

ГОУ ВПО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

УДК 620.690

ЦВЕТКОВ Александр Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СВАРНЫХ ХЛА-
ДОСТОЙКИХ КОНСТРУКЦИЙ ОТВЕТСТВЕННОГО
НАЗНАЧЕНИЯ ЗА СЧЁТ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Специальность: 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Диссертация выполнена на кафедре «Технология конструкционных материалов и металловедение» в Санкт-Петербургском Государственном Политехническом Университете.

Научный руководитель - Заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор, доктор технических наук **Солнцев Юрий Порфирьевич**

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор **Пряхин Евгений Иванович**,

- кандидат технических наук, **Малыхина Ольга Юрьевна**.

Ведущая организация – ОАО «ГОЗ ОБУХОВСКИЙ ЗАВОД»


Защита состоится «21» июня 2011 года в «16» часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 при ГОУ ВПО Санкт-Петербургском Государственном Политехническом Университете по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет»

Автореферат разослан «___» _____ 2011 года

Ученый секретарь
диссертационного совета

доктор технических наук, профессор



Востров В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Особую актуальность проблема снятия остаточных напряжений крупногабаритных изделий ответственного назначения приобрела в связи с разработкой изделий нового поколения, работающих в широком диапазоне климатических температур (от минус 50°С до плюс 50°С) в условиях статических и динамических нагрузок и требующих высокой геометрической стабильности при эксплуатации в течение длительного периода времени.

Надёжность работы таких изделий в зимнее время может быть снижена, что может привести к полному отказу работоспособности или к аварийной ситуации. В последнее время среди предприятий – изготовителей существует жёсткая конкуренция за расширение технологических возможностей, позволяющих получить комплекс механических и технологических свойств, не повышая стоимости изделия в целом.

Снятие сварочных напряжений длинномерных сборочных конструкций сложной конфигурации путем термической обработки требует обязательной сложной и дорогостоящей специальной индивидуальной оснастки, удлиняет технологический цикл изготовления и может привести к невозможности проведения правки.

Вышеизложенное показывает актуальность данной работы, её практическую направленность и востребованность для решения задач повышения надёжности изделий ответственного назначения специальной техники.

Цель работы и задачи исследования.

Целью работы является определение путей повышения надёжности крупногабаритных сварных конструкций за счёт снижения уровня остаточных напряжений методом низкочастотной вибрационной обработки.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- сопоставить уровни внутренних напряжений в сварных конструкциях после сварки, после термической обработки и после вибрационной обработки;
- определить значения технологических параметров низкочастотной вибрационной обработки, необходимых для достаточного снятия внутренних напряжений после сварки;
- сравнить уровни механических свойств материала конструкций после сварки, после термического отжига, после низкочастотной вибрационной обработки;
- определить влияние термической и низкочастотной обработок на структуру стали сварных конструкций;
- разработать и внедрить технологию низкочастотной вибрационной обработки.

Научная новизна.

- разработана методика определения внутренних напряжений магнитным методом с помощью сканер – дефектоскопа магнитоанизотропного «КОМПЛЕКСА-2.05».
- изучены и сопоставлены внутренние напряжения и механические свойства материалов в состоянии поставки, после сварки, после термического отжига и после низкочастотной вибрационной обработки.
- определены значимые параметры низкочастотной вибрационной обработки.
- определены значения параметров низкочастотной вибрационной обработки, достаточные для снятия внутренних напряжений и приобретения материалом требуемого уровня механических свойств.

Практическая значимость.

Результаты работы были использованы в разработке и внедрении технологического процесса низкочастотной вибрационной обработки крупногабаритных сварных сборок. Разработана методика контроля уровня остаточных напряжений до и после низкочастотной виброобработки. Технологический процесс внедрён на ОАО «ГОЗ ОБУХОВСКИЙ ЗАВОД».

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием фундаментальных положений физики твёрдого тела, теории металловедения и современного метода определения величин остаточных напряжений. Результаты экспериментов и исследований, научные положения и выводы подтверждены многолетней эксплуатацией изделий по прямому назначению.

Апробация работы.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях и семинарах:

- XI научно-техническая конференция «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов», СПб, 2006 г.

- XII научно-техническая конференция «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов» СПб, 2008 г.

Публикации.

По материалам работы опубликованы три статьи в изданиях, входящих в список ВАК РФ. Библиографический список работ приведён в разделе «ЛИТЕРАТУРА».

Структура и объём работы.

Работа состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка литературы из 137 наименований и одного приложения, изложена на 156 страницах, включая: 10 таблиц, 96 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследования, поставлены основные задачи. Показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Глава 1. Современное состояние вопроса. В первой главе приведены данные по анализу состояния существующих современных подходов к проблеме повышения надёжности крупногабаритных сварных изделий. Проведён анализ, классификации и причин образования остаточных напряжений. Описаны способы уменьшения внутренних напряжений, их достоинства и недостатки, обоснован выбор основных способов: термический отжиг и низкочастотная вибрационная обработка.

Приведён обзор литературных данных существующих методов определения остаточных напряжений. Сделано обоснование выбора магнитного метода измерения остаточных напряжений как основного.

Описаны исследуемые крупногабаритные сварные конструкции (габаритные размеры до 8 м, масса до 8 тонн), условия их эксплуатации, включая условия работы на Крайнем Севере. Конструкторы исследуемых изделий сделали наиболее технически и экономически целесообразный выбор материала - сталь низкоуглеродистая низколегированная феррито-перлитного класса 10ХСНД ГОСТ 19281-89 класса прочности 390.

Приведено физическое обоснование уменьшения остаточных напряжений в стали в результате резонансных низкочастотных колебаний сварных конструкций. Считается, что снижение статических напряжений вызывается действием звукового давления

$$p_a = \rho c \omega A = \rho c 2\pi f A \quad (1)$$

где: p_a – снижение статических напряжений, ρ - плотность материала, c – скорость звука в этом материале; ω - угловая частота; A – амплитуда колебаний.

Для максимальных значений параметров виброобработки в соответствии с формулой 1 теоретически возможно следующее снижение остаточных напряжений.

$$p_a = 7850 \text{ кг/м}^3 * 4900 \text{ м/с} * 2 * 3,14 * 100 \text{ Гц} * 0,01 \text{ м} * (10^{-6}) = 241,56 \text{ МПа} \quad (2)$$

где: 7850 кг/м^3 (ρ) - плотность стали, 4900 м/с (c) – скорость звука в стали;

$2 * 3,14 * 100 \text{ Гц}$ (ω) - угловая частота; $0,01 \text{ м}$ (A) – амплитуда колебаний.

Это утверждение позволило с уверенностью судить о существовании физической возможности снижения остаточных напряжений низкочастотной вибрационной обработкой.

В результате выполненного анализа в главе 1 определены основные задачи диссертационной работы.

Глава 2. Методика исследований. Определение химического состава проводили на приборе ДФС-71 «Спектр» по программе Win Quant для многоканальных оптических эмиссионных спектрометров. Размер образца $\sim 30 \times 30 \times s$ мм (где s – толщина листового металла).

