет, то что в сплаве 10ХН45Ю аустенитной структуры труднорастворимы нитриды – алюминия. Повышение температуры растворимости карбидов в аустените с увеличением содержания углерода предопределяет повышение активности углерода в аустените вследствие роста его концентрации в твердом растворе и увеличения коэффициента термодинамической активности.

В данном сплаве на основе Ni, который увеличивает коэффициент термодинамической активности углерода, следовательно затрудняет растворение карбидов и нитридов в аустените [31].

#### **4.3 Результаты исследований сварных образцов на микротвердость**

После получения данных были построены графики.

Микротвердость сваренных образцов варианта 1 и 2 на участке сварного шва изменяется в пределах 158,1 – 283 HV, показанная на рисунках 41 и 42, а на участках ЗТВ в пределах 129,8 – 267,1 HV показанная на рисунках 43 и 44.

## Микротвердость сварного шва образца 1

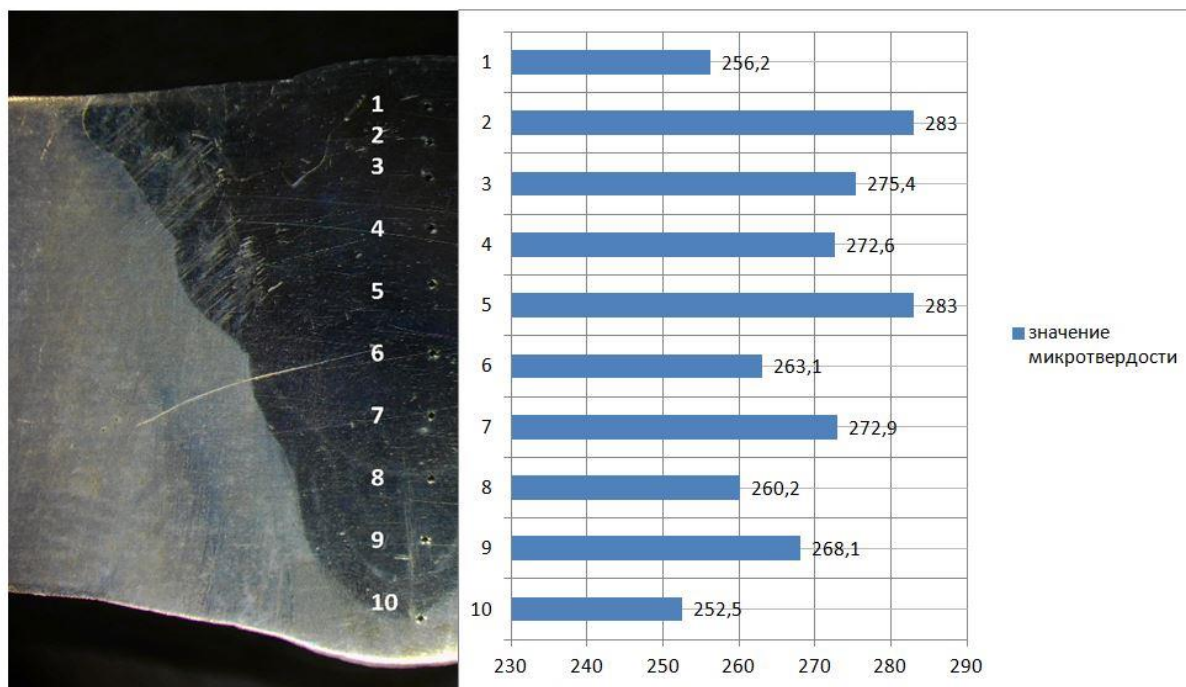


Рисунок 41 – Микротвердость сварного шва образца варианта 1

Образец варианта 1, показанный на рисунке 36, имеет значения твердости в точках 2 – 283 HV, 5 – 283 HV, 7 – 272,9 HV, 9 – 268,1. Это указывает на то, что измерение было выполнено на двойном шве, т.е. измерение выполнено в зоне сплавления с предыдущим слоем.

