

УДК 621.791.92:621.039

## РАЗРАБОТКА ПРОГРЕССИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ОДНОСЛОЙНОЙ НАПЛАВКИ ПОД ФЛЮСОМ АУСТЕНИТНЫМ ЛЕНТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

*К. Г. Таранова, Р. Б. Агулиев, Ю. В. Поletaев*

Донской государственной технической университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Статья посвящена обоснованному выбору способа прогрессивной однослойной электродуговой наплавки антикоррозионного покрытия ленточным электродом под флюсом толстостенных сварных конструкций теплового и атомного машиностроения. Цель работы заключается в разработке ресурсосберегающей технологии однослойной антикоррозионной наплавки ленточным электродом под флюсом, обеспечивающей повышение качества формирования наплавленного слоя и зоны термического влияния при меньшем расходе сварочных материалов по сравнению с применяемой двухслойной наплавкой при изготовлении корпусного оборудования энергетических установок.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ основных требований к наплавленным соединениям и оценка технологических схем нанесения наплавки;
- природа и механизм образования поднаплавочных трещин;
- влияние технологических факторов на качество формирования наплавленного соединения.

Выполнен анализ недостатков существующей технологии двухслойной антикоррозионной наплавки. Сформулированы технологические мероприятия по их устранению. Разработка технологии осуществлена на основании технологических рекомендаций и требований нормативно-технических документов применительно к выполнению антикоррозионной наплавки внутренней поверхности гидроемкости САОЗ установки ВВЭР-1000.

**Ключевые слова:** наплавка, способ ленточной дуговой наплавки, наплавка многослойная, трещины повторного нагрева, наплавка однослойная, техника наплавки.

## DEVELOPMENT OF A PROGRESSIVE TECHNOLOGY FOR SINGLE-LAYER SUBMERGED ARC WELD CLADDING WITH AN AUSTENITIC BAND ELECTRODE

*K. G. Taranova, R. B. Aguliev, Yu. V. Poletaev*

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

The article is devoted to the reasonable choice of a method for progressive single-layer submerged arc weld cladding of anticorrosive coating with a band electrode with thick-walled welded structures of thermal and atomic engineering. The aim of this work is to develop resource-saving technologies of single-layer anticorrosive clad strip electrode submerged arc, providing improvement of quality of formation of the deposited layer and heat affected zone with less consumption of welding materials than the two-layer welding in the manufacture of structural units for power plants.

To achieve this goal the following tasks were solved:

- analysis of key requirements for weld connections and the assessment of technological schemes of application of surfacing;
- nature and mechanism of formation of submerged cracks;
- influence of technological factors on the quality of formation of the surfaced joint.

The analysis of disadvantages of the existing technology of two-layer anti-corrosion surfacing is performed. Technological measures for their elimination are formulated. The technology was developed on the basis of technical recommendations and requirements of normative and technical documents in relation to the implementation of anticorrosive surfacing of the internal surface of the SAHO hydroelectric capacity of the VVER-1000 plant.

**Keywords:** surfacing, tape arc surfacing, multi-layered surfacing, reheating cracks, single-layer surfacing, surfacing technique.

**Введение.** Хрупкое межзеренное разрушение наплавленных соединений при выполнении термической обработки оборудования АЭС с целью снятия остаточных сварочных напряжений во многих случаях было неожиданным (рис. 1).