Механические свойства определялись испытанием на разрыв плоских образцов в соответствии с ГОСТ 6996–66 образцы тип XII со стрелой прогиба не более 4 мм при плюс 20°C на испытательной машине EU 40 и FPZ100 (изготовитель Fritz Herkert).

Ударные испытания проводились на маятниковом копре КМ 30 в соответствии с ГОСТ 6996–66 на образцах тип VIII и XI, при +20°C и при –60°C в соответствии с ГОСТ 9454.

Исследование микроструктуры проводились металлографическим методом на микроскопе ЛВ-31М при 50÷1000–кратном увеличении (балл зерна определялся по шкалам ГОСТ 5639–82). Травление микроструктуры проводилось в 4-х процентном растворе FeCl₃.

Определения значений остаточных напряжений проводили при помощи сканер–дефектоскопа магнитоанизотропного КОМПЛЕКСА-2.05, который предназначен для оперативного выявления и оценки концентраторов механических напряжений, градиентов разницы главных механических напряжений, а также для определения остаточных напряжений сварных металлических конструкций. Внешний вид комплекса и его составляющие компоненты представлен на рис. 1.



Рис. 1. «Комплекс 2,05». Внешний вид.

В состав входят: блок измерений, преобразователь (датчик), ППК (портативный персональный компьютер – ноутбук) с программным обеспечением, образцы для проверки работоспособности прибора в полевых условиях.

Методика проведения низкочастотной вибрационной обработки заключается в применении комплекса ВТУ «Вебрь», который состоит из вибратора, состоящего из вибровозбудителя и электродвигателя (рис. 2.), и блока управления (рис. 3.). Вибровозбудитель комплекса – центробежный, одновальный, с круговой возмущающей силой и дисбалансом, регулируемым в неподвижном состоянии. Для регулирования величины возбуждающей силы, эксцентрик выполнен в виде дисков с равными дисбалансами. Диски могут вращать-

ся относительно общей оси. Регулирование осуществляется путем изменения взаимного расположения дисков. При включении двигателя, вращающийся эксцентрик вызывает круговые колебания вибровозбудителя, передающиеся конструкции, на которой он установлен. При значении угла между лепестками эксцентрика 180° , нагрузка составляет 0 %, при уменьшении угла до 0° нагрузка увеличивается до 100 %. Плавная регулировка угла позволяет изменять виброусиления в диапазоне от 0 до 18 кН.

Блок управления позволяет регулировать следующие величины: частоту вращения двигателя и время обработки; и позволяет измерять силу тока электродвигателя, частоту вращения и время обработки. Максимальная мощность электродвигателя составляет 0,4 кВт. Максимальная сила тока электродвигателя составляет 3,5 А.

Суть обработки состоит в следующем: вибратор жёстко закрепляется на обрабатываемой конструкции на месте, выбранном по специальной методике, устанавливается начальная нагрузка, затем происходит запуск и вращение вала электродвигателя при частотах от 0 до 120 Гц. При этом на определённых частотах происходит резонансное колебание конструкции.



Рис. 2. Вибратор Комплекса низкочастотной вибрационной обработки ВТУ «Вепрь»



Рис. 3. Блок управления комплекса низкочастотной вибрационной обработки ВТУ «Вепрь».

В процессе виброобработки на резонансных частотах происходит смещение максимума силы тока в сторону уменьшения частоты вращения вала электродвигателя. Производители виброкомплекса и литературные данные утверждают, что это связано с изменением сложноподвижного состояния конструкции, что свидетельствует об изменении внутренних напряжений, окончание смещения максимумов свидетельствует об окончании процесса виброобработки. По опыту создателей виброкомплекса это происходит через $5 \div 10$ мин обработки.

В процессе виброобработки происходит уменьшение напряжений сварных швов, лежащих перпендикулярно оси вращения электродвигателя вибратора. Для обработки других швов необходимо произвести переустановку вибровозбудителя перпендикулярно первоначальному положению.

Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре автоматизированном рентгеновском для изучения текстур ДАРТ-УМ1 на образцах после электрополирования со съёмом металла ≈ 25 мкм.

Прецизионные съёмки интервалов брегговских углов дифракций методом $\sin^2\psi$ осуществлялись в фильтрованном $FeK\alpha$ - излучении. Первичный и дифрагированный

рентгеновские пучки коллимировались с помощью щелей вертикальной и горизонтальной расходимости $2 \times 2 \text{ } 0,25 \text{ мм}$, с β - фильтром и щелями Соллера на первичном и дифрагированном пучке расходимостью $2,5^\circ$. Облучаемая зона составляла $5 \times 7 \text{ мм}$ по поверхности образца при этом глубина проникновения рентгеновских лучей в материал исследуемых образцов α -Fe, феррит, для $\text{FeK}\alpha$ - излучения составила порядка 12 мкм . Для исследования макронапряжений методом $\sin^2\psi$ использовался дифракционный максимум α -Fe феррита, от серии плоскостей (211) с межплоскостным расстоянием $d=1,168\text{Å}$.

Обработка дифракционных максимумов проводилась по программе Separation of multiplets.

Фрактографическое исследование проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа «VEGA II LMU» фирмы «TESCAN» на ударных образцах с острым надрезом (KCV) после испытания при минус 50°C . Классификация видов изломов проводилась в соответствии с РД 50-672-88.

Изучение тонкой структуры производили на просвечивающем электронном микроскопе FEI Tecnaei 30 ST, оснащённом цифровой камерой Gatan Ultrascan 1000 P, при ускоряющем напряжении 200 кВ . Тонкую фольгу для исследования изготавливали методом электролитического полирования в хлорно-спиртовом электролите А II на установке Struers Tenupol-5 при температуре 20°C и напряжении 26 В . Образцы представляют собой бруски высотой 3 мм , которые для последующего изготовления тонкой фольги вырезали из зоны термического влияния близ сварного шва, в направлении, параллельном шву. Для определения границ сварного шва из образцов были получены макрошлифы. Столбики диаметром 3 мм резали на заготовки толщиной $0,8 \text{ мм}$ при помощи отрезного станка Struers Minimet. Далее заготовки утоняли на шлифовальной бумаге до толщины $0,1 \text{ мм}$. Плотность дислокаций определяли по методу секущих.

Испытания на малоцикловую усталость проводились после различных состояний (сварка, термическая обработка, низкочастотная вибрационная обработка), испытывали образец тип X ГОСТ 25502. Испытания проводили на разрывной машине МЦД до базового числа циклов 40×10^4 . Основной вид нагружения: растяжение – сжатие при размахе пластической деформации от 1 до 10% .

Глава 3. Технология низкочастотной вибрационной обработки. В третьей главе предоставлены результаты изучения параметров технологии низкочастотной вибрационной обработки.

Изучение параметров технологии виброобработки началось с определения места установки вибровозбудителя, оптимального режима низкочастотной вибрационной обработки и её длительности.

