

УДК 621.791.75:669.14

к.т.н. Гальцов И. А.

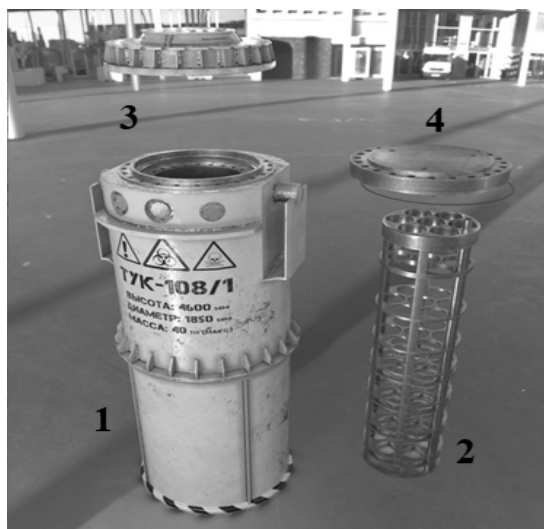
(САФУ им. М. В. Ломоносова, г. Северодвинск, РФ, galzow.igor@yandex.ru)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТРАНСПОРТНО-УПАКОВОЧНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ

Работа посвящена разработке новой технологии наплавки аустенитного облицовочного слоя внутренней крышки транспортно-упаковочного контейнера для перевозки и хранения отработанного ядерного топлива ледоколов и надводных кораблей. Предложена технология наплавки с регулируемым термическим циклом путем ввода в сварочную ванну дополнительной охлаждающей присадки ДХП.

**Ключевые слова:** наплавка, сталь, ядерное топливо, аустенит, феррит, внутренняя крышка, основной слой, наплавленный слой, диффузия, структура, фаза, наплавочная головка, коррозия.

В настоящее время актуальна проблема утилизации ядерного топлива, отслужившего свой срок, надводных кораблей и ледоколов с атомной энергетической установкой. Проблему составляет выгрузка, транспортировка к месту хранения и хранение активной зоны ядерных реакторов. Для решения этой проблемы разработаны металлобетонные контейнеры транспортно-упаковочного комплекта ТУК-108/1, МБК (рис. 1).



1 — силовой стакан; 2 — дистанционирующая решетка; 3 — внешняя крышка; 4 — внутренняя крышка

Рисунок 1 Транспортно-упаковочный контейнер для отработанного ядерного топлива ТУК-108/1

Металлобетонный контейнер транспортно-упаковочного комплекта ТУК МБК предназначен для длительного хранения и транспортировки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) атомных ледоколов и надводных кораблей с ядерными энергетическими установками.

Комплект упаковочный ТУК МБК обеспечивает возможность обращения с ОЯТ на всех этапах эксплуатации:

- транспортирование контейнера с предприятия-изготовителя к месту эксплуатации;
- подготовка и проведение загрузки (выгрузки) чехлов с ОЯТ;
- транспортировка контейнера с ОЯТ в вагонах;
- хранение ОЯТ в течение 50 лет.

По ОПБЗ-83 комплект упаковочный ТУК МБК относится к классу 1 по ядерной безопасности и к категории III по радиационной опасности. ТУК МБК относится к типу упаковки В(U).

Эксплуатационные характеристики упаковочного комплекта:

1. Масса упаковочного комплекта не более 38200 кг, в том числе:
  - контейнер — не более 35700 кг;
  - дистанционирующая решетка — не более 2500 кг.
2. Масса упаковочного комплекта с ОЯТ — не более 40000 кг.

3. Максимальное нормальное рабочее давление — не более 0,7 МПа.

4. Мощность эквивалентной дозы излучения:

– в нормальных условиях эксплуатации и транспортирования на поверхности ТУК МБК — не более 0,5 мЗв/ч (50 мбэр/ч);

– в аварийных ситуациях на расстоянии 1 м от поверхности ТУК МБК — не более 10 мЗв/ч (1 бэр/ч).

5. Допустимый температурный интервал эксплуатации — от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+38^{\circ}\text{C}$ .