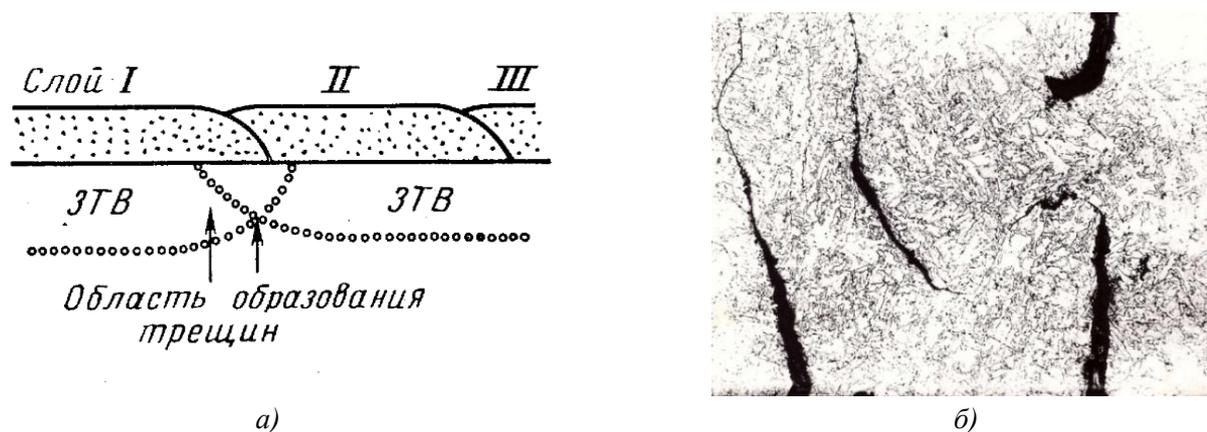


Рис. 1. Области ЗТВ, подверженные образованию поднаплавочных трещин (а); общий вид трещин (б)

Впервые эти повреждения были выявлены в металле зоны термического влияния (ЗТВ) перлитной стали, на участке, непосредственно прилегающем к антикоррозионной наплавке [1–3]. Их формирование наблюдали после выполнения ТО, а также после наплавки второго слоя ленточным аустенитным электродом. В литературе [4–7] этот вид разрушения получил название «растрескивание при повторном нагреве» (reheat cracking).

В обзоре [5] сообщалось, что наибольшую склонность к растрескиванию проявляют сварные соединения низколегированных сталей, применяемые для создания корпусного оборудования и трубопроводов тепловых и атомных энергетических установок. Так, повторяющиеся случаи растрескивания металла ЗТВ наплавленных соединений днища гидроемкости САОЗ реакторной установки ВВЭР-1000 явились неожиданной и серьезной технологической проблемой [1].

Считается, что появление поднаплавочных трещин можно предотвратить путем применения специальных технологий, например нормализацией площади перегрева зоны термического влияния с помощью двухслойной наплавки. В этом случае первый слой наплавляют при низкой тепловой мощности, а второй, наоборот, при высокой, чтобы область нормализации была как можно шире. Перегретую область можно нормализовать и индукционным поверхностным нагревом (с помощью индуктора) вместо наплавки второго слоя. Однако эти способы являются недостаточно эффективными, а также усложняющими и удорожающими технологию изготовления антикоррозионной наплавки.

Основной целью данной работы является разработка прогрессивной ресурсосберегающей технологии однослойной антикоррозионной наплавки ленточным электродом днища ГЕ САОЗ взамен двухслойной наплавки. При разработке технологических рекомендаций авторы руководствовались требованиями нормативно-технических документов [8–9].

**Выбор сварочных (наплавочных) материалов.** Независимо от наличия сертификата должна осуществляться проверка химического состава (на соответствие марки) каждой плавки наплавочной ленты спектральным (стилюскопированием) или другим методом. Наплавочная лента перед эксплуатацией должна быть очищена от следов ржавчины, масла и других загрязнений. Контроль производится внешним осмотром.

Однослойную одноэлектродную антикоррозионную наплавку можно выполнять ленточным электродом марки Нп 03Х22Н11Г2Б (ЭП 799) или Св 03Х24Н13Г2Б (ЭИ 898) под флюсами ОФ-10 или ФЦ-18; марки Св 03Х15Н35Г7М6Б (ЭП 855) под флюсом ОФ-10; марки Св 07Х25Н13 под флюсом ОФ-10 или ФЦ-18.

Флюсы марок ОФ-6, ОФ-10, ФЦ-17 или ФЦ-18 перед использованием должны быть прокалены и впоследствии храниться в герметичной таре или специальных кладовых. Кладовые для хранения прокалённых флюсов должны иметь температуру воздуха не ниже  $+18^{\circ}\text{C}$  и относительную влажность не менее 50%. Выдача наплавочных материалов производится под контролем отдела технического контроля (ОТК).

**Подготовка поверхности деталей под наплавку.** Поверхности для наплавки должны быть механически обработаны (зачищены абразивным инструментом). Шероховатость поверхности не более 12,5 Ra. Контроль наплавляемых поверхностей осуществляется методами капиллярной или магнитопорошковой дефектоскопии. Перед началом наплавки детали необходимо обезжирить уайт-спиритом или другими обезжиривающими средствами.