Одной из технологических особенностей стала необходимость определения критериев выбора места установки вибровозбудителя на конструкции. Было принято решение исследовать стоячую волну колебания конструкции, а именно использовать маркировку поверхности сыпучим материалом. Перед возбуждением колебаний на поверхность конструкции равномерно наносился сыпучий материал – песок или мелкая стальная дробь. В процессе резонансных колебаний сыпучий материал начинал перемещаться в места минимального колебания конструкций. Такие места представляли собой линии на поверхности. Многократные повторения свидетельствовали о том, что эти линии практически неизменны для всего диапазона вращения вала электродвигателя от 0 до 120 Гц . Перестановка вибровозбудителя на другое место показала, что расположение линий минимального колебания конструкции практически не меняется. Параллельно линиям минимального колебания конструкции на равном удалении от них (посередине между ними) находились линии максимального колебания конструкций. При перемещении места установки вибровозбудителя на места максимального колебания конструкции наблюдалось неустойчивое вращение вала электродвигателя, резкое увеличение силы тока электродвигателя при незначитель-

ном увеличении амплитуды колебания конструкции. Данный факт позволил сделать вывод о том, что при установке вибровозбудителя на место максимального колебания конструкции вибратор испытывает максимальные нагрузки и сам препятствует резонансным колебаниям конструкции.

Опыт проведения низкочастотной виброобработки позволил сформировать решение о необходимости размещения вибровозбудителя на пересечении силовых частей сварной конструкции и максимально близко к линиям минимального колебания.

В результате были выработаны основные требования к технологическому процессу низкочастотной вибрационной обработки, а именно:

- требования к конструкции: конструкция должна иметь по возможности плоскую конфигурацию; необходима собственная жёсткость конструкции для того, чтобы резонансные колебания не привели к остаточным деформациям при обработке.
- требования к месту установки вибровозбудителя можно свести к расположению вибровозбудителя максимально приближено к местам минимального колебания конструкции, пересечению основных элементов жёсткости конструкции.
- требование к инструментам крепления вибровозбудителя: основным инструментом крепления вибровозбудителя к конструкции являются струбцины.
- требование к количеству мест установки вибровозбудителя на конструкции свелись к тому, что достаточно одного места установки на 4 м длины конструкции.
- требования к количеству резонансов обработки и критериям выбора основного резонанса обработки: наилучшей резонансной частотой вращения электродвигателя вибровозбудителя является та, при которой выполняются условия: частота вращения двигателя лежит в диапазоне от 30 до 90 Гц, резонанс должен быть устойчивым, сила тока двигателя должна быть не более 3 А. Под данные условия подходят не более двух резонансных частот. Именно они и применяются для проведения обработки.
- требование к величине нагрузки – величина нагрузки в процентах определяется опытным путем для каждой конструкции отдельно. Начинать отработку технологических параметров виброобработки необходимо с нагрузки 25%, если при этом резонансные колебания конструкции неустойчивые следует увеличить нагрузку на 10÷25%. Если данные действия не приводят к желаемому результату, необходимо опять увеличить нагрузку.
- требование к продолжительности обработки - опыт проведения низкочастотной вибрационной обработки сформировал следующее мнение: при обработке конструкции на одной точке вполне достаточно 20 минут на одну точку одного направления оси вращения.
- требования к приемке технического контроля после проведения виброобработки: проверка соответствия геометрических размеров конструкции должна проводиться до и после проведения низкочастотной вибрационной обработки, целостность сварных швов при необходимости также должна проверяться до и после обработки.

Так же в главе приведены статистические данные вибрационной обработки сварных конструкций на ведущем предприятии: за период освоения низкочастотной вибрационной обработки с апреля 2003 года по декабрь 2010 года было обработано более 600 конструкций различных типоразмеров. Обработка продолжается и в настоящее время. За этот период каждая партия изделий прошла натурные испытания, обкатку в условиях эксплуатации и ходовые испытания. Результаты показали, что конструкции выдержали испытания, нарушение сварных швов и геометрические поводки отсутствовали. Этот факт может свидетельствовать об удовлетворительных результатах низкочастотной вибрационной обработки. За время эксплуатации сварных конструкций не было получено ни одной рекламации к их качеству.

В процессе отработки технологического процесса низкочастотной вибрационной обработки были разработаны технологический процесс и сопроводительная документация для выполнения работ.

Сварные конструкции, в технических требованиях к которым предусмотрена низкочастотная вибрационная обработка были различные, яркие примеры: рама (габаритные размеры 12 x 4 x 1,5 м, масса 7 800 кг), корпус (габаритные размеры 1 x 1 x 1 м, масса 60 кг), опора (габаритные размеры 2 x 1 x 0,4 м, масса 280 кг).

Опыт эксплуатации виброкомплекса показал следующее:

- комплекс является достаточно надежным и неприхотливым в эксплуатации.
- при проведении обработки достаточно привлечения на один комплекс двух операторов. Так же возможна работа двух операторов с двумя виброкомплексами одновременно.
- при отработке технологического процесса низкочастотной вибрационной обработки в массовом производстве сварных конструкций не потребуется привлечения операторов высокой квалификации, достаточно будет одного опытного руководителя на несколько виброкомплексов.
- время проведения низкочастотной вибрационной обработки составляет несколько часов.
- экономические затраты на обслуживание виброкомплекса в процессе эксплуатации ничтожно малы, выполнение регламентных работ не требует привлечения обслуживающего персонала высокой квалификации.
- применение виброкомплекса позволило исключить транспортные операции перевозки изделий из сборочных цехов в термические цеха и обратно, данная операция выполняется на организованной площадке в сборочном цехе.
- несоизмеримы затраты энергоносителей при термической обработке и низкочастотной вибрационной обработке, данный фактор является одним из наиболее важных.
- при отработке технологического процесса низкочастотной вибрационной обработки не требуется специальной металлоемкой и трудоемкой оснастки для заневоливания.

Перечисленные факторы позволяют сделать вывод, что замена термического отжига снятием внутренних напряжений после сварки низкочастотной вибрационной обработкой приводит к значительной экономии средств, трудозатрат и энергоносителей, а также значительно снижает стоимость работ за счёт исключения большого количества подготовительных операций.

Глава 4. Исследование влияния термической и низкочастотной вибрационной обработок на механические свойства и структуру стали 10ХСНД. Изначально было проведено исследование достоверности измерения остаточных напряжений магнитным методом. Первоначальные замеры сканера – дефектоскопа магнитоанизотропного показали, что полученные данные показывают значения, которые в несколько раз превышают предел текучести материала. Корректность этих результатов была поставлена под сомнение и совместно с предприятием-изготовителем прибора была разработана новая методика тарировки, которая основывалась на измерении внутренних напряжений в материале при линейном растяжении на испытательной машине. После проведения тарировки и корректировки программного обеспечения была проведена проверка измеряемых данных по методике: в испытательную машину устанавливались образцы из стали 10ХСНД размером 8x100x500 мм (образец №1 – в состоянии поставки, образец №2 – после термического отжига для снятия сварочных напряжений по режиму предприятия – изготовителя при 510°C, оба образца имели предел текучести близкий к 400 МПа) и проводилось растяжение по стороне 500 мм.