## Микротвердость сварного шва образца 2

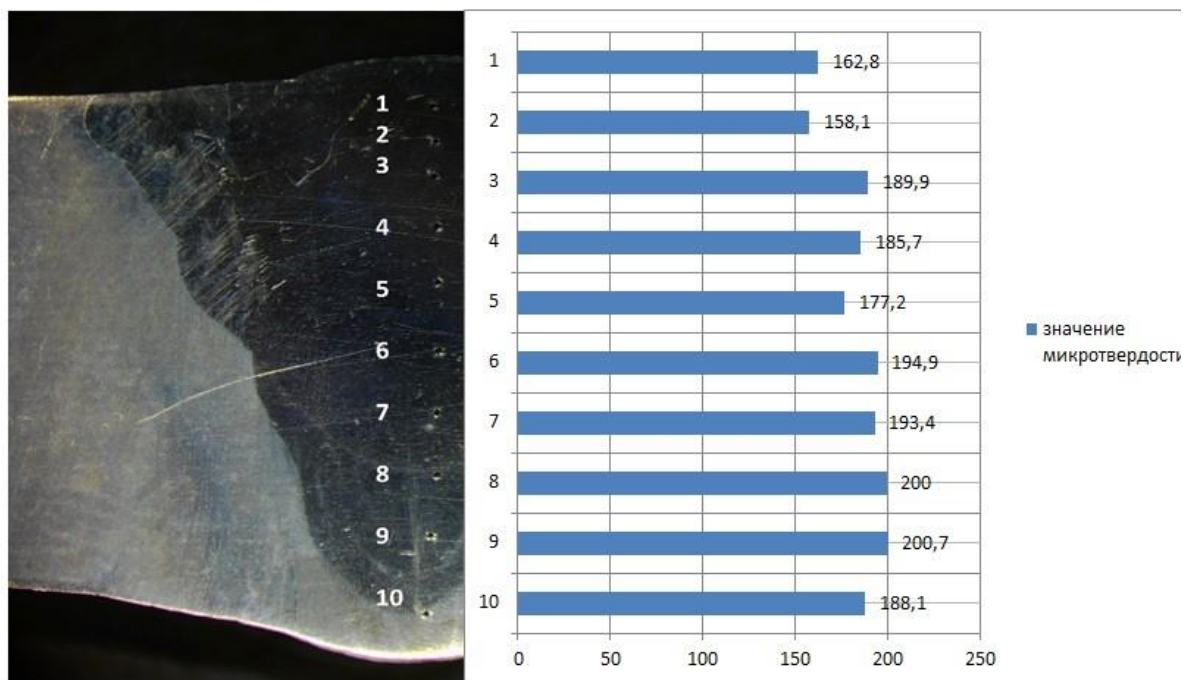


Рисунок 42 – Микротвердость сварного шва образца варианта 2

Также из полученных данных следует, то, что сварной шов находится в напряжении.

Образец варианта 2, показанный на рисунке 42, имеет более стабильную твердость на поперечном сечении шва. Значения твердости меньше, чем твердость образца 1. Следовательно, сварной шов на образце 2 более пластичен.

Полученная микротвердость сваренных образцов вариантов 1 и 2 в зоне сплавления – ЗТВ показана на рисунке 43 и 44.