6. Максимальная температура оболочек тепловыделяющих элементов — не более  $+350^{\circ}\text{C}$ .

7. Температура наружной стенки контейнера  $+60^{\circ}\text{C}$  при температуре окружающего воздуха  $+38^{\circ}\text{C}$ .

8. Среда внутри контейнера — воздух.

9. Назначенный срок службы составляет 50 лет.

Металлобетонный контейнер состоит из корпуса, дистанционирующей решетки, внутренней и наружной крышек (рис. 1).

Корпус контейнера состоит из внутреннего и силового стаканов с днищем и комингсом для размещения крышек.

Внутренний стакан состоит из четырех сварных обечаек и днища. Материал внутреннего стакана — коррозионностойкая сталь 08X18H10T.

Силовой стакан состоит из внутренней и наружной обечаек. Пространство между обечайками и внутренним стаканом заполнено особо прочным сверхтяжелым бетоном марки ОПБ-СТ, армированным металлическим каркасом.

Дистанционирующая решетка представляет собой сварную металлоконструкцию, состоящую из набора поперечных диафрагм различной толщины с отверстиями под чехлы.

Наружная крышка представляет собой сварную металлоконструкцию, внутренняя крышка — механически обработанная поковка. Наружная крышка крепится к комингсу при помощи 24 болтов М42. Внутренняя крышка крепится к комингсу при помощи 24 болтов М60.

Наиболее ответственным узлом ТУК МБК является внутренняя крышка, представляющая собой поковку из стали 09Г2СА-А ООО «ОМЗ-Спецсталь» ТУ 05764417-064-97 с наплавкой аустенитной стали 08X19H10Г2Б (рис. 1 и 2).

Основной слой ( $\varnothing 1068$  мм, толщиной 140 мм) 09Г2СА-А — сталь феррито-перлитного класса с температурой эксплуатации от  $+250$  до  $-60^{\circ}\text{C}$ , с гарантируемыми механическими свойствами  $\sigma_{0,2} = 347$  МПа,  $\sigma_B = 489$  МПа,  $\delta = 32\%$ ,  $KCV_{-50} = 200$  Дж/см<sup>2</sup>. Химический состав стали приведен в таблице 1.

Облицовочный слой (толщиной от 10 до 20 мм) 08X19H10Г2Б — сталь аустенитного класса с температурой эксплуатации от  $-160$  до  $+650^{\circ}\text{C}$ , механическими свойствами  $\sigma_{0,2} = 410$  МПа,  $\sigma_B = 520$  МПа,  $\delta = 28\%$ ,  $KCV_{+20} = 50$  Дж/см<sup>2</sup>. Химический состав стали приведен в таблице 2.

Двухслойные конструкции позволяют резко уменьшить потребление дефицитных высоколегированных сталей без снижения работоспособности конструкций, но технология их сварки требует применения специальных сварочных материалов для получения качественного и работоспособного наплавочного соединения [1, 2].

Для операции наплавки облицовочного слоя внутренней крышки ТУК МБК применяется ручная дуговая (РД) и автоматическая наплавка под слоем флюса (АДФ). Для наплавки используется схема (рис. 3). Постоянный ток обратной полярности.

Наибольшую трудность представляет наплавка перехода от основного слоя 09Г2СА-А к облицовочному 08X19H10Г2Б, так как разбавление этого слоя металлом основного (низколегированного) слоя резко снижает его коррозионные и механические свойства. Поэтому наплавку облицовочного слоя производят через подслой 07X25H13 (рис. 4), имеющий повышенную аустенитность, применяя наплавочные проволоки и электроды с повышенным содержанием никеля и хрома, компенсирующим разбавление наплавленно-го металла основным металлом.

