

На правах рукописи

Бочаров Сергей Александрович

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАКИРОВАННЫХ ЛИСТОВ
С ОСНОВОЙ ИЗ ХРОМОМОЛИБДЕНОВЫХ СТАЛЕЙ**

Специальность: 05.16.01. Металловедение и термическая обработка металлов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2008

Работа выполнена в Научно-исследовательском центре Общества с ограниченной ответственностью «Территориальная компания «ОМЗ-Ижора»

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки и техники РФ
доктор технических наук,
профессор

Солнцев Юрий Порфирьевич

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук,
профессор

Шахназаров Юрий Варданович

Кандидат технических наук

Рудаков Борис Петрович

Ведущая организация

ОАО Научно-производственное объединение «Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения (ЦНИИТМАШ)

Защита состоится «___» _____ 2008 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.229.03 в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, хим. корпус, ауд. 51.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ «СПбГПУ».

Автореферат разослан _____ 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.03
Доктор технических наук,
профессор

Кондратьев С.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Глобальные проблемы третьего тысячелетия - экономия металлов, ресурсосбережение и экология непосредственно связаны с созданием новых материалов с высоким уровнем служебных свойств. Одним из эффективных путей повышения служебных свойств металлопродукции является применение биметалла.

В связи с этим на протяжении последних 40 лет постоянно возрастала потребность промышленности в толстом плакированном (биметаллическом) листе, в необходимости его изготовления крупными партиями. В России производство биметалла развивалось в наибольшей степени на «Ижорских заводах», которые в 60-х годах XX века стали флагманом отечественного машиностроения.

В настоящее время сложные условия эксплуатации и/или повышенная степень ответственности изделий потребовали более высокого уровня служебных свойств плакированных листов. Кроме того, остро возникла потребность в плакированных листах с основным слоем из хромомолибденовых сталей для нефтехимической отрасли. Особенно сложными и ответственными изделиями являются реакторы нового поколения для глубокой переработки нефти. Поэтому плакированные листы для них должны иметь высокие технические характеристики, включая заданный уровень прочности и хладостойкости основного металла, отсутствие несплошностей при ультразвуковом контроле по линии сплавления основного и плакирующего слоев, прочность сцепления слоев и равномерность толщины плакирующего слоя, обеспечивающие его длительную коррозионную стойкость в условиях агрессивной среды.

В результате анализа и обобщения опубликованных работ с описанием различных технологических методов плакирования установлено, что наиболее приемлемым как с экономической, так и технической точки зрения в современных условиях является пакетный способ производства плакированных листов. Рассматриваемый метод пакетной прокатки является одним из путей создания плакированного листа толщиной 10÷128 мм, шириной до 4500 мм и длиной до 12000 мм разных композиций легирования.

Однако обеспечение высокого качества, особенно для крупногабаритных листов, потребовало доработки и усовершенствования технологии сборки и сварки несимметричных вакуумированных пакетов. При этом задача получения качественно плакированного листа усложняется в случае применения в качестве основного металла стали повышенной прочности с требованиями хорошей свариваемости.

Таким образом, актуальность выполнения настоящей комплексной работы определяется необходимостью обеспечения высоких требований по уровню качества и служебных свойств плакированного листа, используемого для современных нефтехимических сосудов давления ответственного назначения.

Цель работы. Разработка технологии изготовления крупногабаритных плакированных листов из сварных вакуумированных пакетов с основой из хромомолибденовых сталей, обеспечивающая служебные свойства плакированных листов применительно к нефтехимическим реакторам.

Для выполнения поставленной цели были определены и решены следующие задачи:

- произведен выбор сталей для изготовления плакированных листов;
- исследованы структурные превращения и выявлены причины возникновения дефектов в металле шва пакетов в зависимости от способа сварки и марки сварочных материалов;
- применены полученные результаты исследований при сварке пакетов из сталей SA387Gr.22 cl.2 (10X2M1A) и 08X18H10T;
- произведены анализ химического состава и металлографические исследования плакированного листа, изготовленного по разработанной технологии;
- исследовано влияние послесварочной термообработки на микроструктуру и микротвердость переходной зоны полученного плакированного листа;
- исследованы механические и антикоррозионные свойства полученного плакированного листа;
- произведено изготовление опытно-промышленной партии крупногабаритных плакированных листов из хромомолибденовых сталей.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Установлены закономерности структурных превращений в металле шва, происходящие при сварке пакетов из разнородных сталей 12ХМ и 08Х18Н10Т с использованием различных способов сварки и различных сварочных материалов.
2. Установлены особенности формирования структуры переходной зоны плакированного листа при его изготовлении методом пакетной прокатки.
3. Определено влияние послесварочной термообработки на микроструктуру и микротвердость переходной зоны плакированного листа SA387Gr.22 cl.2 + 08X18H10T.

4. Разработаны принципиальные технологические параметры сборки и сварки пакетов, обеспечивающие прочность сцепления слоев плакированного листа, сопоставимую с прочностью основного металла.

Практическая значимость работы.

Произведен статистический анализ качества плакированных листов, изготовленных из пакетов с применением различных способов сварки, по результатам которого разработаны рекомендации по технологии сборки и сварки несимметричных сварных вакуумированных пакетов.

Разработана и освоена технология изготовления методом пакетной прокатки крупногабаритных плакированных листов с основой из хромомолибденовых сталей композиций 12ХМ + 08Х18Н10Т и SA387Gr.22 cl.2 + 08Х18Н10Т для листовых и штампованных заготовок нефтехимических реакторов. Получен патент на изобретение способа изготовления пакетов для производства крупногабаритных плакированных листов.