На рис. 4 изображено наиболее показательное поле напряжений, которое построено при помощи программного обеспечения портативным персональным компьютером на основе данных измерения внутренних напряжений. Линии на рисунках означают напряже-

ние, число на линии соответствует значению напряжений в мегапаскалях. Знак минус при значении внутреннего напряжения означает напряжение сжатия.

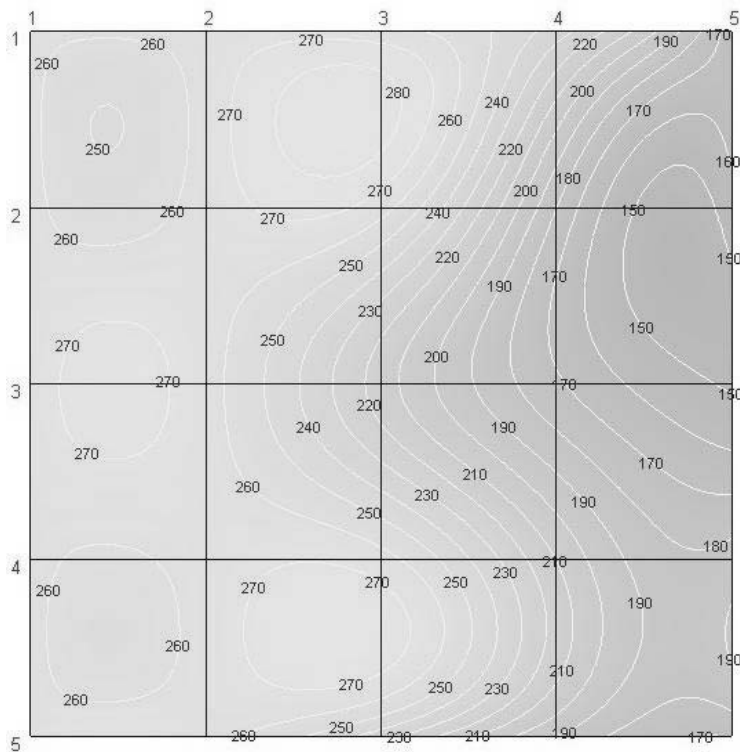


Рис. 4. Поле внутренних напряжений в МПа образца №1 8x100x500 мм сталь 10ХСНД ГОСТ 19281-89, нагрузка 24 тонн, расчётное напряжение 294 МПа, шаг сетки 10x10 мм.

После проведения испытаний было принято решение считать данные измерений внутренних напряжений корректными и принять за основу прибор сканер – дефектоскоп магнитоанизотропный, как измеритель внутренних напряжений.

Химический состав и механические свойства исследуемых плавок стали 10ХСНД в состоянии поставки соответствуют требованиям ГОСТ 19281 и по легирующим элементам поплавно очень близки. Также следует обратить внимание на очень высокий уровень КСУ₅₀ в состоянии поставки ($90 \div 130$ Дж / см², при требовании не менее 34), что свидетельствует об очень высоком качестве используемой стали.

Результаты испытания на малоцикловую усталость при различных размахах деформации (ϵ) приведены на рис. 5 и показывают, что при деформации $\sim 10\%$ количество циклов крайне мало и составляет в среднем 20 после сварки и 25 после виброобработки.

После термической обработки при этом же размахе деформации число циклов в среднем равно 53. И те и другие значения крайне малы и свидетельствуют о том, что при расчётах циклической прочности конструкций деформация не может быть 10%.

При деформации 1% количество циклов колеблется от 900 до 1500 на образцах после сварки и виброобработки соответственно. При этом же размахе деформации (1%) образцов после отжига количество циклов составляет около 70000 циклов, что существенно выше, чем после низкочастотной вибрационной обработки.

При размахе деформации 0,3% значения, полученные после термической обработки и после низкочастотной вибрационной обработки близки и составляют 50777 и 50343 соответственно. Результаты испытания на малоцикловую усталость показали, что при деформации от 2 до 10% сварная конструкция будет неработоспособна, что приведет к усталостному разрушению.

При размахе деформаций 0,3% образцы показали высокие значения сопротивления усталости.

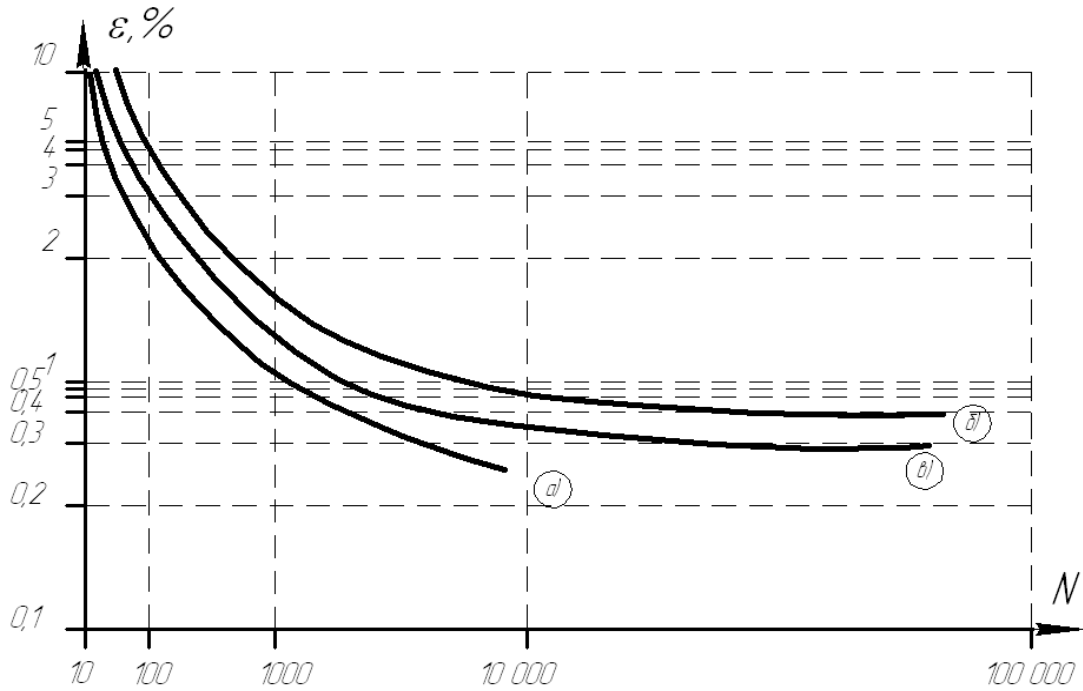


Рис. 5. Циклическая прочность сварных образцов стали 10ХСНД в различном состоянии.

где: ε - размах деформации при нагружении (%), N - число циклов.

а - образец после сварки; б - образец после отжига 510 °С; в - образец после виброобработки.