**Оборудование для наплавки.** Характеристики применяемых наплавочных установок и постов, снабжённых источниками питания постоянного тока, должны гарантировать стабилизацию требуемых режимов наплавки; манипуляторы и роликовые стелы должны обеспечивать надёжную фиксацию на них и плавное перемещение (вращение) наплавляемых деталей. Установки для автоматической наплавки должны быть снабжены контрольно-измерительными приборами для определения силы тока, напряжения, скорости наплавки (рис. 2).

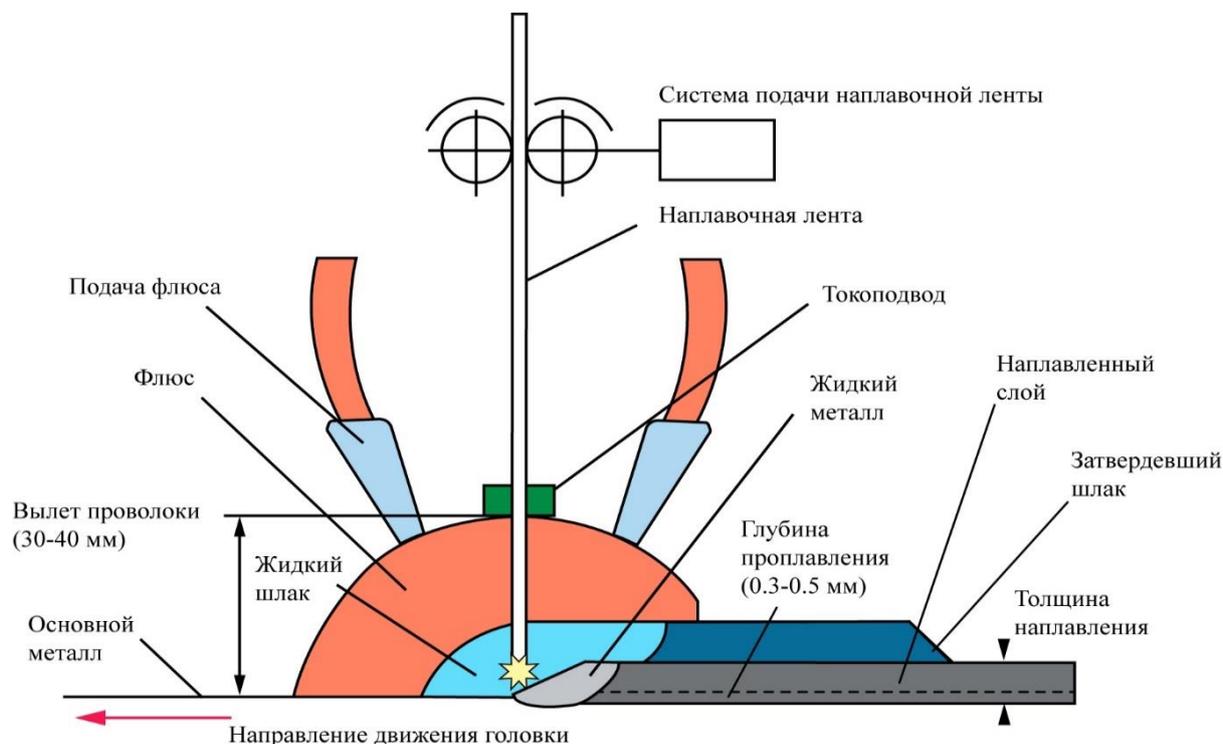


Рис. 2. Схема процесса ленточной наплавки

**Технологические варианты процесса наплавки.** Наплавка должна осуществляться при температуре окружающей среды не ниже +5°C. Температура предварительного и сопутствующего подогревов, определяемая в зависимости от марки основного металла, толщины наплавляемых изделий и метода наплавки, должна соответствовать данным табл. 1 и условиям нагрева. Наплавленные узлы и детали должны пройти термообработку (отпуск). Отпуск допускается совмещать с отпуском сварных соединений. Время пролеживания между окончанием наплавки и термообработкой, а также температура наплавленного узла не ограничиваются.