## Микротвердость ЗТВ образца 1

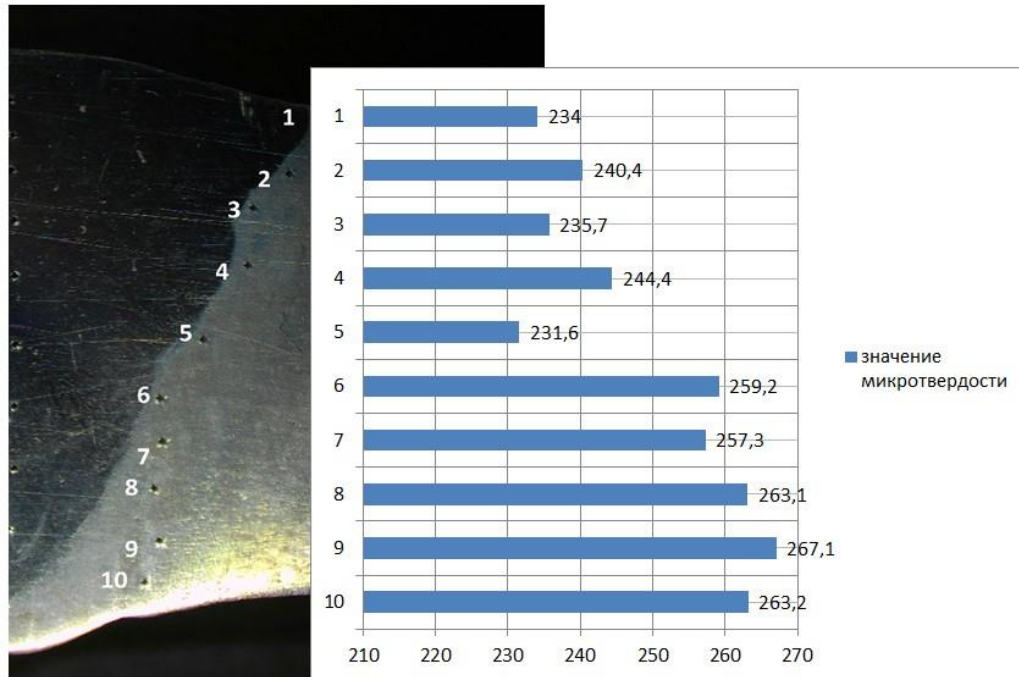


Рисунок 43 – Микротвердость ЗТВ образца варианта 1

## Микротвердость ЗТВ образца 2

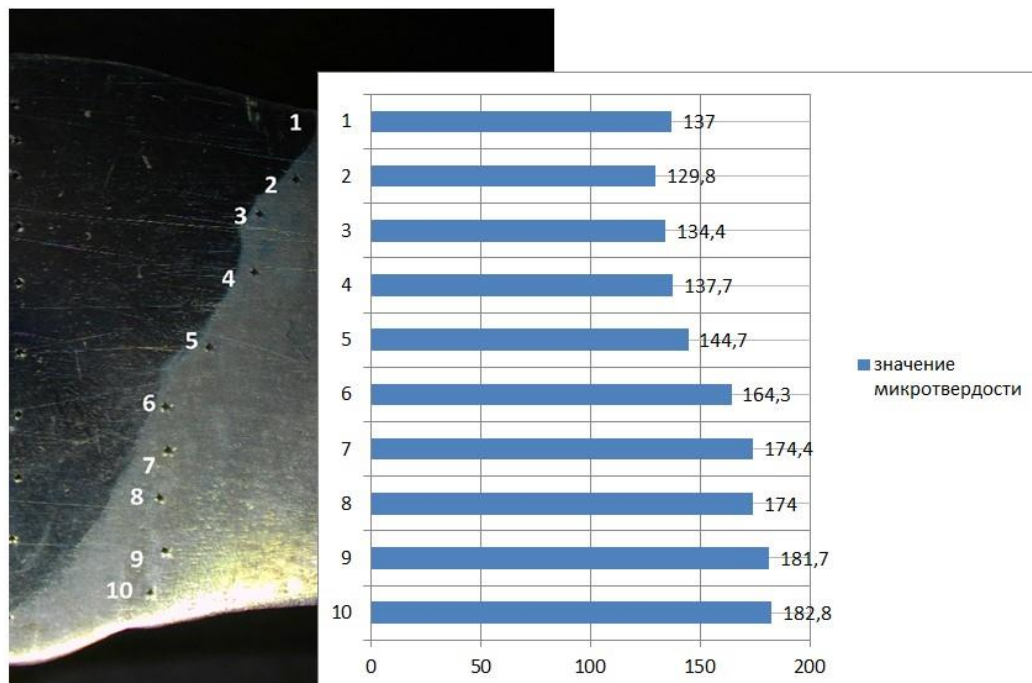


Рисунок 44 – Микротвердость ЗТВ образца варианта 2

Образец варианта 1, показанный на рисунке 43, в ЗТВ имеет неравномерные показатели твердости, что указывает на сильное напряжение в этой зоне. Повышенная твердость в точках 8 – 263,1 HV, 9 – 267,1 HV, 10 – 263,2 HV, измеренная в области корня сварного шва, свидетельствует о том, что преобладает в этих зонах твердый  $\gamma$ -раствор, а значит и жаропрочность. Образец варианта 2, показанный на рисунке 44, который выполнялся с последующей ТО после сварки, имеет правильную последовательность спадающей твердости к лицевому проходу сварки, в поперечном сечении сварного шва. Полностью сняты напряжения. Измеренная зона более пластичная, чем на образце варианта 1.