Внедрение технологии производства крупногабаритных листов методом пакетной прокатки позволило изготовить на ОАО «Ижорские Заводы» ~5 тыс. тонн биметалла.

Апробация работы. Материалы, составляющие основное содержание работы, докладывались на 6 конференциях: на III международной научно-практической конференции молодых специалистов «Ижора - 2002», г. Санкт-Петербург, 2002г.; на научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «ММК имени Ильича», Украина г. Мариуполь, 2002г.; на IV Международной научно-практической конференции молодых специалистов «Ижора - 2003»; на IX, XII и XIII международных научно-технических конференциях «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов», г. Санкт-Петербург, 2003г., 2006г., и 2007г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 8 печатных работах, включая 1 патент на изобретение, список которых приведен в конце автореферата.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и выводов. Содержание работы изложено на 119 страницах, содержит 62 рисунка, 15 таблиц. Список литературы включает 95 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе представлен обзор имеющихся в литературе данных, посвященных анализу наиболее широко применяемых в производстве методов изготовления биметаллов. Показаны преимущества этих методов и их недостатки.

Установлено, что за последние десять лет большинство патентов на изобретения и статей в технических журналах обращены на методы плакирования взрывом и наплавкой. Показаны существенные проблемы и недостатки этих методов.

В связи с тем, что плакируемые листы используются при изготовлении сосудов для глубокой переработки нефти, где рабочая среда содержит до 85% водорода, рассмотрен вопрос о склонности антикоррозионной наплавки (плакировки) к отслаиванию в водородосодержащих средах.

В результате сопоставления различных технологий установлено, что метод пакетной прокатки несимметричных сварных вакуумированных пакетов является в настоящее время наиболее современным, относительно простым и эффективным, т. к. позволяет получать плакированные листы в широком диапазоне толщин и габаритов. Для освоения этого метода не требуется затрат на покупку и освоение нового дорогостоящего оборудования, прокатка производится на имеющемся прокатном стане «5000».

Во второй главе представлен объем испытаний и исследований, а также уровень требований, предъявляемых при изготовлении плакированных листов, используемых в изделиях ответственного назначения, таких как сосуды нефтехимической промышленности, работающие в условиях высоких рабочих давлений и температур и, одновременно, в условиях низких климатических температур.

Испытания и исследования производились на соответствие требованиям американского кода ASME и спецификации 5103.48.00.000Д, и включали следующее: ультразвуковой контроль основного слоя из стали SA387Gr.22 cl.2 и зоны сцепления слоев плакированного листа, анализ химического состава основного металла и плакирующего слоя, исследование макроструктуры плакированного листа, определение разнотолщинности плакирующего слоя, определение механических свойств металла основного слоя, определение стойкости металла плакирующего слоя к МКК, определение твердости HV₁₀ основного металла, определение прочности сцепления слоев плакированного листа, определение стойкости плакирующего слоя против отслаивания в среде водорода высоких параметров.

Дополнительно для исследования качества плакированного листа было выполнено следующее: оценка загрязненности неметаллическими включениями основного металла и металла плакирующего слоя, исследование микроструктуры металла основного и плакирующего слоя, исследование микроструктуры и определение микротвердости переходной зоны плакированного листа, рентгеновский микроанализ переходной зоны плакированного листа с определением состава типичных неметаллических включений в плакирующем слое и основном металле и с определением содержания Cr, Ni, Mo, Ti, испытания на растяжение в z-направлении для оценки сопротивляемости металла слоистым разрывам.

В третьей главе рассмотрены условия работы изделий нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, произведен выбор сталей для изготовления плакированного листа, проведены исследования структурных превращений в металле шва, происходящие при сварке пакетов из разнородных сталей с использованием различных способов сварки и различных сварочных материалов, разработаны рекомендации по технологии сборки и сварки несимметричных сварных вакуумированных пакетов.

В качестве основного слоя была выбрана коваяя брама из стали SA387Gr.22cl.2 (2,25Cr-1,0Mo), для плакирующего слоя – плита из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса 08X18H10T. Конструкция несимметричного сварного вакуумированного пакета представлена на рис.1.

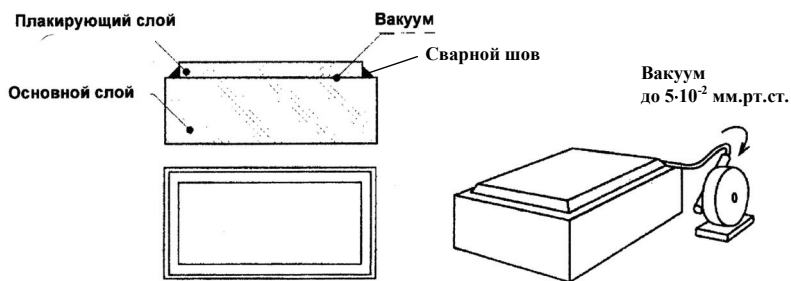


Рис. 1. Схема сборки, сварки и вакуумирования пакета

Габариты пакетов:

плакирующий слой ~ 36x1120x3125 мм;

основной металл ~ 590x1280x3360 мм

Учитывая, что при изготовлении пакета свариваются разнородные стали (перлитная и аустенитная), а сам свариваемый по периметру пакет представляет собой

весьма жесткую конструкцию большой толщины, потребовалась разработка специального технологического процесса сварки, с целью предотвращения появления смешанных зон с пониженной трещиностойкостью и снижения уровня остаточных напряжений.