Исследование структуры металла 10ХСНД после сварки и после термического отжига проводилось на образцах, вырезанных из сваренного встык листа толщиной 8мм. Сварка выполнялась ручным электродом встык с усилением корня шва. Отжиг проводился при температурах 330°С, 570°С, 640°С, 780°С с медленным нагревом в муфельной печи.

Микроструктура сварного соединения в области шва преимущественно состоит из ферритной фазы (до 80%), вытянутой вдоль направления кристаллизации расплавленного металла сварной зоны и верхнего бейнита с перистоподобной морфологией. Мелкодисперсная карбидная фаза расположена преимущественно по границам. Структура зоны термического влияния имеет крупнозернистое строение, состоящее из бейнита с выделением феррита по границам зёрен.

Зона основного металла после отжига 330°С состоит из мелкофрагментированных зёрен феррита, характерных для деформированного, нормализованного металла. После такого отжига характер микроструктуры по зонам сварного соединения не изменяется и аналогичен структурам без проведения отжига.

После отжига 570°С микроструктура отличается более четкой контрастностью по границам ферритной и бейнитной фаз. Это связано с большей травимостью границ в результате начала выделения мелкодисперсных зёрнограницных карбидов.

Микроструктура после отжига 640°С характеризуется более четким выделением мелкодисперсных карбидов, что связано с их коагуляцией при неизменной морфологии феррита и бейнита в различных зонах сварного соединения.

Отжиг 780°С приводит к образованию зернистого перлита в зонах металла сварного соединения с сохранением фрагментов первоначальной ориентации структуры металла шва и границ крупных зёрен бейнита в зоне термического влияния.

Также было проведено сравнительное исследование рентгеновских величин искаженности кристаллической решётки, в зависимости от длительности циклического нагружения, в сплошном и сварных образцах. В качестве материала для исследования использовались образцы 8x20x80 из стали 10ХСНД ГОСТ 19281-89, изготовленные из листа тол-

щиной 8 мм. Сплошные в состоянии поставки и сварные из того же листа с расположением стыкового шва в центре. Образцы циклически нагружались на резонансном вибраторе системы Б.А. Дроздовского при угловой амплитуде качающейся части, не превышающей $1,6^\circ$ с симметричным циклом. Частота колебаний подвижной части вибратора составляла 30 Гц. Съёмку каждого образца проводили в трех местах по сечению: на поверхности, в середине и промежуточном слое. Съёмку сварных образцов проводили в зоне границы сплавления основного металла и металла шва, также по трем сечениям.

Установлено, что при деформации циклическим изгибом сварного образца на первом этапе наблюдается эффект упрочнения до максимального уровня искажения кристаллической решётки. Затем при дальнейшем нагружении, наблюдается эффект разупрочнения, связанный с развитием релаксационных процессов. При нагружении образца сплошного металла также наблюдаются эффекты упрочнения и разупрочнения. При этом как в сварном, так и в сплошном образце уровень упругих искажений кристаллической решётки возрастает от середины к поверхности.

Циклическое нагружение положительно влияет на пик максимальных упругих искажений у границы сплавления, сдвигая его в область основного металла. Таким образом, снижается концентрация напряжений у наиболее дефектной зоны сварного соединения.

Исследование влияния сварки, термообработки и низкочастотной виброобработки на свойства стали марки 10ХСНД проводили на наиболее часто используемых листах толщиной 8мм. В связи с существенным влиянием ориентировки волокна и надреза относительно плоскости горячей деформации на величину предела текучести и ударной вязкости образцы вырезали в поперечном направлении прокатки, а надрез на ударном образце – вдоль толщины листа. Термическую обработку проводили в интервале температур $330 \div 920^\circ\text{C}$.

При нагреве 720°C условный предел текучести падает и становится ниже требуемого (390 МПа). Аналогичная зависимость наблюдается и при испытаниях образцов сварного шва. Отжиг при температуре 720°C (отжиг на зернистый перлит) приводит к изменениям структуры, благоприятно влияющим на снижение структурной неоднородности. Микроструктура основного металла и переходной зоны после отжига 720°C равновесна и имеет балл зерна выше 8 ГОСТ 5939. Перлит в переходной зоне и в зоне основного металла имеет зернистое, а не пластинчатое строение.

Комплекс механических свойств обеспечивается низкочастотной вибрационной обработкой и, следовательно, обеспечивает эксплуатационные свойства сварного металла.

Были проведены исследования тонкой структуры сварных образцов до и после низкочастотной вибрационной обработки. Структура стали 10ХСНД после прокатки представляет собой систему множества разориентированных между собой микрокристаллов, каждый из которых заполнен дислокациями.

Тонкая структура основного металла стали 10ХСНД показала, что феррит представляет собой полигональные зёрна размером более 5 мкм. Плотность дислокаций составляет $(8 \div 9) \times 10^9 \text{ см}^{-2}$. Дислокации распределены по телу зерна равномерно и хаотично. Карбидных выделений в феррите не обнаружено. Тонкая структура основного металла состоит в основном из феррита (объёмная доля 60-70%), гранулярного бейнита с аустенитно-мартенситными островками (объёмная доля 20-30%). В структуре также обнаружено незначительное количество перлита (около 5-10%).

На рис. 6 приведена тонкая структура зоны термического влияния после сварки металла стали 10ХСНД. Структура металла зоны термического влияния (ЗТВ) в образце после сварки, как и основного металла, состоит из феррита (объёмная доля $70 \div 80\%$) и гранулярного бейнита с аустенитно-мартенситными островками (объёмная доля $20 \div 30\%$).

Феррит (рис. 6) представляет собой полигональные зёрна размером более 5 мкм. Плотность дислокаций составляет $(5 \div 7) \times 10^9 \text{ см}^{-2}$. Дислокации распределены по телу зерна равномерно и хаотично. Карбидных выделений в феррите не обнаружено.

Гранулярный бейнит состоит из ферритных фрагментов с неявно выраженными границами. Размер этих фрагментов варьируется в широких пределах и может достигать 1,5 мкм. Плотность дислокаций в бейните составляет $(1,6 \div 1,7) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$. В бейните обнаружены островки остаточного аустенита (тёмные области на рис.7.) размером $0,2 \div 0,5 \text{ мкм}$.

Следует отметить, что плотность дислокаций в ЗТВ несколько меньше, чем в основном металле. Уменьшение плотности дислокаций в ЗТВ по сравнению с основным металлом связано, по-видимому, с нагревом этой области во время сварки.