В графике зависимости микротвердости от ТО, показанная на рисунке 45, указаны средние значения показателей микротвердости измеряемой зоны.

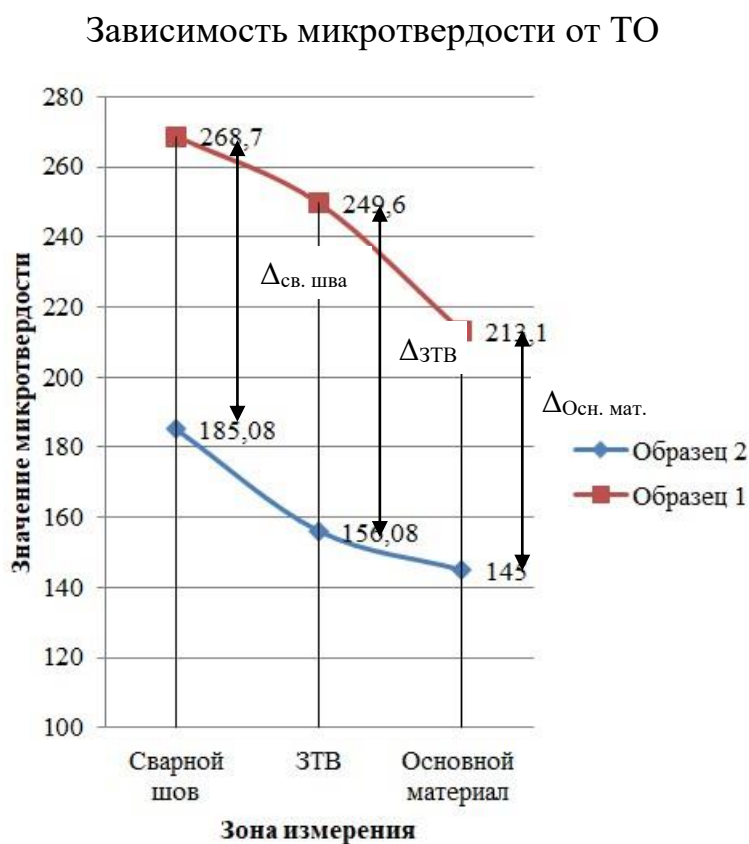


Рисунок 45 – Зависимость микротвердости от ТО

Разница между значениями микротвердости образцов варианта 1 и 2 является  $\Delta$ , которая показывает зависимость микротвердости от ТО и определяется по формуле:

$$\Delta = \Delta_1 - \Delta_2 \text{ (HV)} \quad (1)$$

где  $\Delta$  – разница микротвердости, HV;

$\Delta_1$  – среднее значение микротвердости образца 1, HV;

$\Delta_2$  – среднее значение микротвердости образца 2, HV.

Зависимость микротвердости от ТО в зоне сварного шва:

$$\Delta_{\text{Св.шва}} = 268,7 - 185,08 = 83,62\text{HV}.$$

Зависимость микротвердости от ТО в ЗТВ:

$$\Delta_{\text{ЗТВ}} = 249,6 - 156,08 = 93,52\text{HV}$$

Зависимость микротвердости от ТО в зоне основного материала:

$$\Delta_{\text{Осн.мат.}} = 213,1 - 145 = 68,1\text{HV}.$$

Таким образом, из рисунка 40 следует, что наибольшее сопротивление пластической деформации и наибольшую микротвердость имеет образец варианта 1, который не проходил последующую ТО.

#### **4.4 Результаты исследований сварных образцов на стойкость против к МКК**

Результаты испытаний загнутых образцов 1 и 2 показаны на рисунке 46.

По результатам испытаний на образце 1 не выявлены поперечные и продольные трещины на сгибе шва и ЗТВ, а на образце 2 невооруженным глазом были обнаружены поперечные трещины в месте сгиба.