Таблица 1

Температура предварительного и сопутствующего подогрева  
(при наплавке первого слоя-прохода)

Марка основного материала	Вид применяемых присадочных материалов	Антикоррозионная наплавка и наплавка уплотнительных поверхностей-пооясков		Наплавка кромок под сварку	
		Номинальная толщина наплавляемого изделия (детали), мм	Минимальная температура предварительного и сопутствующего подогрева, °С	Номинальная толщина наплавляемого изделия (детали), мм	Минимальная температура предварительного и сопутствующего подогрева, °С
22К	Лента	Независимо	-	До 60 вкл. Свыше 60	-
	Покрытые электроды или проволока				100
10ГН2МФ Ф	Лента	До 100 вкл. Св. 100	- 50	До 50 вкл. Свыше 50	50
10ГН2МФ АА	Покрытые электроды или проволока	До 50 вкл. Свыше 50	- 50		120

Перед началом наплавки конических, сферических и эллипсоидальных поверхностей необходимо составить таблицу корректировки скорости наплавки и смещения электрода от зенита (в соответствии с изменением диаметра и радиуса кривизны наплавляемой поверхности) (табл. 2).

Таблица 2

Величина смещения от зенита в зависимости от диаметра  
наплавленной (внутренней) поверхности

Диаметр наплавленной внутренней поверхности, мм	Величина смещения от зенита, мм
500...1000	30...45
1000...2000	40...60
2000...3000	55...75
3000...4000	60...90
4000...5000	70...100
5000	90...135

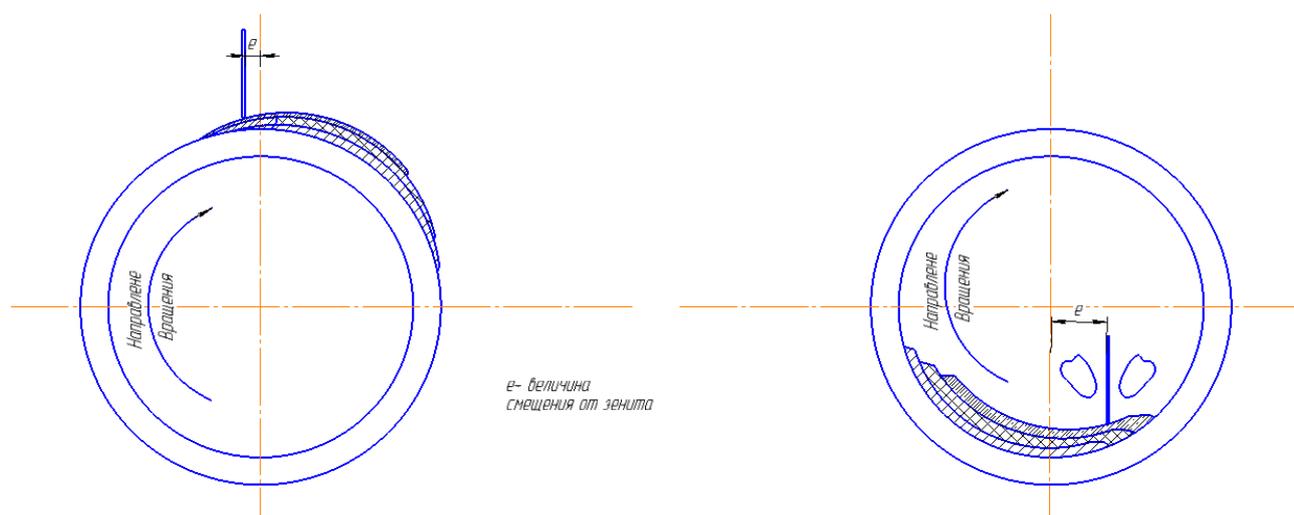


Рис. 3. Схема установки ленточного электрода зенита при наплавке поверхностей вращения

Торец ленточного электрода необходимо обрезать с одной или двух сторон под острым углом и заложить свободный вылет плоского ленточного электрода 35–40 мм. Установить флюсоподающие лотки (воронки) таким образом, чтобы их срез был ниже торца токопроводящих губок на 10–20 мм. Наплавка поверхностей вращения должна происходить со смещением плоскости ленточного электрода от зенита «на подъем» или «на спуск». Наплавка внутренних поверхностей производится «на подъем» (рис. 3), при этом величина смещения должна соответствовать табл. 2, а наружных — «на спуск», при величине смещения 0...30 мм.