Для этого были проведены исследования трех методов сварки пакетов: ручная дуговая сварка (РДС) электродами марки ЭА-395/9 (10X16H25AM6) Ø4мм и ЭА-400/10Т (04X19Н11М3) Ø5 мм, полуавтоматическая сварка в CO₂ сварочной проволокой Св-04X22Н8МЗТЮ Ø2 мм и автоматическая дуговая сварка под слоем флюса ОФ-10 (АДС) сварочными проволоками Св-10X16H25AM6 и Св-04X19Н11М3 Ø5 мм.

Обработку технологии сварки несимметричных пакетов производили на пакетах, где в качестве основного металла была выбрана хромомолибденовая сталь марки 12ХМ.

Статистический анализ качества прокатанных плакированных листов, изготовленных по этим технологическим вариантам, приведенный в табл.1, показал, что способ РДС позволил получить четыре годных листа из четырех собранных пакетов, т.е. 100% годного листа. Существенный недостаток этого способа – низкая производительность процесса.

Таблица 1

Статистический анализ качества листов, изготовленных из пакетов с применением различных способов сварки

Способ сварки пакетов	Всего прокатано пакетов	Из них			Годность листов в %
		Годных листов	Листов с браком	Снято с проката	
РДС	4	4	-	-	100
Полуавтоматическая сварка в CO ₂	9	-	4	5	0
АДС	15	10	5	-	~70

Из девяти пакетов, собранных с использованием сварки в CO₂, пять были сняты с проката по причине отслоения плакирующего слоя. Остальные четыре пакета были докатаны с отслоениями, но забракованы в листе по результатам ультразвукового контроля, т.е. было получено 100% негодного листа. Применение АДС, самого технологичного процесса из трех рассматриваемых, позволило получить ~ 70% годного листа.

Для выявления причин возникновения брака плакированных листов были проведены исследования зоны сварного шва пакетов.

На рис.2 представлена макроструктура сварного соединения, выполненного полуавтоматической сваркой в CO_2 . На фотографии показано отслоение металла шва, выполненного проволокой Св-04Х22Н8МЗТЮ от основного металла. Отслоение произошло по причине возникновения холодных трещин напряжения. В зоне металла прихваток, выполненных глубоководными электродами ЭА-395/9, отслоения металла шва отсутствуют. Таким образом, отслоение (откол) металла шва, выполненного полуавтоматической сваркой в CO_2 , от основного металла повлекло за собой разгерметизацию пакетов при нагреве под прокат, окисление контактирующих поверхностей и, как следствие, полное или частичное отслоение лакирующего слоя в прокатанном листе.

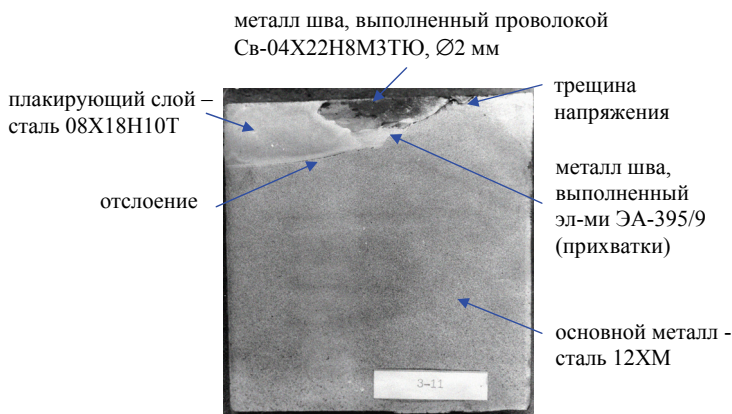


Рис. 2. Макроструктура лакированного листа в месте сварного шва пакета (полуавтоматическая сварка в CO_2)

При исследовании микротвердости сварного соединения пакетов установлено, что максимальную твердость имеет зона сплавления металла шва с основным металлом. При этом при ручной сварке максимальная твердость в переходной зоне сварного соединения не превышает 360 Нц, когда как при полуавтоматической сварке в CO_2 она составила 450Нц (рис.3), что вероятно связано не столько со способом сварки, а сколько с химическим составом сварочных материалов, с их перемешиванием в процессе сварки с основным металлом и образованием структуры мартенсита.

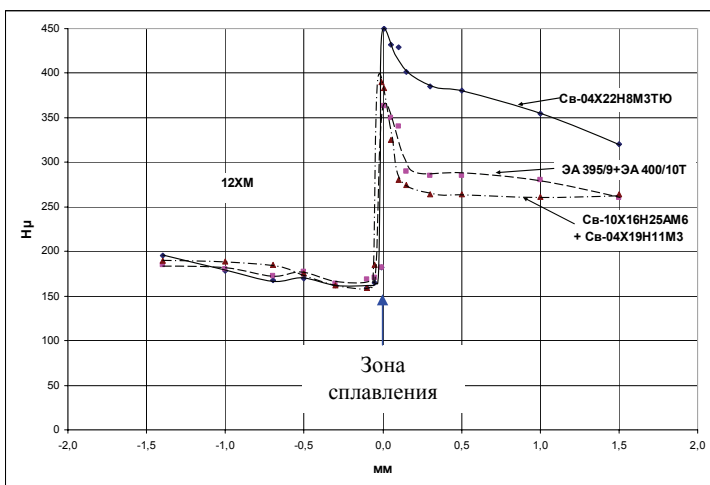


Рис. 3. Микротвердость переходной зоны сварного соединения, выполненного полуавтоматической сварка в CO_2

Частичное отслоение по периметру лакированных листов, полученных при автоматической сварке пакетов, произошло вследствие частичной разгерметизации пакетов и окисления небольших участков металла вблизи сварного шва пакета, имевшего трещины в корневом шве. Установлено, что зарождение трещин произошло в зонах, имеющих структуру мартенсита, образование которой произошло вследствие значительного перемешивания металла шва с основным металлом – так называемые зоны смешанного химического состава (рис.4). Следует отметить, что при ручной сварке электродами с существенно меньшими тепловложениями не происходит столь значительного перемешивания металла шва с основным металлом.