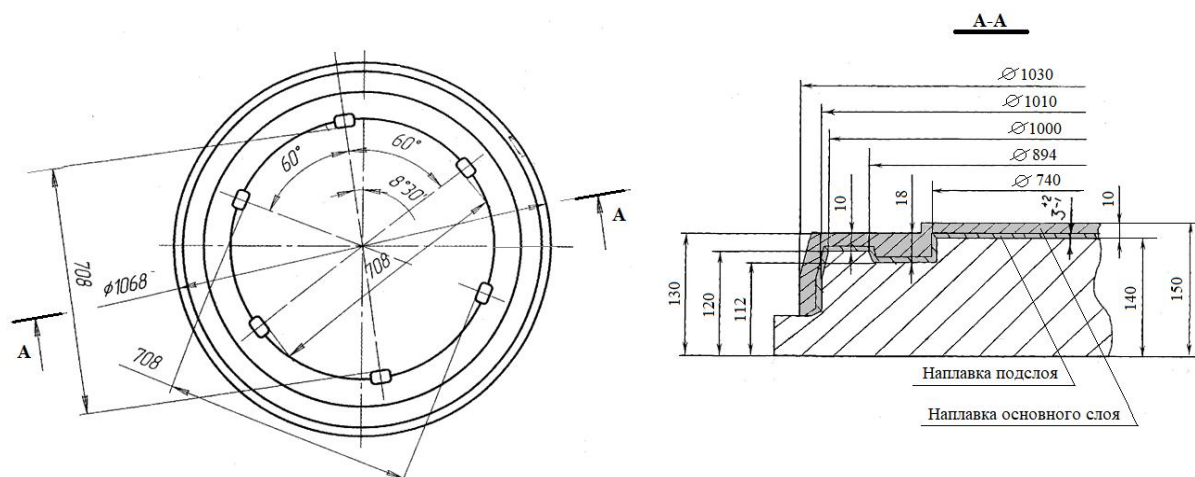


Рисунок 2 Эскиз внутренней крышки транспортно-упаковочного контейнера ТУК-108/1 (поверхность с наплавкой)

Таблица 1

Химический состав стали 09Г2СА-А

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
%							
0,07	0,62	1,48	0,007	0,004	0,11	0,21	0,25

Таблица 2

Химический состав стали 08Х19Н10Г2Б

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Nb
%							
0,05–0,1	0,2–0,45	1,8–2,2	≤0,03	≤0,02	18,5–20,5	9,5–10,5	0,9–1,3

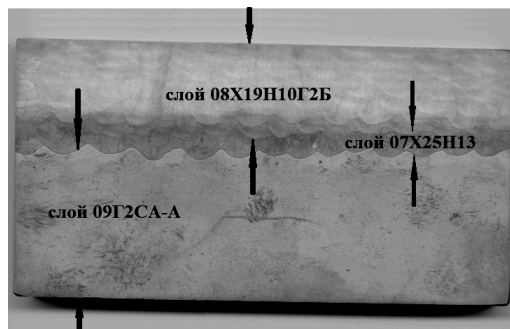
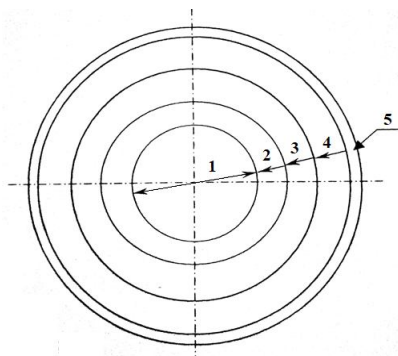


Рисунок 4 Расположение слоев на внутренней крышке ТУК МБК: основной слой 09Г2СА-А; переходной слой 07Х25Н13; облицовочный слой 08Х19Н10Г2Б



1 — диаметр наплавляемого участка 250–300 мм, наплавка от центра крышки к краю; 2–5 — длина наплавляемого участка 150–170 мм, наплавка от края крышки к центру

Рисунок 3 Порядок выполнения наплавки

При автоматической наплавке высоколегированного подслоя и облицовочного слоя используются проволоки Св-07Х25Н13 и Св-08Х19Н10Г2Б соответственно, флюс 480Ф-6М ОСТ5Р.9206-75.