Дополнительно на образце 1 для выявления микро трещин, визуально не подтвердившихся лупой с 10-кратным увеличением, проведен капиллярный контроль, класс чувствительности II по ГОСТ Р 50.05.09-2018 [16].



*a*



*б*

*a* – вариант 1; *б* – вариант 2  
Рисунок 46 – Результаты испытания на стойкость  
против к МКК методом ВУ



Во избежание зализывания механической шлифовкой трещин поверхность образца №1 не была повторно доведена до шероховатости Ra 3,2.

По результатам испытаний капиллярного контроля микро трещины в зоне сварного шва, ЗТВ и околошовной зоны не выявлены, но имеются следы пенитранта, как показано на рисунке 47. Следы пенитранта из-за пористости не были полностью удалены с контролируемой поверхности перед проявителем. Более того на контролируемой поверхности остался ворс ветоши.

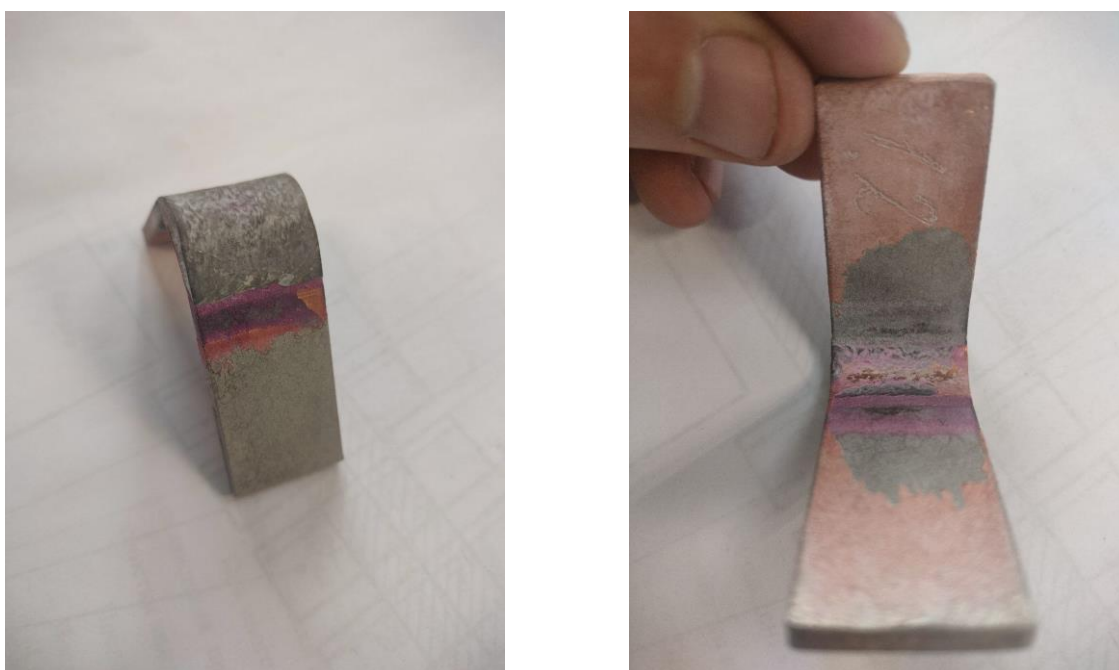


Рисунок 47 – Образец 1 после капиллярного контроля

#### 4.5 Результаты исследований сварных образцов на определение СФФ

Результаты среднего значения на исследуемых образцах каждой области СФФ приведены в таблице 10.

Таблице 10 – Результаты измерения СФФ

Номер образца	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4
1	0,12	0,12	0,07	0,09
2	0,31	0,45	0,07	0,11

После получения средних данных по СФФ были построены графики влияния ТО на основной материал и сварной шов.

На рисунке 48 показано влияние ТО на основной металл из сплава 10ХН45Ю.



Рисунок 48 – Зависимость СФФ основного металла от ТО

Естественно, что количество ферритной фазы строго зависит от химического состава, а именно от соотношения элементов ферритизаторов и аустенитизаторов.