Наплавка на наружную поверхность  
(наплавка на спуск)

Наплавка на внутреннюю поверхность  
(наплавка на подъем)

Рекомендуемые режимы одноэлектродной наплавки ленточным электродом приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры режимов одноэлектродной однослойной наплавки под флюсами марок оф-10 и ФЦ-18 ленточными электродами марок Нп-03Х22Н11Г2Б (ЭП 799) и Св-03Х24Н13Г2Б (ЭП 955)

Сечение ленты, мм	Сварочный ток, А		Напряжение, В		Скорость наплавки, м/ч.	
	оф -10	ФЦ-18	оф -10	ФЦ-18	оф -10	ФЦ-18
0,5*20	250-300	250-300	32-36		6-8 (7-9)*	
0,5*25	300-350	300-350				
0,5*40	500-550	500-550				
0,5*50	600-650	600-650				
0,5*60	700-750	700-750				
0,5*65	750-800	750-800				
0,5*75	900-1000	900-1000				
0,7*20	250-300	250-300	32-36	30-34	6-8 (8-10)*	6-8 (8-10)*
0,7*25	350-400	350-400				
0,7*40	550-600	550-600				
0,7*50	650-700	650-700				
0,7*60	800-850	800-850				
0,7*65	850-900	850-900				
0,7*75	950-1050	950-1050				

Наплавка поверхностей вращения производится по следующим технологическим вариантам (рис. 4):

1. Наплавка кольцевыми валиками:

— процесс наплавки заканчивается на начальном участке наплавляемого валика.

2. Наплавка слаломом:

— процесс осуществляется непрерывно по кольцу с перемещением электрода на величину шага наплавки после каждого оборота детали (рис. 4в).

3. Наплавка раздвинутыми валиками:

— процесс наплавки осуществляется по варианту наплавки слаломом, но с перемещением электрода на величину двух или трех шагов наплавки (рис. 4г).

4. Наплавка по спирали:

— процесс наплавки осуществляется непрерывно, с постоянным перемещением головки в направлении вдоль образующей наплавляемой детали (рис. 4д).

Величину шага наплавки (рис. 4а) рекомендуется определять по формуле:

$$A_{n+1} = (n + 1) \cdot (b - K) - K,$$

где  $A_{n+1}$  — шаг наплавки, мм;

$n$  — количество валиков, которое необходимо наплавить при последующем заполнении промежутка между соседними валиками;

$b$  — ширина валика, мм;

$K$  — перекрытие кромок соседних валиков, мм.

Величина смещения головки (шага) при наплавке слаломом с одинарным шагом ( $n=0$ ) (рис. 4в), определяется по формуле

$$A_1 = b - K.$$

Перекрытие кромок соседних валиков при наплавке плоским ленточным электродом лучше всего устанавливать не менее 5 мм. Верхняя граница величины перекрытия кромок устанавливается исходя из требований обеспечения ровной поверхности наплавляемого слоя.[10] После каждой остановки процесса наплавки необходимо осуществлять выборку — вышлифовку кратерного участка (на длине 60...70 мм уровня наплавляемой поверхности с плавным переходом к наплавленному валику).