При ручной дуговой наплавке высоколегированного подслоя используются электроды ЗИО-8  $d_{эл} = 4$  мм ГОСТ9466-75 с химическим составом наплавленного металла 10Х25Н13Г2. При ручной дуговой наплавке облицовочного слоя используются электроды ЭА-898/21Б  $d_{эл} = 4$  мм ГОСТ9466-75 с химическим составом наплавленного металла 08Х19Н10Г2Б.

Данная технология имеет ряд недостатков, которые значительно затрудняют наплавку облицовочного слоя:

– при наплавке переходного слоя от феррито-перлитной стали 09Г2СА-А к аустенитной 08Х19Н10Г2Б используются глубоко аустенитные сварочные материалы, с повышенным содержанием никеля и хрома. На формирование всего наплавочного соединения требуются наплавочные материалы двух видов, что приводит к удорожанию изготовления внутренней крышки;

– при автоматической и ручной дуговой наплавке переходного, облицовочного слоев накладывается большое количество валиков, которые при повторяющемся термическом цикле приводят к перегреву стали, активации диффузионных процессов на границе контакта 09Г2СА-А+08Х19Н10Г2Б, охрупчивая наплавочное соединение (рис. 5) [3].

В связи с этим *целью* настоящей работы явилась разработка ресурсосберегающей технологии наплавки и новых сварочных материалов, облицовочного слоя внутренней крышки транспортно-упаковочного контейнера (ТУК) для хранения отработанного ядерного топлива.

**Объект исследования** — наплавочное соединение из разнородной стали феррито-перлитного и аустенитного класса 09Г2СА-А+08Х19Н10Г2Б.

**Предмет исследования** — технология наплавки аустенитного облицовочного слоя внутренней крышки ТУК из стали 08Х19Н10Г2Б с регулируемым термическим циклом.

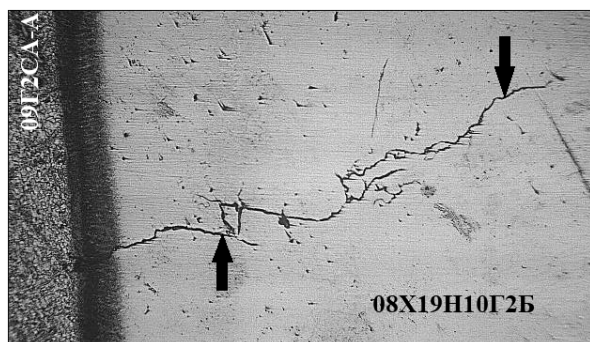


Рисунок 5 Микроструктура наплавки, границы раздела 09Г2СА-А+08Х19Н10Г2Б, трещина в области диффузионных процессов ( $\times 150$ )

#### **Задачи исследования:**

– выявление способов регулирования термического цикла дуговой наплавки разнородных сталей;

– разработка способа автоматической наплавки с увеличенной площадью поперечного сечения наплавляемого валика без увеличения энергозатрат;

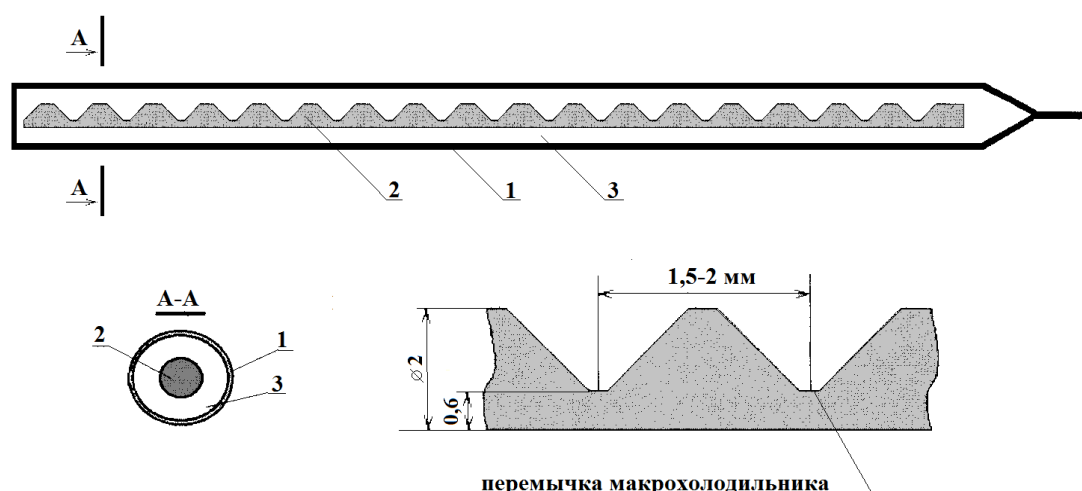
– разработка новых наплавочных электродов с возможностью регулировки термического цикла наплавки, увеличенной производительностью и коэффициентом наплавки.