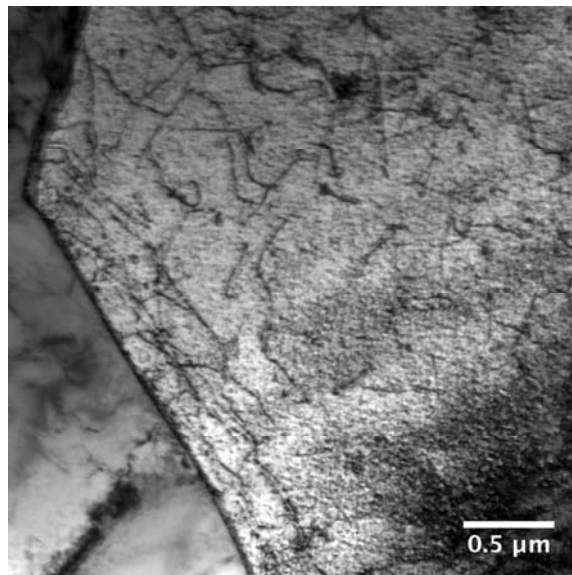


Рис. 6. Металл зоны термического влияния после сварки стали 10XСНД. Феррит

Структура металла ЗТВ в образце после виброобработки, как и основного металла, состоит из феррита (объёмная доля $70 \div 80\%$) и гранулярного бейнита с аустенитно-мартенситными островками (объёмная доля $20 \div 30\%$).

Феррит представляет собой полигональные зёрна размером более 5 мкм. Плотность дислокаций составляет $(4 \div 5) \times 10^9 \text{ см}^{-2}$. Большинство дислокаций распределены по телу зерна равномерно и хаотично. В отдельных зёрнах отмечены скопления параллельных дислокаций или микродвойники. Карбидных выделений в феррите не обнаружено.

Гранулярный бейнит состоит из ферритных фрагментов с неявно выраженными границами. Размер этих фрагментов варьируется в широких пределах и может достигать 1,5 мкм. Плотность дислокаций в бейните составляет $(1,5 \div 1,6) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$. В бейните обнаружены островки остаточного аустенита размером $0,2 \div 0,5 \text{ мкм}$.

Мартенсит в островках имеет речную морфологию, ширина реек составляет $0,1 \div 0,2 \text{ мкм}$, плотность дислокаций в рейках $(1,9 \div 2,2) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

В феррите обнаружены следы пластической деформации.

Структура металла ЗТВ в образце после отжига при 510°C , как и основного металла, состоит из феррита (объёмная доля $70 \div 80\%$) и гранулярного бейнита (объёмная доля $20 \div 30\%$).

Феррит представляет собой полигональные зёрна размером более 5 мкм. Плотность дислокаций составляет $(5 \div 7) \times 10^9 \text{ см}^{-2}$. Большинство дислокаций распределены по телу зерна равномерно и хаотично. Однако, в отдельных местах обнаружено разделение цельных ферритных зёрен на субзёрна размером около 1 мкм, практически свободные от дислокаций. Это говорит о наличии частичной полигонизации дислокационной структуры. На дислокациях в феррите обнаружены мелкодисперсные выделения размером $0,02 \div 0,04 \text{ мкм}$. По границам ферритных зёрен встречаются вытянутые карбиды длиной $0,2 \div 0,4 \text{ мкм}$ и толщиной $0,05 \text{ мкм}$.

Островки остаточного аустенита в гранулярном бейните при отжиге распались на феррито-карбидную смесь. Размер карбидов $0,1 \div 0,2 \text{ мкм}$. Плотность дислокаций в ферритной компоненте бейнита составляет $(1,5 \div 1,6) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Дислокационная структура также частично полигонизована.

Различия в структуре основного металла и в структуре зоны термического влияния без последующей обработки незначительны. Низкочастотная виброобработка не оказывает существенного влияния на структуру металла зоны термического влияния, хотя в структу-

ре присутствуют следы пластической деформации. При отжиге при 510°C в течение 1,5 ч. происходит частичная полигонизация дислокационной структуры, что может приводить к частичной релаксации внутренних напряжений в зоне термического влияния.

Фрактографическое исследование проводилось на трёх изломах образцов из стали 10ХСНД после испытаний на ударный изгиб. Образцы изготовлены из сварного соединения с надрезом по ЗТВ и имеют следующие свойства:

образец №1 – после сварки, $KCV=40\text{Дж/см}^2$;

образец №2 – после виброобработки, $KCV=85\text{Дж/см}^2$;

образец №3 – после отжига 510°C 1,5 часа, $KCV=97\text{Дж/см}^2$;

В результате исследования установлено, что излом образца №1 неоднородный, волокнисто-полосчатый с кристаллической зоной и боковыми утяжками. Волокнисто-полосчатые участки расположены вблизи надреза и за кристаллической зоной. Волокнисто-полосчатые участки представляют собой поверхность разрушения, имеющую слоистое строение. Слои располагаются в виде параллельных ориентированных волокон с рельефом вязкого внутризёрненного разрушения. Волокнисто-полосчатая структура является признаком одного из дефектов стали – шиферности. В данном случае шиферность связана с большим количеством строчечных неметаллических включений – сульфидов. В кристаллической зоне выявлено хрупкое внутризёрненное разрушение.

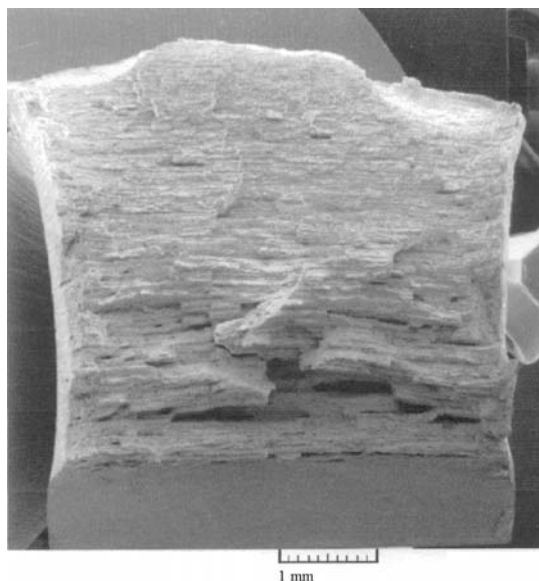


Рис. 7. Фрактограмма. Общий вид; излом однородный, волокнисто-полосчатый с боковыми утяжинами.

Фрактографические исследования показали:

- в изломе металлов в состоянии после сварки наблюдается неоднородность, вблизи острого надреза и вдали от него отмечены зоны вязкого внутризёрненного разрушения, в средней части имеются островки хрупкого внутризёрненного характера, ударная вязкость такого образца незначительна и равна 40 Дж/см^2 .
- в изломе металла в состоянии после термической обработки при $T=510^{\circ}\text{C}$ обнаружена шиферность, вызванная выделением сульфидов, ударная вязкость более чем в 2 раза выше, чем в состоянии после сварки.
- в изломе металла в состоянии после вибрационной обработки также отмечена шиферность, но менее выраженная по сравнению с металлом после термического отжига, ударная вязкость находится на уровне вязкости металла после отжига (85 Дж/см^2).

Исследования влияния температуры термического отжига на уровень внутренних напряжений в сварной конструкции проводились на материале 10ХСНД в виде листов толщиной 2,5, 4 и 8 мм. Листовые заготовки размером 150 x 300 мм в состоянии поставки ($\sigma_{0,2}$ не менее 390 МПа) были нарублены гильотинными ножницами, затем сварены в виде тавра по технологии завода – изготовителя полуавтоматической сваркой.