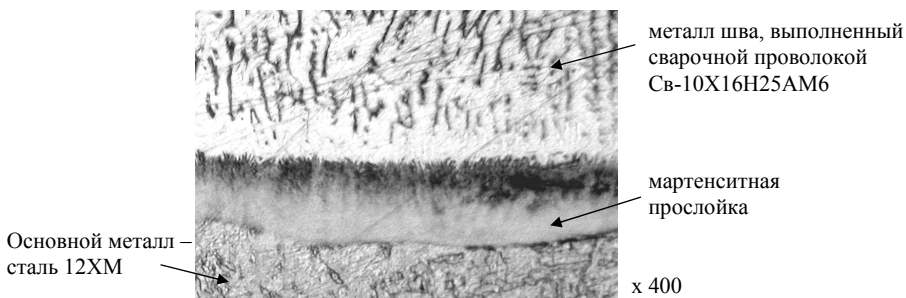


Рис. 4. Микроструктура переходной зоны сварного соединения, выполненного автоматической сваркой под флюсом

На основании проведенных исследований был разработан комбинированный способ сварки пакетов. Суть способа заключается в выполнении переходного подслоя ручной сваркой глубокоаустенитными электродами, далее основной объем сварного шва пакета выполняется автоматической сваркой под флюсом проволокой с химическим составом, близким к химическому составу металла плакирующего слоя (рис.5). Все это позволило избежать возникновения мартенситных прослоек в перемешиваемой зоне сварного шва пакета и предотвратило образование в нем трещин, при этом почти не снижая производительности процесса сварки пакета.

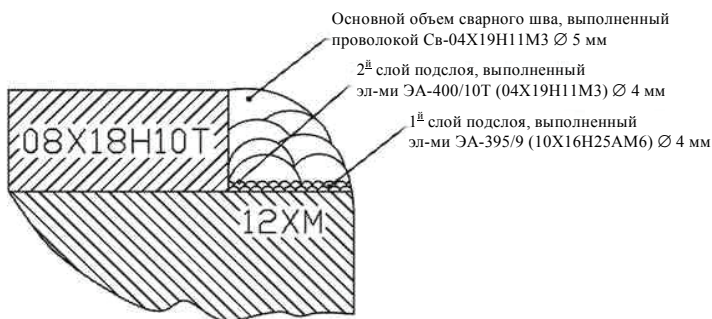


Рис. 5. Схема комбинированной сварки пакета: РДС (переходной подслоя), АДС (основной объем сварного шва пакета)

Также для повышения надежности получения годных плакированных листов после прокатки применено предварительное вакуумирование пакета до $5 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст. после выполнения первого корневого сварного шва пакета, а также обратноступенчатый способ сварки пакета и др. технологические приемы.

С использованием разработанной технологии сборки и сварки пакетов был изготовлен крупногабаритный плакированный лист из стали SA387Gr.22 cl.2 (10X2M1A) + 08X18H10T, на металле которого был выполнен комплекс исследований и испытаний.

Прокатка пакета производилась после его нагрева до температуры 1250°C по металлу, температура начала прокатки $T_{н.п.}=1200^{\circ}\text{C}$, температура конца прокатки $T_{к.п.}=905^{\circ}\text{C}$. Полученный лист SA387Gr.22 cl.2 + 08X18H10T имел габариты $68 \times 3250 \times 6800$ мм. После прокатки лист был посажен в печь на предварительную термообработку, совмещенную с противофлюкеной обработкой, с выдержкой при $T=600-650^{\circ}\text{C}$ 3ч, с последующим охлаждением с печью.

Основная термообработка листа производилась по схеме закалка + отпуск по следующему режиму:

- выдержка при температуре 950 °С 2ч 55мин., охлаждение в воде;
- выдержка при температуре 650-665 °С 8ч, охлаждение в воде.

Результаты ультразвукового контроля показали соответствие металла основного слоя SA387Gr.22 cl.2 и зоны сплавления слоев требованиям стандарта ASTM A578, а также дополнительным требованиям с минимально учитываемой площадью дефекта S = 3,2 мм².

В четвертой главе представлены результаты испытаний и исследований плакированного листа из стали SA387Gr.22 cl.2 + 08X18Н10Т, изготовленного по разработанной технологии.

Установлено, что химический состав основного металла и плакирующего слоя исследуемого плакируемого листа отвечает установленным требованиям (табл.2, 3). Основной металл имеет низкое содержание вредных примесей. Величина J-фактора не превышает 90, что свидетельствует о высокой стойкости основного металла против теплового охрупчивания.

