

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.791.92:621.039

Исследование и разработка прогрессивной технологии однослойной антикоррозионной наплавки днища корпуса гидроёмкости САОЗ

Д.А. Парфенчик, Ю.В. Полетаев

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация

Статья посвящена решению актуальной научно-технической проблемы повышения качества и технологической прочности, а также эксплуатационной надежности наплавленных соединений штампосварного днища ГЕ САОЗ установки ВВЭР-1000. Целью данной работы является улучшение технологических характеристик, снижение дефектов и удешевление внутренней поверхности конструкции ёмкостей атомной энергетической промышленности. Для достижения поставленной цели были решены несколько задач. Во-первых, проведен анализ требований и оценка технологических схем производства наплавки. Во-вторых, исследованы природа и механизмы образования дефектов, в частности трещин под наплавкой. В-третьих, проведен разбор факторов, влияющих на формирование наплавки, а также анализ недостатков базовой технологии с целью устранения первопричин возникновения дефектов. Представленная в работе технология основывается на рекомендациях и требованиях нормативно-технической документации (НТД), применимых к гидроёмкости системы аварийного охлаждения активной зоны реактора типа ВВЭР-1000.

Ключевые слова: дуговая наплавка ленточным электродом, однослойная наплавка, трещины повторного нагрева, технология наплавки, электродная лента, антикоррозионная наплавка, наплавка поверхностей вращения, наплавка днищ

Для цитирования. Парфенчик Д.А., Полетаев Ю.В. Исследование и разработка прогрессивной технологии однослойной антикоррозионной наплавки днища корпуса гидроёмкости САОЗ. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(5):35–40.

Research and Development of the Advanced Technology for Single-Layer Anti-Corrosion Surfacing of the Bottom of the ECCS Hydraulic Accumulator

Danila A. Parfenchik, Yuri V. Poletaev

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

Abstract

The article is targeted at solving a pressing science and engineering problem of improving the quality, process strength and operational reliability of surfaced joints of the pressed and welded hydraulic accumulator bottom of emergency core cooling system (ECCS) of VVER-1000 reactor. The study aims to improve processing characteristics, reduce defects and decrease the cost of the internal surfaces of vessels utilized in nuclear power industry. To achieve this aim, several problems were solved. Firstly, surfacing requirements and process flow diagrams were evaluated. Secondly, the nature and mechanisms of defect formation were investigated, particularly that of the cracks beneath surfacing. Thirdly, to eliminate the original causes of defects, the factors influencing formation of surfacing and the deficiencies in the basic technology were analysed. The technology presented in the paper is based on the recommendations and requirements of regulatory and technical documentation (RTD) designated for a hydraulic accumulator of the emergency core cooling system of a VVER-1000 reactor.

Keywords: arc surfacing with a strip electrode, single-layer surfacing, reheat cracks, surfacing technology, electrode strip, anti-corrosion surfacing, surfacing of rotating surfaces, surfacing of bottoms

For Citation. Parfenchik DA, Poletaev YuV. Research and Development of the Advanced Technology for Single-Layer Anti-Corrosion Surfacing of the Bottom of the ECCS Hydraulic Accumulator. *Young Researcher of Don*. 2025;10(5):35–40.

Введение. В настоящее время наблюдается рост производства двухслойных ёмкостей в энергетическом машиностроении. Основной слой (корпус) изготавливается из относительно дешёвых материалов, таких как углеродистые и низколегированные стали, которые обеспечивают прочность и жёсткость конструкции. В то время как слой, находящийся в рабочей среде, изготавливается из высоколегированных материалов с необходимыми характеристиками, такими как коррозионная стойкость, жаропрочность и жаростойкость. Этот слой выполняется в виде наплавки на основной материал. Основной проблемой изготовления таких конструкций является различие в структурных классах материалов, теплофизических свойствах и прочностных характеристиках. Так, при наплавке валиков происходит перегрев основного материала, что приводит к образованию очагов неустойчивости структуры, способных вызвать необратимые последствия при повторном нагреве и в процессе эксплуатации. Одним из возможных технологических решений данной проблемы является применение операций нормализации зоны перегрева с использованием технологии двухслойной наплавки. Основная суть этого метода заключается в увеличении зоны нормализации наплавленного металла за счёт первичной наплавки с низким тепловложением и вторичной с высоким, что обеспечивает более широкую зону нормализации температур. Однако в процессе термической обработки, проводимой для снятия напряжений в металле днища корпуса системы аварийного охлаждения, было обнаружено межзёрное разрушение в основном металле конструкции (рис. 1).