На каждом этапе (в состоянии поставки, после сварки, после отжига 510°C , после отжига 690°C , после отжига 920°C) проводились измерения: замер внутренних напряжений при помощи сканер–дефектоскопа магнитоанизотропного «Комплекс 2.05» по нане-

сенной на лист сетке размером 12 строк x 25 столбцов с шагом 10 мм, сварной шов проходил по шестому столбцу.

На рис. 8. приведён пример замера поля внутренних напряжений после сварки (площадь замера – 12 x 25 см). Результаты замеров напряжений показали, что материал в состоянии поставки характеризуется существенными напряжениями. Измерение напряжений после сварки показало, что в тонколистовой конструкции (толщина листа 2,5 мм) наблюдаются растягивающие напряжения, составляющие до 80% от расчётного предела текучести. Это, по-видимому, связано с большими скоростями охлаждения материала от высоких температур в зоне шва при сварке. С увеличением толщины материала значение растягивающих напряжений уменьшается, и составляет до 50% от расчётного предела текучести.

Измерения напряжений после проведения низкочастотной вибрационной обработки показывают снижение внутренних растягивающих напряжений с сохранением сжимающих напряжений, что не может служить причиной разрушения материала. Наиболее опасными являются растягивающие напряжения. Исследования свойств стали 10ХСНД после низкочастотной вибрационной обработки показали, что механические свойства при 20°C и при минус 60°C соответствуют требованиям нормативно-технической документации.

Измерение напряжений после термического отжига по режиму завода-изготовителя при 510°C показало значительное снижение напряжений в тонколистовой конструкции (толщина листа 2,5 мм) с 200 МПа до 50 МПа, и незначительное снижение напряжений при увеличении толщины листа. Статистические данные за несколько последних десятилетий механических испытаний на растяжение и динамический изгиб материала 10ХСНД после термического отжига при 510°C показали, что получаемые значения соответствовали требованиям к материалу (предел прочности не менее 510 МПа, предел текучести не менее 390 МПа, относительное удлинение 19%, ударная вязкость при плюс 20 КСU не менее 5 кгс*м/см²). Данный факт многие годы позволял судить о достаточности термического отжига для снятия напряжений после сварки.

Кроме того, проведены измерения уровня остаточных напряжений после термического отжига при 690°C (что соответствует отжигу первого рода) и отжига при 920°C (что соответствует отжигу второго рода). Термическая обработка при этих температурах приводит почти к полному снятию напряжений при всех толщинах.

Проведенные исследования позволяют судить о том, что листовой горячекатаный прокат поставляется с заводов-изготовителей с существенными внутренними растягивающими напряжениями, причем напряжения тем выше, чем тоньше материал; внутренние растягивающие напряжения после сварки являются столь значительными, что не позволяют эксплуатировать конструкции без операций по снижению внутренних напряжений; низкочастотная вибрационная обработка снижает внутренние растягивающие напряжения соизмеримо с напряжениями после термического отжига при температуре 510°C, механические свойства при плюс 20°C и при минус 60°C соответствуют требованиям нормативно-технической документации; термическая обработка (отжиг 690°C, отжиг 920°C), хотя и приводит к практически полному снятию растягивающих напряжений, однако способствует снижению прочности конструкции, образованию окалины на поверхности и необходимости её удаления; низкочастотная вибрационная обработка является полноценной заменой термического отжига, приводит к экономии энергоресурсов, упразднению необходимости использования крупногабаритных термических печей и соответствующей оснастки, снятию технологических операций, связанных с удалением окалины и обработки поверхности изделий.