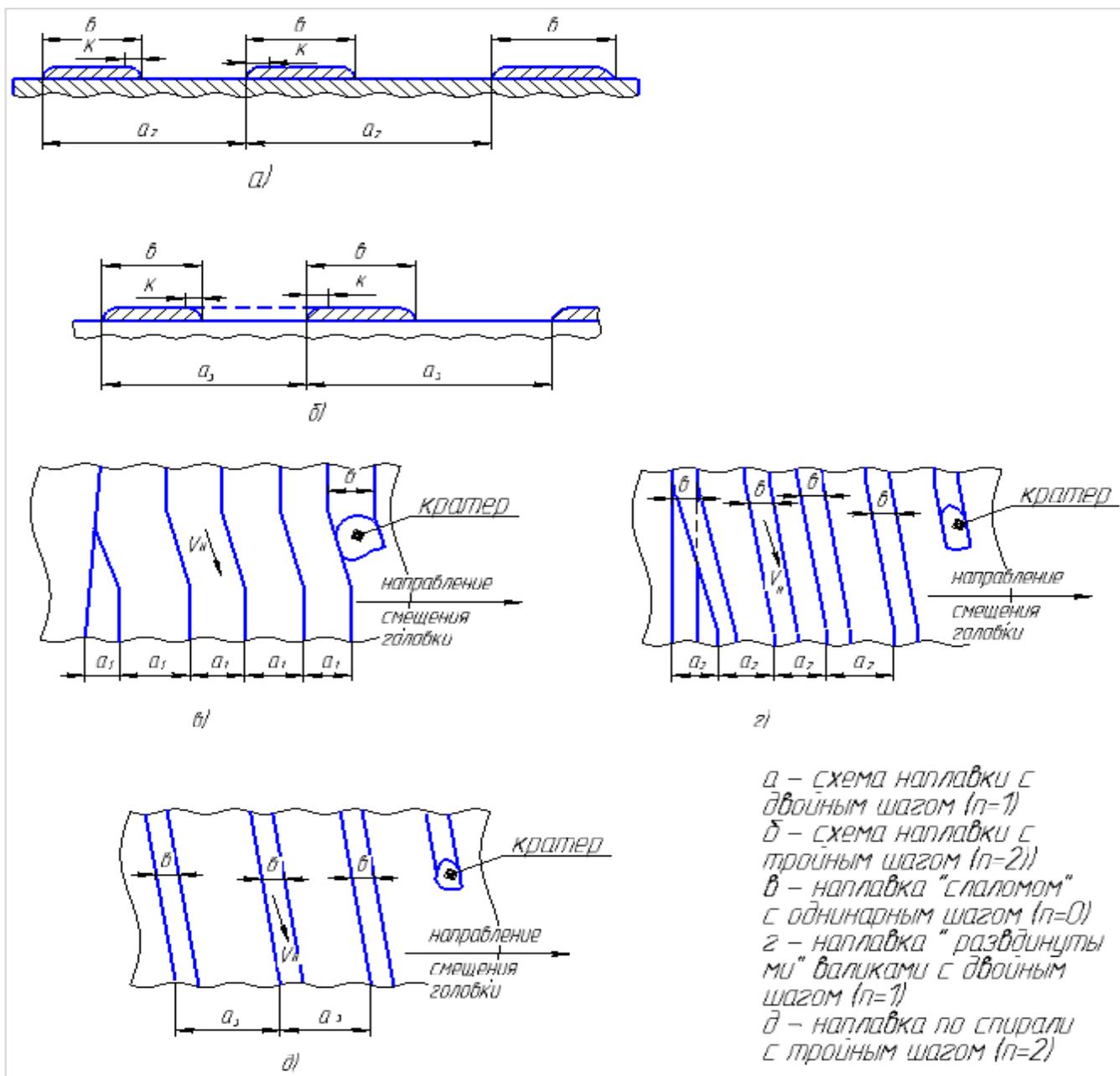


Рис. 4. Технологические схемы наплавки

Наплавка сферических и эллипсоидальных поверхностей (деталей типа крышек, днищ) выполняется кольцевыми валиками или по спирали с переходом в направлении от центральной части наплавляемой поверхности к ее краям (за исключением центрального участка диаметром 500–600 мм).

Наплавку центральных зон сферических и эллипсоидальных внутренних поверхностей крышек или днищ необходимо производить продольными валиками (с разбивкой на четыре зоны),

начиная от центра к краю зоны с выводом кратеров на наплавленный кольцевой валик с дальнейшей их выборкой (рис. 5). При этом кромка кольцевого задика должна быть заранее зачищена до плавного перехода к основному металлу.

После наплавки зон 1 и 2 начальные участки продольных валиков также необходимо подвергнуть зачистке до плавного их перехода к основному металлу и следующим этапом произвести наплавку участков 3 и 4.