Рис. 1. Области термического влияния, механизм появления трещин:
а — визуализация трещин [1], б — X200 [1]

Данный тип дефекта был обнаружен в ЗТВ перлитной стали, в частности, в области соединения наплавки и основного металла [1–3]. Проявление проблемы фиксировалось во время технического обслуживания узлов, а также после ремонтных работ и наплавки защитного слоя. Дефект получил наименование в литературе — трещина повторного перегрева (reheat cracking) [4–6].

Согласно данным литературного обзора [5], сварные соединения из низколегированной стали имеют повышенную вероятность растрескивания. При использовании этого материала в качестве основы для изготовления корпусов и узлов атомно-энергетического комплекса выявился структурный дефект, связанный с хрупким разрушением металла. Проблема проявлялась особенно ярко при создании корпусов днищ системы аварийного охлаждения активной зоны реактора типа ВВЭР-1000 [1].

Для решения данной проблемы была предложена технология однослойной коррозионностойкой наплавки ленточным электродом. В процессе разработки рекомендаций технологического характера было акцентировано внимание на требованиях нормативно-технической документации (НТД) [7, 8].

Выбор сварочных (наплавочных) материалов. Все сварочные материалы должны пройти проверку на соответствие заявленным характеристикам. Контроль осуществляется с помощью визуального осмотра (ВИК) сотрудниками отдела технического контроля (ОТК).

Марки ленточных электродов подобраны в соответствии с требованиями нормативной и технической документации (НТД). Для производства коррозионностойкой наплавки рекомендуются следующие марки ленточных электродов: нп-03Х22Н11Г2Б и св-03Х24Н13Г2Б.

В качестве защитных материалов выбран сварочный флюс. Используемый флюс должен соответствовать химическому составу наплавляемых материалов и обеспечивать высокое качество соединения. При использовании вышеуказанных марок сварочных материалов рекомендуется применять флюсы марки ОФ-6, ОФ-10, ФЦ-17 или ФЦ-18. Все материалы следует хранить и подготавливать в соответствии с характеристиками, указанными заводом-изготовителем, и нормативно-техническими актами.

Подготовка поверхности. В соответствии с технической документацией, шероховатость поверхности не должна превышать значения 12,5 Ra. Соблюдение этого параметра необходимо для обеспечения высокого качества соединения. Проверка поверхности осуществляется методами неразрушающего контроля, такими как капиллярная и магнитопорошковая дефектоскопия. Перед началом работ поверхность необходимо тщательным образом очистить и обезжирить.

Оборудование для изготовления наплавки. Все элементы наплавочной установки должны обеспечивать безотказную работу в течение всего процесса наплавки, а подвижные элементы — плавный и эластичный ход. Установка должна быть оснащена контрольными приборами для определения параметров наплавки. Схема установки изображена на рис. 2.