Жаропрочные аустенитные стали при наличии даже незначительного количества феррита теряют свою жаропрочность. Таким образом, образец варианта 1 более жаропрочный на участке ЗТВ.

На рисунке 49 показано влияние ТО на ЗТВ сварного шва.



Рисунок 49 – Зависимость СФФ на ЗТВ сварного шва от ТО

Ферритная фаза положительно влияет на стойкость к горячим трещинам при дуговой сварке. Аустенитная структура обычно более чувствительна к кристаллизационным трещинам, чем ферритная, а потому желательно, чтобы свариваемый основной материал в своем составе содержал ферритизаторы. Они в свою очередь ответственны за количество ферритной фазы в структуре никелевых сплавов [1]. Хорошая свариваемость при дуговой сварке неплавящимся электродом СФФ должна составлять от 2 % до 5 %.

Зависимость СФФ на лицевом валике сварного шва от ТО



Рисунок 50 – Зависимость СФФ на лицевой валик сварного шва от ТО

Зависимость СФФ в корне сварного шва от ТО

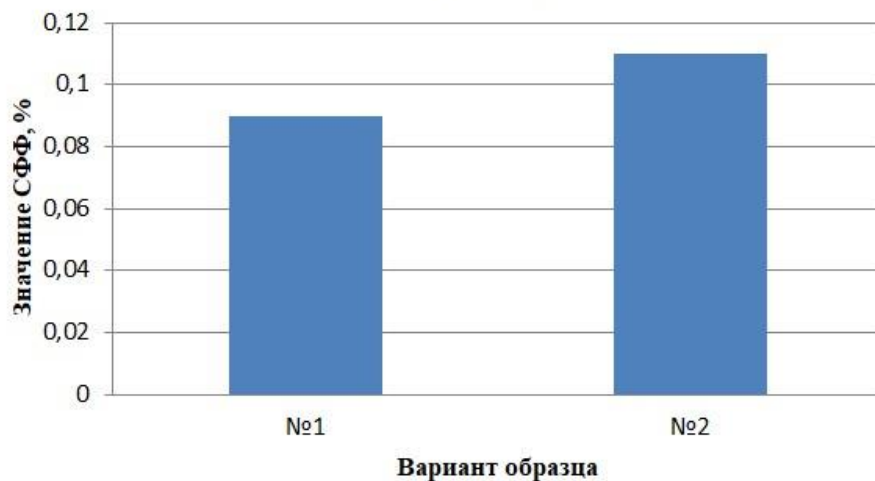


Рисунок 51 – Зависимость СФФ на корень сварного шва от ТО

Структура сплава 10ХН45Ю, сваренного с присадочным материалом ХН70Ю, однофазная аустенитная, характеризуется относительно развитыми столбчатыми кристаллитами, состоящими из дендритов с неразвившимися осями высших порядков. Влияние ТО, как показано на рисунках 50 и 51, на структуру сплава и сварного шва очень мало. Тем самым она не влияет на сварной шов сплава 10ХН45Ю. Результаты СФФ в сварном шве показали, что металл шва имеет запас аустенитности.

## Заключение

Основной задачей, решаемой в диссертации, являлось проведение исследований сварных соединений из жаропрочного и жаростойкого сплава на железоникелевой основе 10ХН45Ю аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом с присадочным материалом Св-ХН70Ю.

Из анализа свариваемости сплава и его технологических свойств установлено, что основными дефектами сварного соединения из данного сплава являются трещины и поры.

Выявлены основные причины и характер возникновения трещин в сварных соединениях, а именно, при сварке без подогрева возникают горячие трещины в сварочном кратере сразу после прекращения процесса сварки.

В результате проведения исследований были разработаны оптимальные режимы процесса сварки с применением общего подогрева изделий до температуры 250 – 300 °С. Кроме того, было установлено, что термообработка сварных соединений благоприятно сказывается на их технологической прочности и механических характеристиках.

Для оценки свойств сварных соединений, выполненных по технологиям сварки с подогревом и проведением последующей ТО и без применения этих мероприятий проводили разрушающий и неразрушающий контроль образцов, выполненный по режимам: режим №1 – образца варианта 1 без последующей ТО, режим №2 – образца варианта 2 с последующей ТО, процесс старение.