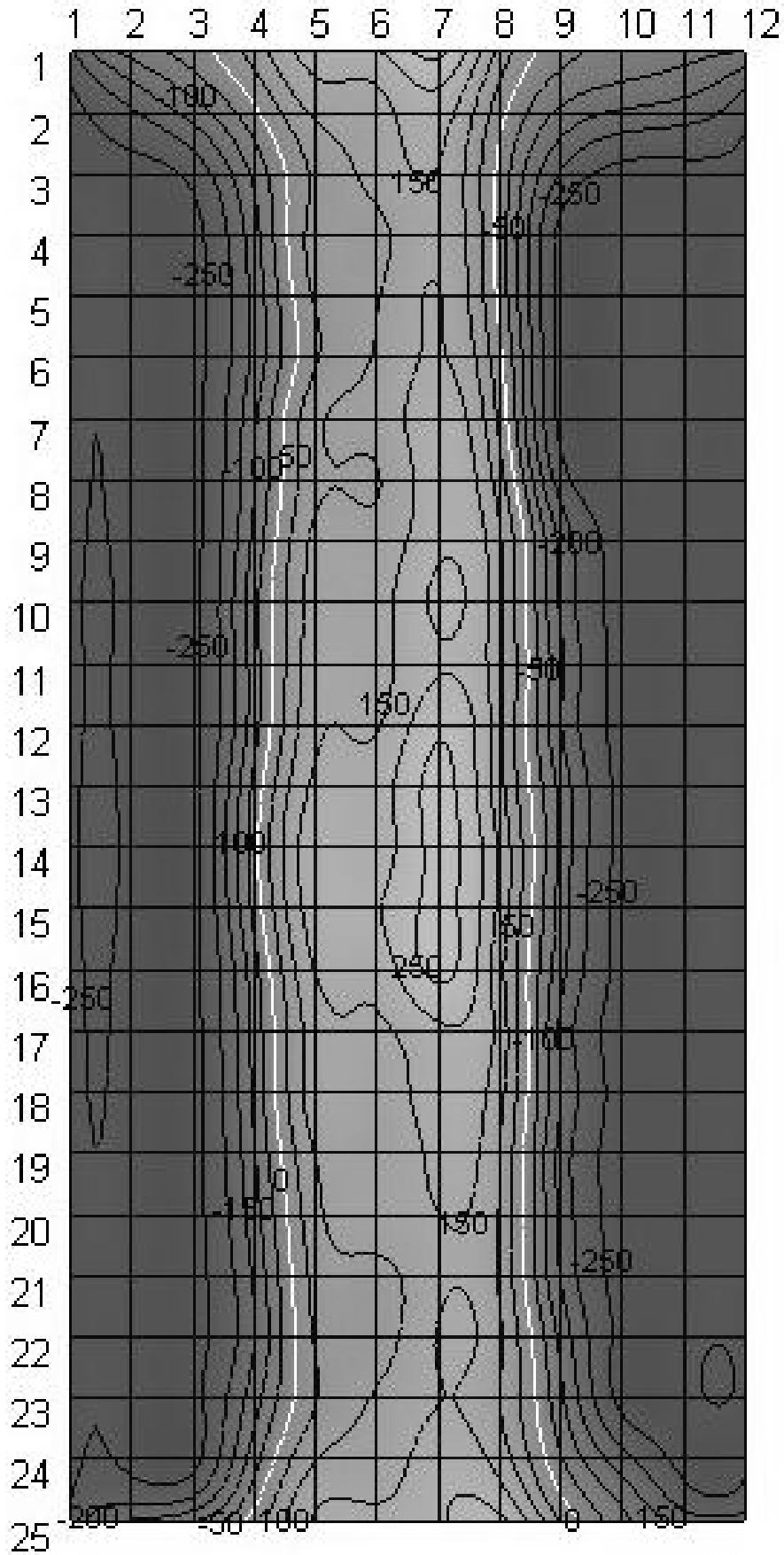


Рис. 8. Сталь 10ХСНД, лист 4 мм. Поле внутренних напряжений после сварки (площадь замера – 12 x 25 см, шаг сетки 1 см).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В настоящей работе были рассмотрены остаточные напряжения в сварных конструкциях из стали 10ХСНД ГОСТ 19281-89, их значения (до $0,9 \sigma_{0,2}$ материала), основные негативные факторы, влияющие на работоспособность изделий (образование трещин, хладноломкость, изменение геометрических размеров после сварки, после термической обработки и при эксплуатации). Были рассмотрены методы уменьшения негативных влияний остаточных напряжений на конструкции, а также недостатки этих методов. В работе обоснованы необходимость снижения влияния остаточных напряжений на работоспособность конструкций и основные преимущества применения низкочастотной виброобработки по сравнению с термической обработкой: простота технологического процесса и оборудования, значительное уменьшение стоимости и времени операции, отсутствие необходимости применения крупногабаритных термических печей и оснастки для заневоливания.
2. В процессе работы была изучена и доведена до серийного выполнения технология низкочастотной вибрационной обработки с определением и обоснованием критериев:
 - частота вращения вала электродвигателя вибровозбудителя при обработке;
 - время проведения обработки;
 - места замера внутренних напряжений сварной конструкции;Определение данных критериев позволило разработать технологию низкочастотной вибрационной обработки, которая позволяет привлекать к процессу персонал со средней квалификацией.
3. Были изучены свойства сварных конструкций из стали 10ХСНД ГОСТ 19281-89 в состоянии после сварки, после термической и низкочастотной вибрационной обработок. Определено снижение внутренних напряжений после термической обработки (растягивающие напряжения с 200 до 70 МПа), и меньшее, но соизмеримое снижение после низкочастотной вибрационной обработки (растягивающие напряжения с 200 до 100 МПа). Металлографические исследования показали бейнитную структуру основного металла, феррито-бейнитную структуру с четко выраженным зернограничным выделением феррита и увеличением зерна до 3 балла в зоне термического влияния металла сварного шва и зоны термического влияния. Видимых структурных различий между термически обработанным и виброобработанным состояниями не выявлено. Комплекс механических свойств стали как после термической обработки, так и после низкочастотной вибрационной обработки полностью соответствует требованиям нормативно-технической документации: $\sigma_{в,св} = 0,9 \sigma_{оч} > 459$ МПа; $\sigma_{0,2,св} = 0,9 \sigma_{оч} > 351$ МПа; $\delta_5 > 20$ %; $KCU > 39$ Дж / см²; Было отмечено, что значения ударной вязкости материала после термической обработки не на много (около 25%) превосходят значения ударной вязкости материала после низкочастотной вибрационной обработки, но значения KCV после обеих обработок превосходили требования нормативно-технической документации при температурах плюс 20°C и минус 60°C.
4. Исследование рентгенограмм показало, что увеличение интенсивности линий у поверхности образца в состоянии после сварки свидетельствует о наличии α -фазы. После термического отжига при температуре 330°C и после низкочастотной вибрационной обработки интенсивность линий уменьшается, что связано с упорядочением кристаллической решётки. Из рентгенограммы образца после термического отжига при температуре 510°C видно увеличение интенсивности линий отражения от плоскостей, что вызвано, как показывает металлографическое исследование, появлением сульфидных выделений.

Значимых отличий величины растягивающих напряжений после исследуемых состояний не отмечено. Фрактографические исследования показали:

- в изломе металлов после сварки наблюдается неоднородность, вблизи острого надреза и вдали от него отмечены зоны вязкого внутризёрненного разрушения, в средней части имеются островки хрупкого внутрезёрненного характера, ударная вязкость такого образца незначительна и равна 40 Дж/см².
- в изломе металла после термической обработки при T=510°C обнаружена шиферность, вызванная выделением сульфидов, ударная вязкость более чем в 2 раза превышает значения в состоянии после сварки.
- в изломе металла после низкочастотной вибрационной обработки также отмечена шиферность, но менее выраженная по сравнению с металлом после термического отжига, что связано с меньшим количеством сульфидных выделений, ударная вязкость находится на уровне вязкости металла после отжига (85 Дж/см²).

Были проведены исследования тонкой структуры, результаты которых позволяют предположить, что процесс сварки не оказывает существенного влияния на металл в зоне термического влияния сварного шва, различия в структуре основного металла и в структуре зоны термического влияния без последующей обработки незначительны. Низкочастотная вибрационная обработка не оказывает существенного влияния на структуру металла зоны термического влияния, хотя в структуре присутствуют следы пластической деформации.

5. За период изучения, освоения и внедрения технологии низкочастотной вибрационной обработки с апреля 2003 года по декабрь 2010 года было обработано более 600 конструкций различных типоразмеров. Обработка продолжается и в настоящее время. За этот период каждая партия изделий прошла натурные испытания, обкатку в условиях эксплуатации. Результаты показали, что сварные конструкции выдержали испытания, нарушение сварных швов и геометрические поводки отсутствовали. За время эксплуатации конструкций не было получено ни одной рекламации к качеству сварных конструкций. Эти факты могут свидетельствовать об эквивалентной замене термического отжига для снятия внутренних напряжений после сварки низкочастотной вибрационной обработкой.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. **Цветков А.С., Солнцев Ю.П.** Применение низкочастотной вибрационной обработки для уменьшения уровня остаточных напряжений в сварных крупногабаритных конструкциях [Текст] / А.С. Цветков, Ю.П. Солнцев «Заводская лаборатория. Диагностика материалов». – М.: 2008. №5. **(журнал списка ВАК по специальности 05.16.09)**
2. **Цветков А.С., Солнцев Ю.П.** Влияние низкочастотной вибрационной обработки на механические свойства и внутренние напряжения металла сварных соединений конструкционных сталей [Текст] / А.С. Цветков, Ю.П. Солнцев, «Известия ВУЗов. Черная металлургия». – М.: 2008. №7. **(журнал списка ВАК по специальности 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов)**
3. **Цветков А.С., Солнцев Ю.П.** Влияния низкочастотной вибрационной обработки и температуры термического отжига на уровень внутренних напряжений в зоне сварного соединения конструкционных сталей [Текст] / А.С. Цветков, Ю.П. Солнцев, «Деформация и разрушение материалов». – М.: 2008. №8. **(журнал списка ВАК по специальности 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов)**