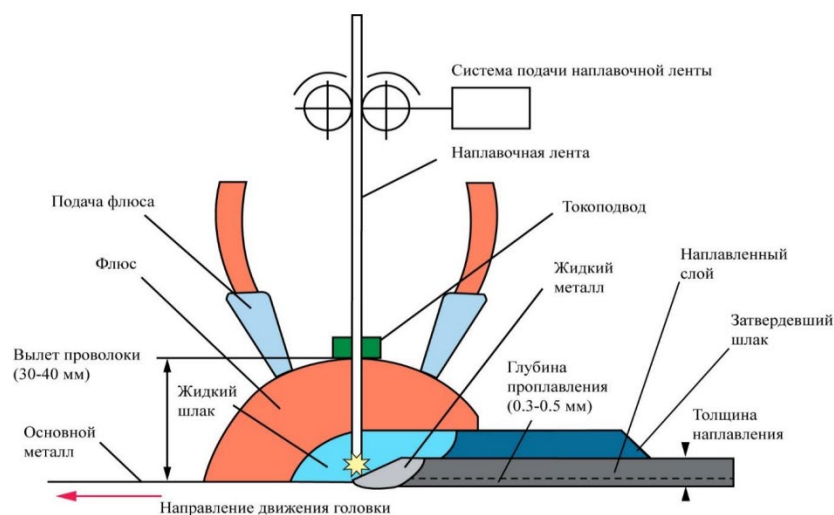


Рис. 2. Схематичное обозначение процесса наплавки лентой

Технологические варианты процесса наплавки. Были разработаны технологические рекомендации по наплавке с учётом особенностей конструкции гидроёмкости CAOЗ. Отличительной чертой данной конструкции является переходная зона днища, что потребовало создания схемы наложения валиков, а именно - использования раздвинутых валиками по спиралевидной траектории, по типу «слалом». Эта схема позволяет снизить термодинамическое воздействие (рис. 3). Для реализации данной схемы необходимо было определить шаг между наплавляемыми валиками. Для этого была использована формула расчёта шага для работы:

$$An + 1 = (n + 1) \times (b - K) - K,$$

где $An + 1$ — итог формулы, указывающий на шаг наплавки, мм; n — количество валиков, необходимых при дальнейшем заполнении промежутка между соседними валиками; b — размерная величина, обозначающая ширину валика, мм; K — размерная величина, обозначающая перекрытия кромок соседних валиков, мм.

Возможно применение с шагом 2 и 3 валика (рис. 3).

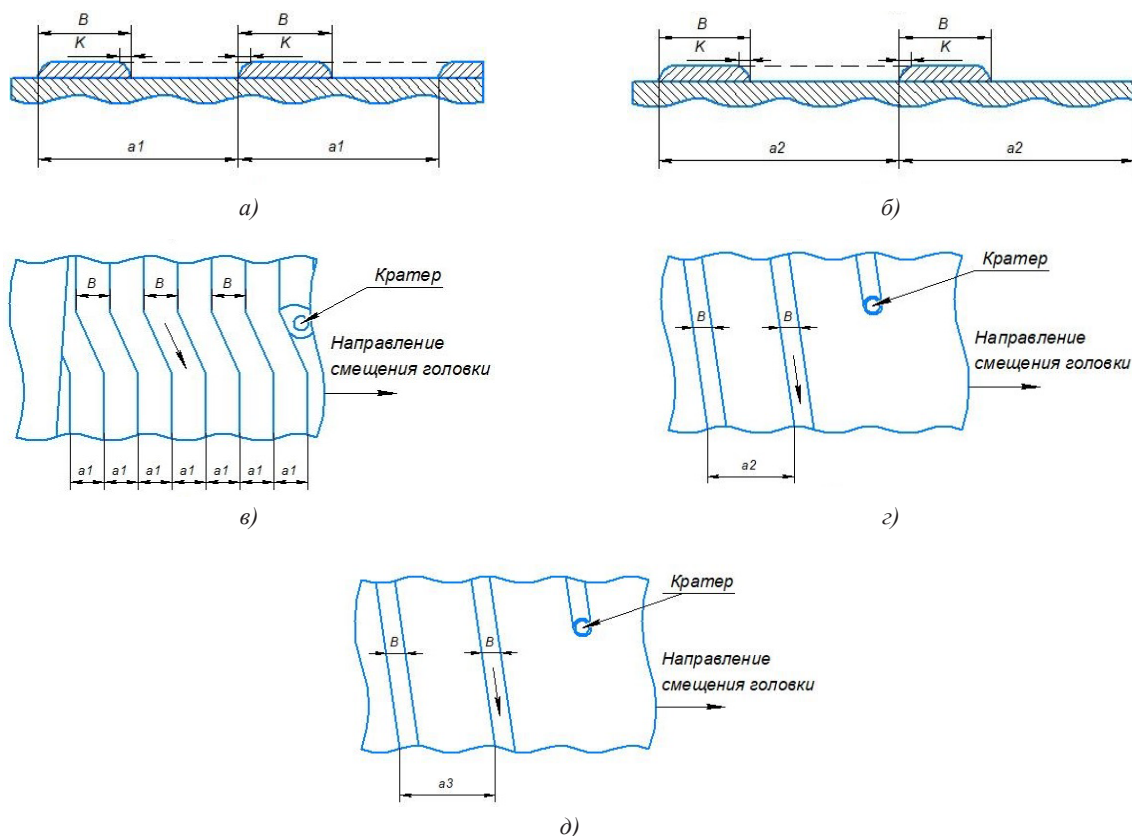


Рис. 3. Схема наплавки валиков заданным шагом, а — схема наплавки с двойным шагом ($n=1$); б — схема наплавки с тройным шагом ($n=2$); в — наплавка «слаломом» с одинарным шагом ($n=0$); г — наплавка «раздвинутыми» валиками с двойным шагом ($n=1$); д — наплавка по спирали с тройным шагом ($n=2$)