## Выводы

1. Установлено, что процесс ТО (старение) образца после аргонодуговой сварки неплавящимся электродом в инертном газе с присадочным материалом сваренный по режиму №2 не влияет на трещинообразование.

2. Установлено, что на образце варианта №2 сваренным по режиму №2 с последующей ТО ширина ЗТВ (до 7 мм) значительно больше, чем у сваренного образца №1, (до 4 мм). Из этого следует, что образец №2 при эксплуатации в большей степени подвергнут разрушению.

3. Микроструктура сваренных образцов варианта 1 без последующей ТО и 2 с последующей ТО включает, кроме твердой  $\gamma$ -фазы, еще и карбонитридную фазу. Содержание ферритной фазы в образцах менее 0,5% (норматив – не более 2%) – это говорит о высокой склонности к горячим трещинам при сварке и ТО.

4. Наибольшее сопротивление пластической деформации и наибольшую микротвердость в ЗТВ имеет образец 1. Кроме того, образец 1 показал стойкость против к МКК, чем образец №2.

5. Разработанный технологический процесс сварки сплава 10ХН45Ю был внедрен на предприятии по изготовлению нестандартного оборудования АО «НПФ «Сосны» г. Димитровград.

## Список используемых источников

1. Багрянский К. В., Кузьмин Г. С. Сварка никеля и его сплавов. М. : Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1993. 164 с.
2. Богомолова Н. А. Практическая металлография издание третье переработанное и дополненное: М. : 1987. 240 с. (Высшая школа).
3. Вербицкий А. А. Как подготовить диссертацию к защите. Высшее образование сегодня, № 4, 2008. С 54–59.
4. Волоченко В. Н., Макаров Э. Л., Шип В. В. Сварка и свариваемые материал. Справочник в трех томах. М.: Металлургия, 1991. 526 с.
5. Герасимова Л. П., Гук Ю. П. Практическая металлография. М. : Вологда: Инфра-инженерия, 2022. 320 с.
6. ГОСТ 7.82–2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов. Общие требования и правила составления. М., 2001. 27 с.
7. ГОСТ 2246–70 Проволока стальная сварочная. Технические условия. М., 2008. 19 с.
8. ГОСТ 5632–2014 Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. М., 2015. 50 с.
9. ГОСТ 2789–73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики М., 2018. 7 с.
10. ГОСТ 6032–2017 Стали и сплавы коррозионно-стойкие. Методы испытания на стойкость против межкристаллитной коррозии. М., 2017. 32 с.
11. ГОСТ 10157–2016 Аргон газообразный и жидкий. Технические условия. М., 2019. 21 с.
12. ГОСТ 14771–76 Дуговая сварка в защитном газе. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. М., 2007. 39 с.

13. ГОСТ Р 50.05.01–2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Контроль герметичности газовыми и жидкостными методами. М., 2018. 41 с.
14. ГОСТ Р 50.05.07–2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Радиографический контроль. М., 2018. 36 с.
15. ГОСТ Р 50.05.08–2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Визуальный и измерительный контроль. М., 2018. 44 с.
16. ГОСТ Р 50.05.09–2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Капиллярный контроль М., 2018. 20 с.
17. ГОСТ Р 53686–2009 Сварка. Определение содержания ферритной фазы в металле сварного шва аустенитных и двухфазных феррито-аустенитных хромоникелевых коррозионностойких сталей. М., 2011. 33с.
18. Григорович В. К. Твердость и микротвердость металлов. М. : Наука, 1976. 230 с.
19. Гуревич С. М. Справочник по сварке цветных металлов. К. : Наукова Думка, 1981. 596 с.
20. Драгунов Ю. Г., Зубченко А. С. Марочник сталей и сплавов. 4 переработанное издание. М. : ООО «Инновационное машиностроение», 2014. 1218 с.
21. Казаков Ю. В. Магистерская диссертация : учеб. пособие по выполнению выпускной квалификационной работы. Тольятти: ТГУ, 2017. 59 с.
22. Лукин В. И. Ковальчук В. Г., Иода Е. Н Сварка плавлением – основа сварочного производства // Авиационные материалы и технологии



электрон. науч. технический журн. 2017. С 130–143. URL: <https://journal.viam.ru/ru/archive/2017> (дата обращения: 20.09.2023).