Таблица 2

Химический состав металла основного слоя из стали SA387Gr.22 cl.2

Зона по длине листа	Вид анализа	Содержание элементов, вес. %													J-фактор*
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	As	Cu	Sn	Sb	
-	плавоч.	0,14	0,36	0,39	0,008	0,004	0,13	2,38	1,03	0,04	0,003	0,09	0,0040	0,0004	90
верх	контр.	0,14	0,38	0,39	0,006	0,004	0,12	2,37	1,01	0,02	0,003	0,07	0,0040	0,0008	77
низ		0,14	0,39	0,40	0,007	0,003	0,12	2,38	1,01	0,02	0,003	0,07	0,0044	0,0008	90
Требования Спецификации 5103.48.00.000 Д	плавоч.	≤ 0,15	≤ 0,50	0,30-0,60	≤ 0,010	≤ 0,010	≤ 0,20	2,00-2,50	0,90-1,10	≤ 0,05	≤ 0,015	≤ 0,20	≤ 0,0100	≤ 0,0040	< 120
	контр.	≤ 0,17	≤ 0,56	0,25-0,66	≤ 0,012	≤ 0,012	≤ 0,20	1,90-2,60	0,87-1,13	≤ 0,05	≤ 0,015	≤ 0,20	≤ 0,100	≤ 0,0040	

* – J=(Mn+Si) (P+Sn) x 10⁴

Таблица 3

Химический состав плакирующего слоя из стали 08X18Н10Т

Участок по толщине плакировки	Вид анализа	Содержание элементов, вес. %													
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Ti	Cu	V	W	Al	Co
-	плавоч.	0,06	0,38	0,57	0,026	0,011	9,17	18,29	0,14	0,47	0,19	0,04	0,05	0,030	0,050
поверхность	контр.	0,06	0,43	0,55	0,026	0,015	9,10	18,33	0,15	0,39	0,19	0,04	0,05	0,037	0,046
3 мм от поверхности		0,06	0,43	0,56	0,025	0,015	8,94	18,52	0,14	0,40	0,18	-	-	-	-
Требования Спецификации 5103.48.0 0.000Д	плавоч.	≤ 0,08	≤ 0,80	≤ 2,00	≤ 0,035	≤ 0,020	9,00-11,00	17,00-19,00	≤ 0,30	5•C - 0,70	≤ 0,30				
	контр.	≤ 0,09	≤ 0,85	≤ 2,05	≤ 0,040	≤ 0,025	8,85 - 11,2	16,80-19,20	≤ 0,35	5•C - 0,75	≤ 0,35				

Химический состав металла плакирующего слоя из стали 08X18H10T стабилен по толщине на глубину до 3 мм от поверхности, что гарантирует защитные антикоррозионные свойства плакирующего слоя в процессе длительной эксплуатации.

Исследование макроструктуры по толщине плакированного листа показало отсутствие расслоений, трещин, флокенов, отслоений плакировки и др. дефектов. Толщина плакирующего слоя составила 6 мм. Разнотолщинность плакирующего слоя по площади листа незначительная и составляет 0,9 мм, что экономически выгодно при обеспечении достаточной коррозионной стойкости (рис.6).

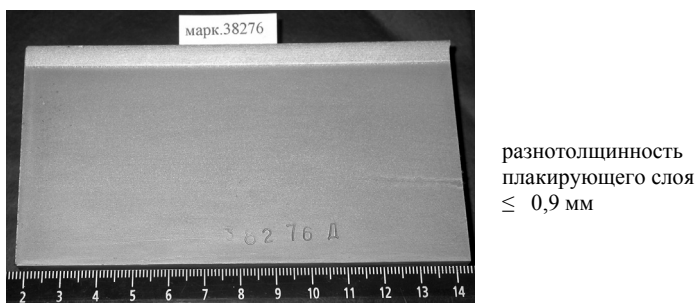


Рис. 6. Макроструктура плакированного листа стали SA387Gr.22 cl.2 +08X18H10T

Установлено, что микроструктура стали SA387Gr.22 cl.2 как после основной термообработки, так и после дополнительного отпуска состоит из смеси отпущенного верхнего и нижнего бейнита (рис.7а). Величина действительного аустенитного зерна по шкале ASTM E112 соответствует номеру $G_{6,7}$. В металле плакирующего слоя выявлен δ -феррит в количестве до 5 %, расположенный преимущественно в средней части по толщине плакировки (рис.7б).

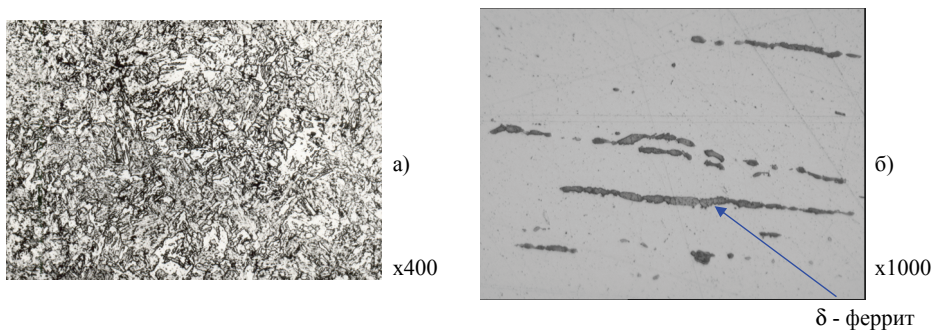


Рис. 7. Микроструктура основного слоя стали SA387Gr.22 cl.2 (а) и микроструктура стали 08X18H10T в средней части по толщине (б)

Такое количество δ -феррита является оптимальным с точки зрения стойкости против образования горячих трещин и предотвращения сигматизации после длительных отпусков.