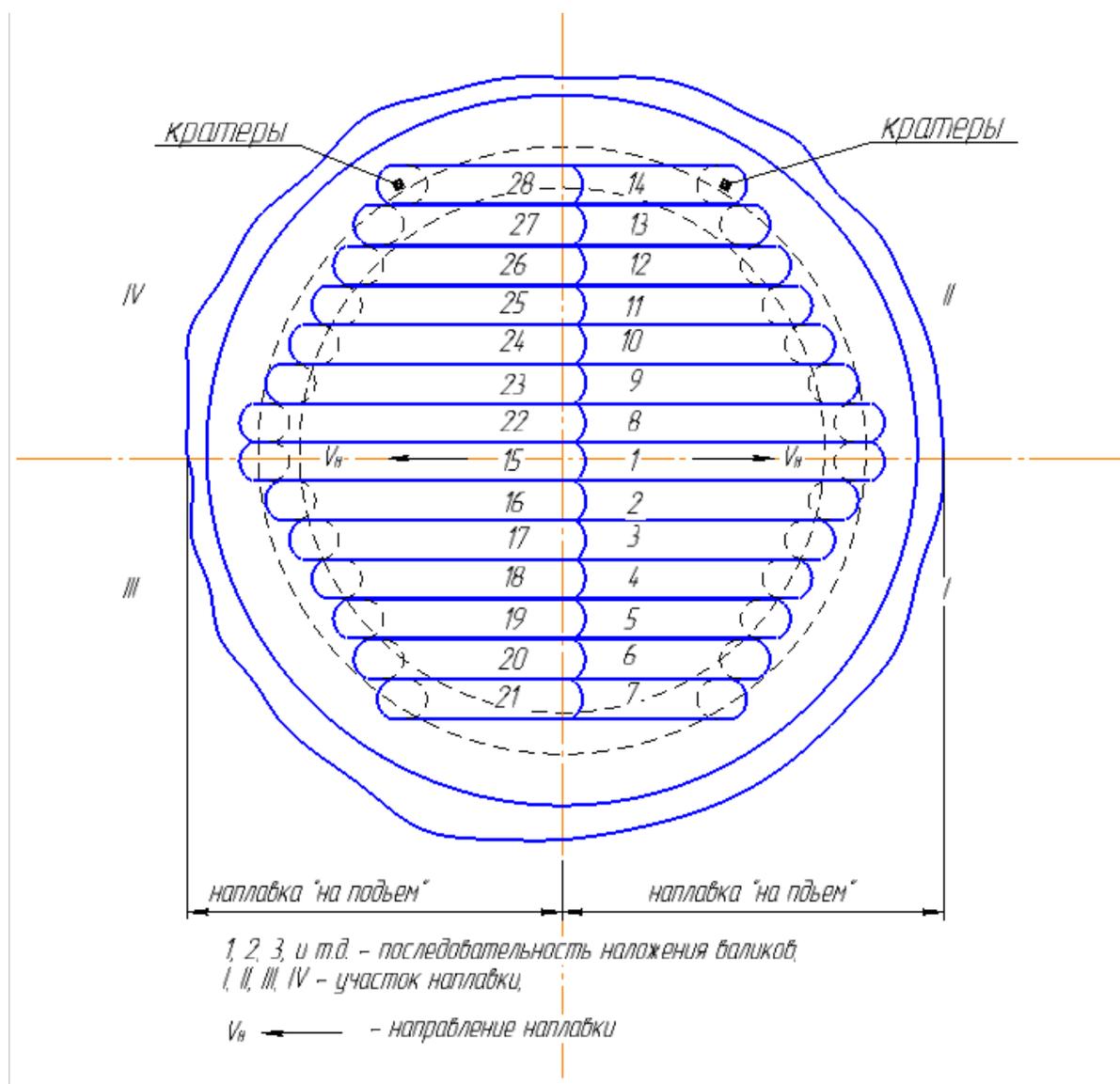


Рис. 5. Схема наплавки центральной части внутренней поверхности днища

**Контроль качества наплавки днища гидроемкости САОЗ.** Оценка качества после окончания процесса наплавки и зачистки под контроль выполняется по результатам послойного контроля внешним осмотром, методами капиллярной (цветной) и ультразвуковой дефектоскопии, а также просвечивания (перечень применяемых методов контроля указывается в конструкторской документации).

При внешнем контроле качество поверхности наплавленного антикоррозионного покрытия можно считать удовлетворительным, если не были обнаружены поверхностные дефекты, превышающие нормы ПК. Все дефекты должны быть устранены до проведения контроля другими не-

разрушающими методами. При контроле капиллярной дефектоскопией качество наплавленного антикоррозионного покрытия считается удовлетворительным, если характер, размеры и количество индикаторных пятен не превышают норм табл. 4.

Таблица 4

Нормы поверхностных дефектов при контроле капиллярной дефектоскопией

Вид дефекта	Допустимые размеры индикаторного пятна	Допустимое количество индикаторных пятен	
	Наибольший линейный размер	На любом участке 40*40 см	На любом участке 20*20 см
Одиночные разрозненные поры и шлаковые включения	3,0	4	6
Трещины в металле наплавки и в основном металле вблизи от наплавки	Не допускается		

Контроль методом ультразвуковой дефектоскопии зоны сплавления производится в соответствии с ПК 1514-72 и ОСТ 108.004.108-80.