Стоит отметить, что наплавка сфер и эллипсов выполняется вышеперечисленными методами, за исключением центра детали в радиусе 250–300 мм. Данная зона наплавляется с дополнительными требованиями и разбивкой на четыре участка, чтобы избежать осадочных и растягивающих напряжений. Наплавка производится в порядке от центра к краю, чтобы кратерный участок наплавки ориентировался наружу, что способствует уменьшению объёмной доли дефектов (рис. 4). Кромки переходной части следует зачистить.

После этапов 1 и 2, по требованию, необходимо произвести зачистку детали до плавного перехода в основной металл, после чего можно приступить к наплавке зон 3 и 4. Предложена и составлена коррекция скорости и смещения зенита из-за особенностей геометрии конструкции. В процессе наплавки меняется пространственное положение электродов: наплавка начинается в нижнем положении с постепенным переходом на подъём (таблица 1). Это позволяет выполнять наплавку автоматическим способом.

Таблица 1

Таблица смещения зенита, для внутренней поверхности (зависимость приведена с учетом диаметра днища)

Диаметр наплавляемой внутренней поверхности, см	Величина смещения от зенита, см
50–100	3–4,5
100–200	4–6
200–300	5,5–7,5
300–400	6–9
400–500	7–10
500	9–13,5

Отличительной особенностью наплавки является необходимость подготовки ленточного электрода для работы. В частности, вылет должен быть выставлен согласно рабочему значению, находящемуся в диапазоне от 35 мм до 40 мм включительно. Установка бункера под флюс осуществляется ниже торца губок, проводящих ток, на расстоянии от 10 мм до 20 мм включительно. Наплавка производится со смещением. Возможна реализация наплавки как от зенита на подъём, так и в противоположном варианте — на спуск. Режимы наплавки представлены в таблице 2.

Таблица 2

Режимы наплавки

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				

Поверхности вращения наплавляются по следующему технологическому варианту:

Первым этапом является наплавка центральной части днища, которая выполняется по четырем зонам (рис. 4). Вторым этапом является обработка раздвинутых валиков методом «слалом»: при каждом прохождении круга осуществляется перемещение на определённый шаг, причём данный шаг может быть увеличен в 2–3 раза (рис. 3).

При использовании оборудования для наплавки лентой необходимо учитывать, что перекрытие соседних кромок должно быть не менее 5 мм. Важно производить выборку кратеров, расположенных на уровне плавного перехода к валику, при остановке процесса.