Структура плакирующего слоя стали 08X18H10T, прилегающая к линии сплавления, представляет собой мелкодисперсный аустенит с повышенной травимостью границ зерен, что указывает на интенсивное карбидообразование (рис.8).

Линия сплавления выявляется как сплошная полоса повышенной травимости, представляющая собой «карбидную грядку» шириной 10-15 мкм в состоянии после основной термообработки (рис.8а), состоящей из закалки 950°C 2ч55мин. и отпуска 650°C 8ч, и 15-20 мкм после дополнительного отпуска $620\text{-}630^{\circ}\text{C}$ 13ч15мин. + $680\text{-}690^{\circ}\text{C}$ 7ч42мин. (рис.8б). Ширина науглероженной зоны после основной термообработки составляет 75-100. После дополнительного отпуска эта зона уменьшается до 50 мкм, интенсивность травления также уменьшается. Увеличение ширины «карбидной грядки» и уменьшение ширины и интенсивности науглероженной зоны связано с диффузионными процессами, проходящими в процессе дополнительного отпуска.

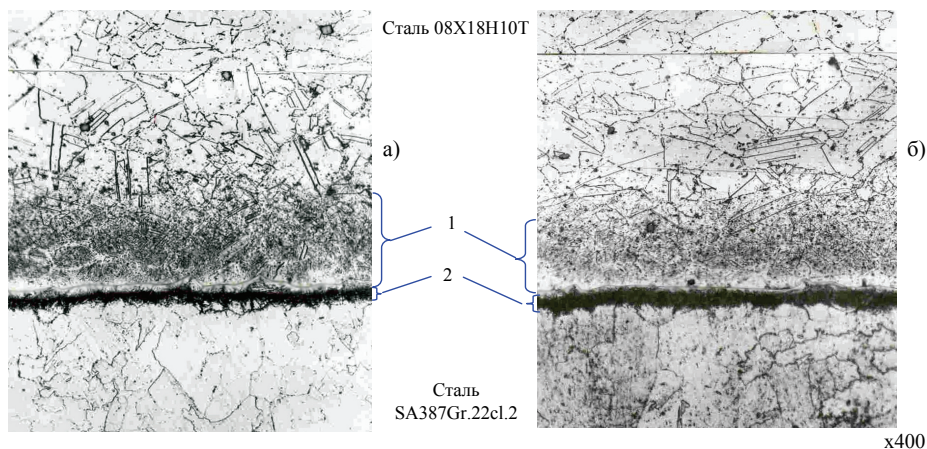


Рис. 8. Микроструктура переходной зоны плакированного листа:
а) в состоянии после основной термообработки
б) в состоянии после дополнительного отпуска минимальной продолжительности
1 - науглероженная зона; 2 - «карбидная грядка»

Со стороны основного слоя стали SA387Gr.22 cl.2 к линии сплавления прилежит обезуглероженная область, отличающаяся разномзернистостью. Её структура из-

меняется от преимущественного феррита в состоянии после основной термообработки до феррито-карбидной смеси после дополнительного отпуска. Ширина обезуглероженной зоны составляет 100-150 мкм.

Результаты исследования микроструктуры подтверждаются результатами замера микротвердости. Установлено, что максимальный уровень твердости 430 Нц имеет «карбидная гряда» в состоянии после основной термообработки и 412 Нц после дополнительного отпуска минимальной продолжительности. После основной термообработки наблюдается несколько повышенный уровень твердости в науглероженной зоне со стороны плакирующего слоя 08X18H10T и пониженный уровень твердости в обезуглероженной зоне со стороны основного металла SA387Gr.22 cl.2. После дополнительного отпуска распределение твердости в переходной зоне становится более равномерным, что объясняется диффузией углерода (рис.9).

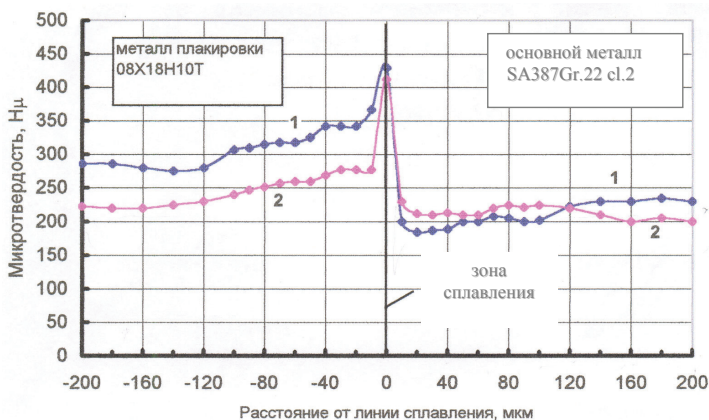


Рис. 9. Микротвердость переходной зоны плакированного листа стали SA387Gr.22 cl.2 + 08X18H10T в состоянии после основной термообработки (1) и после дополнительного послесварочного отпуска (2)

Таким образом, проведение дополнительных послесварочных отпусков обеспечивает более равномерную структуру и твердость в переходной зоне плакированного листа.

В пятой главе представлены данные по результатам испытаний металла основного слоя. Установлено полное соответствие механических свойств основного металла листового проката заданным требованиям (табл.4).