**Разработка технологии наплавки с регулируемым термическим циклом.** С использованием принципа ресурсосбережения, экономного использования такого дорогостоящего и стратегически важного элемента, как никель, разработана новая технология наплавки переходного и облицовочного слоев внутренней крышки ТУК МБК с регулируемым термическим циклом. Технология основана на введении в жидкий металл сварочной ванны внутренних стоков тепла в виде дополнительной холодной охлаждающей присадки (макрохолодильников) ДХП [4].

**Ручная дуговая наплавка (РДН).** Регулирование теплового цикла ручной дуговой наплавки, переходного и облицовочного слоев, сталей 09Г2СА-А+ЗИО-8+ЭА-898/21Б (09Г2СА-А+Э-10Х25Н13Г2+Св-08Х19Н10Г2Б) осуществлялось применением специальных трубчатых электродов с макрохолодильником идентичного химического состава (рис. 6).

Способ реализуется следующим образом. В процессе наплавки корпус-трубка 1 и флюс 3 плавятся, температура дугового промежутка пережигает перемычку макрохолодильника 2, макрохолодильник попадает в наплавочную ванну, расплавляется и тем самым поглощает паразитное тепло наплавки.

Доля макрохолодильника в электроде составляет  $90 \div 100$  % от массы металла трубки электрода ( $ДХП_{\text{макр}} = 90 \div 100$  %). Скорость принудительного, сопутствующего охлаждения при этом процессе составила  $60\text{--}65$  градусов в секунду в интервале  $500\text{--}900$  градусов ( $W_{500\text{--}900}^{\text{охл}} = 60 \div 65$  °C/c).



1 — корпус электрода (трубка); 2 — макрохолодильник; 3 — полость трубки с флюсом

Рисунок 6 Трубчатый электрод с макрохолодильником,  $d_{эл} = 4$  мм

В результате анализа экспериментальных данных оптимальный режим РДН с регулируемым термическим циклом сварочной ванны приведен в таблице 3.

Применение способа ручной дуговой наплавки, с дополнительной холодной присадкой (макрохолодильником) позволяет на 48 % увеличить площадь поперечного сечения сварного валика (с  $F_{ш} = 16 \text{ мм}^2$  до  $F_{ш} = 30 \text{ мм}^2$ ), (рис. 7, а, б), тем самым на 25 % уменьшить количество наложения наплавочных валиков без увеличения погонной энергии сварки. Использование макрохолодильников в наплавочных материалах РДН позволило исключить использование более дорогих электродов ЗИО-8 (Э-10Х25Н13Г2) при сварке переходного слоя с заменой их на электроды ЭА-898/21Б (Св-08Х19Н10Г2Б), обеспечивая оптимальную аустенитно-ферритную структуру наплавочных валиков. Содержание в структуре магнитной фазы составило 5 %.

**Характеристики электродов РДН:** электрод ЗИО-8, ЭА-898/21Б; покрытие основное; коэффициент наплавки — 12,0 г/А·ч; производительность наплавки ( $d_{эл} = 4$  мм) — 1,6 кг/ч; расход электродов на 1 кг наплавленного металла — 1,8 кг.

**Характеристики электродов с дополнительной холодной присадкой (макрохолодильником) РДН:** ДХП<sub>макр.</sub> = 90÷100 %; электрод ЭА-898/21Б; корпус трубчатый 08Х19Н10Г2Б; флюс основной; макрохолодильник — Св-08Х19Н10Г2Б (стержневой  $\varnothing 2$  мм, с насечкой  $L = 1,5-2$  мм) (рис. 6); коэффициент наплавки — 19,0 г/А·ч; производительность наплавки ( $d_{эл} = 4$  мм) — 2,6 кг/ч; Расход электродов на 1 кг наплавленного металла — 1,3 кг.