23. Николаев Г. А., Волченко В. Н., Бернадский В. Н. Сварка и свариваемые материалы. Том 1 свариваемость материалов М. : Металлургия, 1991. 528 с.

24. НП-105–18 Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже. М., 2019. 80 с.

25. Шестопалова Л. П., Лихачева Т. Е. Металловедение: макро- и микроскопический анализ металлов : учебно-методическое пособие. М. : МАДИ, 2017. 57 с.

26. Штрикман М. М. Производственная инструкция. Дуговая сварка в среде защитных газов конструкционных, нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов ПИ 1.4.75–2000. М. : ОАО «НИИАТ», 2000. 114 с.

27. ОСТ 92-1186–81 Сварка дуговая деталей из металлов и сплавов в защитной среде инертных газов. Технические требования. М., 1981. 129 с.

28. ОСТ 95 39–2002 Оборудование для работы с радиоактивными средами. Сварные соединения. Правила контроля. М., 2002. 64 с.

29. ОСТ 95 10441–2002 Оборудование для работы с радиоактивными средами. Сварка. Основные положения. М., 2002. 187 с.

30. Плазменная сварка: характеристики и оборудование. [Электронный ресурс] URL: <https://vt-metall.ru/articles/plazmennaya-svarka/> (дата обращения: 14.11.2022).

31. Сорокин Л. И. Напряжение и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов // Сварочное производство : электрон. журн. 1999. №12. 21 с. <https://viam.ru/public/1996> (дата обращения: 20.07.2022).

32. Сорокин Л. И., Присадочные материалы для сварки жаропрочных никелевых сплавов (обзор). Часть 1 // Сварочное производство

: электрон. журн. 2002. №4. 16 с. <https://viam.ru/public/2002> (дата обращения: 11.07.2022).

33. Сорокин Л. И. Свариваемость жаропрочных сплавов, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях // Сварочное производство : электрон. журн.. 1996. №4. 21 с. <https://viam.ru/public/1996> (дата обращения: 15.07.2022).

34. Технологическая инструкция Origo Tig 4300iw AC/DC, 2016. 28 с.

35. XLIX Самарская областная студенческая научная конференция : С.: 2023. С. 34. [Электронный ресурс] URL: <https://osnk-sr.ru/win/49-win.pdf>. (дата обращения: 04.06.2023).

36. Guo XL, Yu JB, Li XF, Hou Y, Ren ZM. Effect of nitrogen content on microstructure and mechanical properties of cast nickel-based heat-resistant alloy. Institute of Materials, Minerals and Mining. 2018. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1080/03019233.2016.1253447> (дата обращения 02.11.2023).

37. Huet J-J. Possible fast-reactor casing material strengthened and stabilized by dispersion. Nuclear Energy Research Center. – Belgium. International journal. Powder Metallurgy. 1976. С. 208–215. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1179/pom.1967.10.20.010> (дата обращения 05.08.2023).

38. Kurtz W., Rappaz M., Trivedi R. Progress in modelling solidifying microstructures in metals and alloys. Part II. Institute of Materials, Minerals and Mining and ASM International Published by Taylor & Francis on behalf of the Institute and ASM International. 2021г. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1080/09506608.2020.1757894?journalCode=inrb> (дата обращения 10.11.2023).

39. Vale S.A. Corrosion-resistance of nickel-containing alloys in hydrofluoric acid, hydrogen fluoride and fluorine (ceb-5). A practical guide to the use of nickel-containing alloys №443. Nickel institute. 2020. 38 с.

40. Xiaoling Ma PerkinElmer. Direct Determination of Trace Elements in Nickel-Based Superalloys with the NexION 2000 ICP-MS. Shanghai, China. 2000. 7 с. URL: <https://resources.perkinelmer.com/lab-solutions/resources/docs/app-NexION-2000-ICP-MS-Trace-Elements-in-Nickel-Based-Superalloys.pdf> (дата обращения 15.04.2023).