Механические свойства основного металла лакированного листа
из стали SA387Gr.22 cl.2 + 08X18H10T

Термообработка	Механические свойства при $T_{исп.} \text{ } ^\circ\text{C}$									Твердость HV_{10}
	20				460				-35	
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ %	Ψ %	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ %	Ψ %	KV, Дж	
Осн. т/о + доп. отпуск мин. продолжительности 620-630 $^\circ\text{C}$ 13ч 15мин. + 680-690 $^\circ\text{C}$ 7ч 42мин.	630	470	28,0	76,0	465	400	26,0	77,0	155,9	200,8
Осн. т/о + доп. отпуск макс. продолжительности 620-630 $^\circ\text{C}$ 21ч 55мин. + 680-690 $^\circ\text{C}$ 13ч 30мин.	611	440	28,8	75,6	449	374	22,0	72,0	205,3	191,1
Требования спецификации 5103.48.00.000Д	515- 690	\geq 310	\geq 18,0	\geq 40,0	\geq 448	\geq 239	-	-	\geq 55	\leq 248

При удовлетворительном уровне прочности $\sigma_b=611-630\text{МПа}$ установлен достаточный запас предела текучести $\sigma_{0,2}=440-470\text{МПа}$ и высокий уровень низкотемпературной работы разрушения $KV^{-35}=155,9-205,3\text{Дж}$. При этом характеристики пластичности δ , Ψ находятся на высоком уровне, а соотношение $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ не превышает 0,75, что гарантирует конструктивную прочность и трещиностойкость материала в условиях высокого уровня нагружений. Следует отметить также достаточный запас «горячей» прочности при 460 $^\circ\text{C}$. Средняя величина относительного сужения при испытании на растяжение в z-направлении составила 63%, что свидетельствует о формировании оптимальной структуры и хорошем металлургическом качестве листа.

Установлено, что уровень твердости основного металла в состоянии после дополнительных отпусков минимальной и максимальной продолжительности не превышает 200,8 HV_{10} , что полностью удовлетворяет требованиям HV_{10} не более 248.

Дополнительно на металле лакировки 08X18H10T в состоянии после основной термообработки произведены испытания на стойкость против МКК. Образцы выдерживались в кипящем водном растворе сернокислой меди и серной кислоты в присутствии металлической меди. Продолжительность выдержки в кипящем растворе – 8,00 ± 0,25ч. Отсутствие трещин на испытываемой поверхности образцов, изогнутых после кипячения на угол 90⁰, свидетельствовало о стойкости металла лакировки 08X18H10T против МКК.

Прочность сцепления слоев при испытании на срез находится на уровне 400-485 МПа, что в 2 раза превышает требуемое значение $\sigma_{среза} \geq 200\text{МПа}$ и сопоставимо с пределом текучести основного металла ($\sigma_{0,2}=440-470\text{МПа}$).

В результате испытания на статический изгиб до угла загиба 180° установлена высокая пластичность основного металла и плакирующего слоя. На растянутой поверхности всех образцов после испытаний на изгиб не обнаружено никаких фиксируемых нарушений сплошности (рис.11).

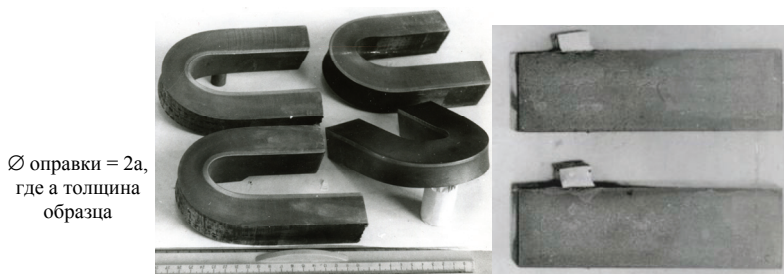


Рис. 11. Общий вид образцов плакированного листа из стали SA387Gr.22 cl.2 +08X18N10T после испытания на статический изгиб и испытания на срез плакирующего слоя

В современных сосудах для глубокой переработки нефти рабочая среда содержит до 85% водорода при высоком рабочем давлении и температуре, поэтому одним из главных показателей качества плакированных листов, применяемых в нефтепереработке и нефтехимии, является стойкость плакирующего слоя против отслаивания в среде водорода высоких параметров.

Дискообразные образцы испытывались в специальных автоклавах, в которых имитируются условия работы, а также перезагрузки нефтехимического реактора (табл.5).

Таблица 5

Условия испытаний по определению стойкости стали SA387Gr.22 cl.2 + 08X18N10T против отслаивания плакировки в среде водорода

Режим термообработки образцов	Фактические условия испытания в среде водорода				Продолжительность вылеживания, сутки
	T, °C	P _{H₂} , МПа	t _{выкл.} , ч.	V _{окл.} ⁴³⁵⁻²⁰⁰ °C/ч.	
620-630°C 4ч 30мин. + 680°C 7ч 40мин.	430-440	10,0-11,1	48	210-230	14-35
620-630°C 22ч 30мин. + 680°C 14ч.	430-440	10,0-11,0	48	208-215	14-31