Таблица 3

Режимы РДН переходного, облицовочного слоев с дополнительной холодной присадкой (макрохолодильником)

РДН + ДХП <sub>макр.</sub> = 90 ÷ 100 % (постоянный ток обратной полярности)					
Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, см/мин	Погонная энергия, кДж/см	Межваликовая температура, °С
3,0	90–110	21–22	70	15,1	30
4,0	130–140	22–23	170	8,1	50–60

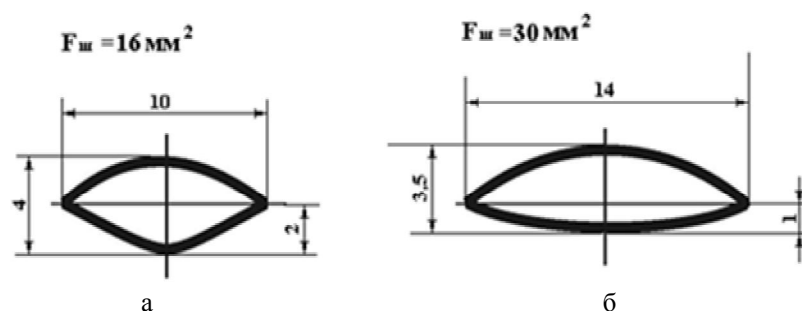


Рисунок 7 Изменение геометрических параметров при ручной дуговой наплавке (РДН)  $d_{эл} = 4$  мм:  
а — РДН обычным способом; б — РДН с дополнительной холодной присадкой  
(макрохолодильником) ( $ДХП_{макр} = 90 \div 100$  %)

**Автоматическая наплавка под слоем флюса АФН.** Регулирование теплового цикла автоматической дуговой наплавки, переходного и облицовочного слоев, сталей 09Г2СА-А+Св-07Х25Н13+Св-08Х19Н10Г2Б+флюс 48ОФ-6М осуществлялось вводом дополнительной холодной присадочной проволоки (ДХП) идентичного химического состава с основной проволокой в жидкий металл наплавочной ванны (рис. 8 и 9). Доля дополнительной холодной проволоки составляла  $90 \div 100$  % от массы основной наплавочной проволоки ( $ДХП = 90 \div 100$  %). Диаметр дополнительной холодной проволоки равен диаметру основной наплавочной проволоки  $d_{эл} = d_{ДХП} = 4$  мм. Скорость принудительного, сопутствующего охлаждения при этом процессе составила  $60\text{--}65$  градусов в секунду в интервале  $500\text{--}9000$  ( $W_{500-900}^{охл} = 60 \div 65$  °C/с). В процессе наплавки основная наплавочная проволока и дополнительная холодная подаются из отдельных сварочных горелок.

Применение автоматической наплавки под слоем флюса с дополнительной холодной присадкой АФНдхп позволяет на  $67$  % увеличить площадь поперечного сечения сварного валика (с  $F_{ш} = 45$  мм<sup>2</sup> до  $F_{ш} = 67$  мм<sup>2</sup>) (рис. 10, а, б), тем самым уменьшить количество наложения наплавочных валиков на  $48$  % без увеличения погонной энергии сварки.

Использование при автоматической наплавке под слоем флюса (АФН) дополнительной холодной присадки АФНдхп по-

зволило исключить применение более дорогой проволоки Св-07Х25Н13 при сварке переходного слоя с заменой на проволоку Св-08Х19Н10Г2Б, обеспечивая аустенитно-ферритную структуру наплавочных валиков. Содержание в структуре магнитной фазы составило  $8$  %.