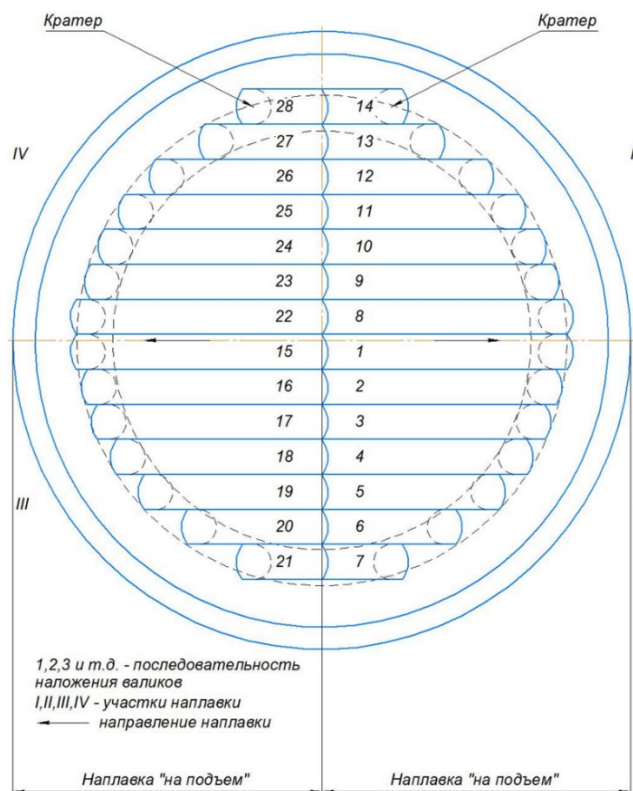


Рис. 4. Схема наплавки центра внутренней поверхности дна ёмкости

По окончании наплавочных работ и механической обработки проводится контроль с использованием штатных методов оценки качества, в соответствии с нормами технологической документации (НТД). Среди этих методов можно выделить визуально-измерительный контроль, капиллярную дефектоскопию и ультразвуковой контроль. Результаты контрольных мероприятий показали отсутствие технологических дефектов.

Заключение. На основе литературного обзора и аналитической работы, проведённой по полученному производственному опыту, были выявлены следующие данные: использование прогрессивной технологии однослойной электродуговой наплавки вместо предыдущей технологии для производства антикоррозионного покрытия ёмкостей САОЗ является эффективным решением, подкреплённым как экономическими, так и технологическими факторами. Низкое тепловложение по сравнению с двухслойной наплавкой, а также умеренное распределение температур металла наплавки способствуют повышению технологической прочности и улучшению механических свойств готового изделия.

Список литературы

1. Полетаев Ю.В., Полетаев В.Ю. *Сварка теплоустойчивых сталей большой толщины*. Монография. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2017. 166 с.
2. Макаров Э.Л., Якушин Б.Ф. *Теория свариваемости сталей и сплавов*. Макаров Э.Л. (ред.). Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана; 2014. 487 с.
3. Земзин В.Н., Шрон Р.З. *Термическая обработка и свойства сварных соединений*. Ленинград: Машиностроение; 1978. 367 с.
4. Mullery F, Cadman R. Cracking of Welded Joints in Ferritic Heat-Resisting Steels. *British Welding Journal*. 1962;4:212–220.
5. Штайнмец Р., Винкиер А.Г., Дуг А. *Положение дел в 1976 году по растрескиванию, образующемуся после повторного нагрева в сталях для атомных сосудов (пер.с англ.)* / Steinmetz R, Vinckier AG, Dhooge A. *Status on Reheat Cracking in Nuclear Vessel Steels*. Москва: Центральное бюро переводчиков ЗАО «Интурист»; 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*. 1974; 12(11–12):282–303.

7. Отраслевая инструкция на проведение испытаний (наплавочных) материалов, предназначенных для наплавки антикоррозионного покрытия и кромок под сварку оборудования и трубо-проводов АЭС из сталей марок 15Х2НМФА, 15Х2НМФА, 15Х2НМФА-А, 10ГН2МФА20, 22К (22К-Ш, 22К-ВД), ОИ 106.2730.91.03-82. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001083175?ysclid=mf6ibfhr49807598864> (дата обращения: 12.04.2025).

8. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения. ПН АЭГ-7-009-89. Москва: ЦНИИ-АТОМ-ИНФОРМ; 1989. 145 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/12a/4294814648.pdf?ysclid=mf6icswe962096095> (дата обращения: 12.04.2025).

9. Полетаев Ю.В., Полетаев В.Ю. Однопроходная электродуговая сварка под тонким слоем шлака толстолистовых конструкций стали 09Г2С. *Advanced Engineering Research*. 2018;18(1):50-58. <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2018-18-1-50-58>

Об авторах:

Данила Алексеевич Парфенчик, магистрант кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (344041, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Шаповалова, 2А), danil.parfenchik.4200@gmail.com

Юрий Вениаминович Полетаев, профессор, доктор технических наук кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства» Донского государственного технического университета (344041, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, ул. Шаповалова, 2А), anclav51@mail.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Danila A. Parfenchik, Master's Degree Student of the Machines and Automation of Welding Production Department, Don State Technical University (2A, Shapovalov Str. Rostov-on-Don, 344041, Russian Federation), danil.parfenchik.4200@gmail.com

Yuri V. Poletaev, Dr.Sci. (Engineering), Professor of the Machines and Automation of Welding Production Department, Don State Technical University (2A, Shapovalov Str. Rostov-on-Don, 344041, Russian Federation), anclav51@mail.ru

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.