Результаты испытаний плакированного листа композиции SA387Gr.22 cl.2 + 08X18N10T показали, что никаких отслоений не наблюдалось даже при предельных условиях испытаний: максимальное давление, максимальная скорость охлаждения. Это подтверждает хорошую прочность сцепления слоев и гарантирует работоспособность плакированного листа в условиях эксплуатации.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основании анализа приведенных в литературе данных установлено, что обычно используемые методы изготовления биметаллических (плакированных) листов недостаточно технологичны, трудоемки и могут приводить к браку плакирующего слоя. Метод пакетной прокатки является наиболее перспективным способом изготовления плакированных листов, обеспечивая более высокую прочность сцепления слоев, сопоставимую с прочностью основного металла.
2. Установлены закономерности структурных превращений в металле шва, происходящие при сварке пакетов из разнородных сталей 12ХМ и 08Х18Н10Т с использованием различных способов сварки и различных сварочных материалов. Разработаны рекомендации по технологии сборки и сварки несимметричных сварных вакуумированных пакетов.
3. Разработана и освоена технология изготовления методом пакетной прокатки плакированных листов с основой из хромомолибденовых сталей композиций 12ХМ+08Х18Н10Т и SA387Gr.22 c1.2+08Х18Н10Т для листовых и штампованных заготовок нефтехимических реакторов. Разработанная технология обеспечивает минимальную разнотолщинность плакирующего слоя по площади листа и уменьшение структурной неоднородности в переходной зоне. Получен патент на изобретение способа изготовления пакетов для производства крупногабаритных плакированных листов.
4. Установлено, что химический состав плакирующего слоя однороден на глубину до 3 мм, что гарантирует его достаточную коррозионную стойкость в процессе длительной эксплуатации. Основной металл плакированного листа отвечает всем требованиям соответствующего стандарта ASME и Спецификаций заказчика по «холодной» и «горячей» прочности, пластичности и твердости. Полученный плакированный лист обеспечивает высокий и стабильный уровень низкотемпературной работы удара KV^{-35} на уровне 155-205 Дж.
5. Исследовано влияние послесварочной термической обработки на микроструктуру и микротвердость переходной зоны плакированного листа SA387Gr.22 c1.2 + 08Х18Н10Т. Установлено, что проведение дополнительных послесварочных отпусков обеспечивает более равномерную структуру и твердость в переходной зоне плакированного листа.
6. Осуществлено широкое опытно-промышленное опробование и внедрение технологии изготовления плакированного листа методом пакетной прокатки. Внедре-

ние технологии производства крупногабаритных листов методом пакетной прокатки позволило изготовить в ОАО «Ижорские Заводы» ~5 тыс. тонн биметалла.

7. Метод пакетной прокатки позволяет обеспечить высокое качество плакированных листов, включая комплекс служебных свойств, удовлетворяющих требованиям как российских, так и зарубежных стандартов для таких изделий ответственного назначения как нефтехимические реакторы с длительным сроком эксплуатации.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Усовершенствование технологии сборки и сварки крупногабаритных пакетов с целью повышения качества двухслойных листов / С.А. Бочаров, Т.И.Титова, И.Ф. Семернина // Тезисы докладов научно-практической конференции молодых специалистов «Ижора - 2002», С.Пб., – Россия. – С.Пб., 2002. – С.65-66.
2. Оптимизация технологии изготовления и исследование крупногабаритных двухслойных плакированных листов из хромомолибденовых сталей применительно к сосудам давления, работающим при низких климатических температурах / С.А. Бочаров, Т.И.Титова, И.Ф. Семернина // Сборник трудов IX научно-технической конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов» С.Пб., Россия. – С.Пб., 2003. – С.77-81.
3. Прочность соединения слоев биметалла из стали SA387Gr.22 cl.2 + 08X18N10T при изготовлении и в условиях эксплуатации / С.А. Бочаров, Т.И.Титова, И.Ф. Семернина // Тезисы докладов научно-практической конференции молодых специалистов «Ижора - 2003», С.Пб., – Россия. – С.Пб., 2003. – С.84-88.
4. Биметалл 2,25Cr-1Mo + 08X18N10T для сосудов давления, эксплуатируемых в условиях климатического холода / Т.И.Титова, И.Ф. Семернина, С.А. Бочаров // Сборник докладов 6-ой международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы, технологии и их использование в технике». С.Пб., Россия. – С.Пб., 2004. – С.103-104.
5. **Оценка прочности соединения слоев биметалла 10X2M1A +08X18N10T, полученного методом пакетной прокатки / Ю.П. Солнцев, Т.И. Титова, С.А. Бочаров, И.Ф. Семернина, Э.С. Каган // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2005. – №11. – С.69-70 (перечень ВАК).**
6. Особенности структуры переходной зоны биметалла стали SA387Gr.22 cl.2+08X18N10T / С.А. Бочаров, Т.И.Титова, И.Ф. Семернина // Сборник трудов

- XII научно-технической международной конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов» С.Пб., Россия. – С.Пб., 2006. – С.136-140.
7. Патент RU 2274528 C2, МПК⁷ В23К 20/4, В32В 15/01, В32В 15/18. Способ изготовления пакетов для производства крупногабаритных плакированных листов / Дурынин В.А., Титова Т.И., Каган Э.С., Семернина И.Ф., Сорокин А.А., Бочаров С.А., Родичев А.Б., Салтыкова М.А. (РФ). – № 2004114058/02; заявл. 06.05.2004; опубл. 20.04.2006, Бюлл. №11.
8. Оценка прочности соединения слоев плакированного листа из сталей 10Х2М1А и 08Х18Н10Т, полученного методом пакетной прокатки / С.А. Бочаров, Т.И. Титова, Ю.П. Солнцев // Сборник трудов XIII научно-технической международной конференции «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов» С.Пб., Россия. – С.Пб., 2007. – С.35-39.