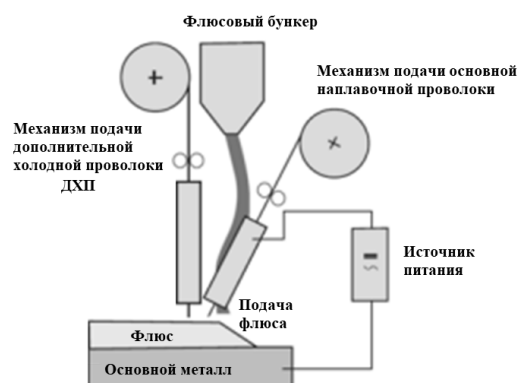


Рисунок 8 Схема процесса автоматической наплавки с дополнительной холодной присадочной проволокой (АФНдхп)



Рисунок 9 Процесс автоматической наплавки с дополнительной холодной присадочной проволокой (АФНдхп) в условиях цеха

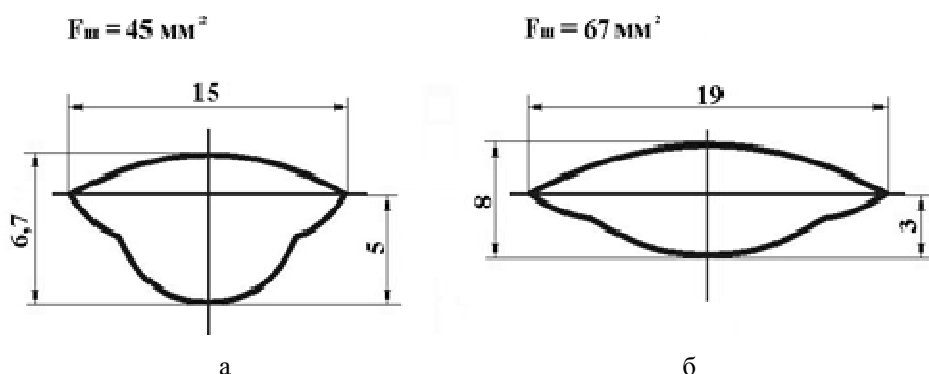


Рисунок 10 Изменение геометрических параметров при автоматической наплавке под слоем флюса (АФН): а — АФН обычным способом; б — АФНдхп с дополнительной холодной присадкой (ДХП=90÷100 %)

**Характеристики процесса АФ наплавки:** проволока  $d_{эл}=4$  мм Св-07Х25Н13, Св-08Х19Н10Г2Б; коэффициент наплавки 14÷16 г/А·ч.

**Характеристики процесса АФНдхп наплавки** с дополнительной холодной присадкой: ДХП=90÷100 %; проволока Св-04Х19Н11М3  $d_{эл}=4$  мм, подается одновременно с основной проволокой из дополнительной бухты сварочного автомата; коэффициент наплавки — 22,5 г/А·ч.

В результате анализа экспериментальных данных оптимальный режим АФНдхп наплавки с дополнительной холодной присадкой приведен в таблице 4.

Таблица 4

Режимы АФН переходного и облицовочного слоев с дополнительной холодной присадкой

АФН + ДХП = 90 ÷ 100 % (постоянный ток обратной полярности)					
Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, см/мин	Погонная энергия, кДж/см	Межваликовая температура, °С
4,0	440-460	27-29	50-54	12,4	23

**Закключение.** На образование дугового наплавочного соединения тратится только четверть от общей теплоты дуги, а большая её часть расходуется на перегрев наплавочной ванны, нагрев изделия, его деформацию, диффузию химических элементов между слоями, что приводит к ухудшению свойств наплавочного слоя. Для решения этой проблемы была разработана и исследована оптимальная технология наплавки переходного и облицовочного слоев внутренней крышки ТУК МБК, состоящей из сталей 09Г2СА-А+08Х19Н10Г2Б, с вводом в жидкий металл наплавочной ванны дополнительной холодной присадки ДХП (макрохолодильников), позволяющая рационально использовать всю теплоту сварочной дуги, получать качественные наплавочные соединения.

Использование дуговой наплавки ДХП позволяет увеличить площадь поперечного сечения наплавочного валика, тем самым уменьшить количество проходов и тепловое воздействие на сталь при формировании разнородного соединения без увеличения погонной энергии сварки.