**Заключение.** Полученные положительные результаты теоретического анализа, производственного опыта и вскрытые закономерности свидетельствуют о технологической и экономической эффективности применения способа прогрессивной однослойной электродуговой наплавки (взамен двухслойной наплавки) антикоррозионного покрытия ленточным электродом под флюсом толстостенных сварных конструкций теплового и атомного машиностроения, например, для наплавки гидроемкости САОЗ. Умеренное тепловложение при однослойной ленточной наплавке позволяет за один проход сформировать наплавленное соединение с более мелкозернистой структурой, высокой технологической прочностью и механическими свойствами по сравнению с двухслойной антикоррозионной наплавкой. Даны рекомендации по использованию способа однослойной наплавки в сварочном производстве.

#### Библиографический список

1. Полетаев, Ю. В. Сварка теплоустойчивых сталей большой толщины : моногр. / Ю. В. Полетаев, В. Ю. Полетаев. — Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2017. — 166 с.
2. Макаров, Э. Л. Теория свариваемости сталей и сплавов / Э. Л. Макаров, Б. Ф. Якушин ; под ред. Э. Л. Макарова. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 487 с.
3. Земзин, В. Н. Термическая обработка и свойства сварных соединений / В. Н. Земзин, Р. З. Шрон. — Ленинград : Машиностроение, 1978. — 367 с.
4. Cracking of welded joints in ferritic heat-Resisting / F. Mullery, R. Cadman // British Welding Journal.- 1962.-№4.- p.212-220.
5. Status on reheat cracking innuclear vessel Steels.-Положение дел в 1976 году по растрескиванию, образуемому после повторного нагрева в сталях для атомных сосудов.- пер.с

англ. Обзор / R. Steinmetz, A.G. Vinckier, A. Dhooge // Москва, Центральное бюро переводчиков ЗАО «Ин-турист». - 1976. - 133 с.

6. Vincker A. Testing Techniques to study the Susceptibility to Reheat Cracking of carbon-Manganese and Low-Alloy Steels. *Welding in the World*, 12, 1974, Nos. 11-12, pp. 282-303.

7. Miller R.C., Batte A.D. Reheat Cracking in 1/2 Cr Mo V / 21/4 Cr Mo Welded Joints. *Metal Construction and JWI*, 1975, №11. - pp. 550-558.

8. Отраслевая инструкция на проведение испытаний (наплавочных) материалов, предназначенных для наплавки антикоррозионного покрытия и кромок под сварку оборудования и трубопроводов АЭС из сталей марок 15Х2НМФА, 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А, 10ГН2МФА20, 22К (22К-Ш, 22К-ВД), ОИ 106.2730.91.03-82. — Москва : Б. и., 1982. — 31 с.

9. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения. ПН АЭГ-7-009-89. — Москва : ЦНИИ-АТОМ-ИНФОРМ, 1989. — 145 с.

10. Полетаев, Ю. В. Однопроходная электродуговая сварка под тонким слоем шлака толстолистовых конструкций стали 09Г2С / Ю. В. Полетаев, В. Ю. Полетаев // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2018. — Т. 18, № 1. — С. 50–58 <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-1-50-58>

*Об авторах:*

**Таранова Ксения Григорьевна**, магистрант кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ksy\\_08t@mail.ru](mailto:ksy_08t@mail.ru)

**Агулиев Руслан Бахтиёрович**, инженер кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства», магистрант, Донского государственного технического университета (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [rus.aguliev@mail.ru](mailto:rus.aguliev@mail.ru)

**Полетаев Юрий Вениаминович**, преподаватель кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, [anclav@mail.ru](mailto:anclav@mail.ru)

*Authors:*

**Taranova, Kseniya G.**, master's degree student of the Department of Machines and Automation of Welding Production, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), [ksy\\_08t@mail.ru](mailto:ksy_08t@mail.ru)

**Aguliev, Ruslan B.**, engineer of the Department of Machines and Automation of Welding Production, master's degree student, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), [rus.aguliev@mail.ru](mailto:rus.aguliev@mail.ru)

**Poletaev, Yuriy V.**, lecturer of the Department of Machines and Automation of Welding Production, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344000, RF), Dr. Sci., professor, [anclav@mail.ru](mailto:anclav@mail.ru)