Применение дополнительной холодной присадки (макрохолодильников) дает возможность исключить использование дорогих электродов (с высокой аустенитностью) при наплавке переходного слоя с заменой их на экономнолегированные по хрому и никелю электроды, обеспечивая качествен-

ную аустенитно-ферритную структуру наплавочных валиков.

Преимущества наплавки с охлаждающей присадкой:

- повышение аустенитности металла шва на 15 % (понижение доли участия основного феррито-перлитного металла и увеличение доли участия наплавленного аустенитного);

- возможность наплавки основного аустенитного слоя без переходного подслоя;

- уменьшение зоны термического влияния и зоны пластических деформаций (ввод в наплавочную ванну внутренних источников теплопоглощения);

- повышение прочности наплавленного слоя (дезориентация дендритно-столбчатой структуры литого состояния металла);

- уменьшение вероятности образования диффузионных процессов общей и межкристаллитной коррозии (уменьшение времени пребывания соединения в опасном интервале температур  $T_{кр} = 425 \div 900$  °С);

- повышенная стойкость, наплавленного слоя, против образования холодных и горячих трещин;

- высокий уровень механических свойств.

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. На образование наплавочного соединения тратится только четверть от общей теплоты дуги, а большая её часть расходуется на перегрев наплавочной ванны, нагрев изделия, его деформацию, диффузию химических элементов между слоями, что приводит к ухудшению свойств наплавочного слоя.

2. Разработана и исследована оптимальная технология ручной дуговой и автоматической под слоем флюса наплавки разнородного соединения, состоящего из сталей 09Г2СА-А+08Х19Н10Г2Б, с вводом в жидкий металл наплавочной ванны дополнительной холодной присадки ДХП (макрохолодильников), позволяющая рационально использовать всю теплоту дуги, получать качественные наплавочные соединения.

3. Наплавочные соединения разнородных сталей феррито-перлитного и аустенитного классов, полученные дуговой наплавкой с дополнительной холодной присадкой (макрохолодильником) характеризуются:

- повышенной стойкостью против образования холодных и горячих трещин;

- высоким уровнем механических свойств.

### Библиографический список

1. Патон, Б. Е. Многослойная сталь в сварных конструкциях [Текст] / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко. — Киев : Техника, 1984. — 284 с.

2. Закс, И. А. Сварка разнородных сталей [Текст] / И. А. Закс. — Л. : Машиностроение, 1973. — 208 с.

3. Гальцов, И. А. Сварка плакированной стали [Текст] : монография / И. А. Гальцов, А. В. Каленская. — Тамбов : Минобрнауки России, САФУ им. М. В. Ломоносова, 2021. — 164 с.

4. Гальцов, И. А. Применение ИСЕ-технологии при ремонтной наплавке крановых колес [Текст] / И. А. Гальцов, А. Н. Воробьев // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. — Луганск : Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2022. — № 1 (38). — С. 42–48.

© Гальцов И. А.

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ТМиМ  
САФУ им. М. В. Ломоносова Фоминым Е. В.,  
к.т.н., доц., зав. каф. ОМДМ ДонГТИ Денищенко П. Н.

Статья поступила в редакцию 10.11.2022.



**PhD in Engineering Galtsov I. A.** (*NArFU named after M. V. Lomonosov, Severodvinsk, the Russian Federation, galzow.igor@yandex.ru*)

**IMPROVING THE TECHNOLOGY OF SURFACING THE HETEROGENEOUS STEELS IN PRODUCTION OF TRANSPORT AND PACKAGING CONTAINERS**

*The work is devoted to the development of a new technology for surfacing the austenitic lining layer of the inner cover of a transport and packaging container for the transportation and storage of spent nuclear fuel of icebreakers and surface ships. The technology of surfacing with an adjustable thermal cycle by introducing an additional cooling additive ACA into the welding bath is proposed.*

**Key words:** *surfacing, steel, nuclear fuel, austenite, ferrite, inner cover, base layer, weld pad, diffusion, structure, phase, surfacing port end, corrosion.*