

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Неразрушающего Контроля
Направление подготовки Приборостроение
Кафедра Точного Приборостроения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Корреляция остаточных механических напряжений и магнитной памяти металла в сварных соединениях

УДК 537.634

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4Н	Лямкин Виктор Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лаб. сильноточных бетатронов №42	Рычков Максим Михайлович	канд. техн. наук		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицын Владислав Владимирович	канд. экон. наук		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Панин Владимир Филиппович	д-р техн. наук		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Точного приборостроения	Бориков Валерий Николаевич	д-р техн. наук доцент		

Томск – 2016 г.

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P1	Способность применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для разработки, производства, отладки, настройки и аттестации средств приборостроения с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения.
P2	Способность участвовать в технологической подготовке производства, подбирать и внедрять необходимые средства приборостроения в производство, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов, кроме того, уметь принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа
P3	Способность эксплуатировать и обслуживать современные средства измерения и контроля на производстве, обеспечивать поверку приборов и прочее метрологическое сопровождение всех процессов производства и эксплуатации средств измерения и контроля; осуществлять технический контроль производства, включая внедрение систем менеджмента качества
P4	Способность использовать творческий подход для разработки новых оригинальных идей проектирования и производства при решении конкретных задач приборостроительного производства, с использованием передовых технологий; уметь критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делать выводы, использовать основы изобретательства, правовые основы в области интеллектуальной собственности
P5	Способность планировать и проводить аналитические, имитационные и экспериментальные исследования по своей специализации с использованием новейших достижения науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области знаний, соответствующей выполняемой работе.
P6	Способность использовать базовые знания в области проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; уметь делать экономическую оценку разрабатываемым приборам, консультировать по вопросам проектирования конкурентоспособной продукции
P7	Способность понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности
P8	Способность эффективно работать индивидуально, в команде по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
P9	Способность владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инженерной деятельности
P10	Способность ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а так же различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду
P11	Готовность следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Неразрушающего Контроля
Направление подготовки Приборостроение
Кафедра Точного Приборостроения

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой
_____ Бориков В.Н
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ4Н	Лямкину Виктору Владимировичу

Тема работы:

Корреляция остаточных напряжений и магнитной памяти металла в сварных соединениях	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	<i>Объектом исследования является остаточное механическое напряжение, а так же собственное магнитное поле изделия;</i> <i>Предмет исследования – корреляция напряжений, полученных методом нейтронной дифракции, и распределения магнитных полей на поверхности образца;</i> <i>Цель исследования – получить информацию о взаимосвязи магнитного поля и остаточного механического напряжения в сварных соединениях;</i>
---------------------------------	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Аналитический обзор литературы и работ, проведённых ранее по теме исследования; Методы и средства контроля распределения напряженности магнитного поля в пространстве с высоким разрешением; Методы и средства контроля механических деформаций и остаточных механических напряжений; Анализ распределения остаточного магнитного поля рассеяния Выявление взаимосвязи между механическим напряжением и магнитным полем в сварных соединениях на количественном и качественном уровне.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентация Power Point
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Спицын Владислав Владимирович
Социальная ответственность	Панин Владимир Филиппович
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Глава 3. Результаты проведенного исследования	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. лаб. сильноточных бетатронов №42	Рычков Максим Михайлович	канд. техн. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4Н	Лямкин Виктор Владимирович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ4Н	Лямкину Виктору Владимировичу

Институт	Неразрушающего контроля	Кафедра	Точного приборостроения
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	1. Зарплата научного сотрудника ВАР по TVöD E13
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Потенциальные потребители результатов исследования
2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения
3. Цели и результат проекта
4. Организационная структура проекта
5. План проекта
6. Бюджет НИИ
7. Реестр рисков НИИ

Перечень графического материала:

1. «Портрет» потребителя результатов НИИ
2. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений
3. Иерархическая структура НИИ
4. Календарный план проведения НИИ
5. Диаграмма Ганта
6. Бюджет НИИ
7. Реестр рисков НИИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицын Владислав Владимирович	канд. экон. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4Н	Лямкин Виктор Владимирович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
1БМ4Н	Лямкину Виктору Владимировичу

Институт	Неразрушающего контроля	Кафедра	Точного приборостроения
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Приборостроение

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (оборудования рабочей зоны, технологического процесса) на предмет возникновения: – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – вредных проявлений факторов производственной среды (вредные вещества, метеоусловия, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – негативного воздействия на окружающую природную среду (гидросферу, атмосферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)	Рабочее место расположено в корпусе №60 Федерального института исследования и тестирования материалов (Берлин, Германия). Необходимо поддержание: 1.1.Нормативных метеоусловий, качества воздушной среды, освещения, шума и ЭМП; 1.2.Нормативных мер обеспечения электро- и пожаробезопасности. 1.3.Использование ПЭВМ.. 1.4.Наиболее вероятные ЧС: возгорания (пожары).
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	ГОСТ 12.1.003-83 «Шум. Общие требования безопасности» ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные факторы». ГОСТ 12.1.019-79 Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» Федеральный закон от 22 июля 2008 г. N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (с изменениями и дополнениями)

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности: – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)	Дать описание систем обращения с выборами и твёрдыми отходами в лаборатории.
--	---

2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)	Необходимо исследовать следующие опасные факторы проектируемой производственной среды: - электрический ток; - использование механизированных устройств; - возможность возникновения пожара.
3. Охрана окружающей среды: – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	Проводимые исследования могут оказать негативное влияние на окружающую среду.
4. Защита в чрезвычайных ситуациях: – перечень возможных ЧС на объекте; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий	Разработать мероприятия по предупреждению загораний, ожогов, электропоражений и мер по ликвидации их последствий.
Перечень графического материала:	
При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	Перечень вредных и опасных факторов на рабочем месте оператора ПК

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Панин Владимир Филиппович	д-р техн. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4Н	Лямкин Виктор Владимирович		

Реферат

Магистерская диссертация состоит из текстового документа на 110 страницах, содержит 33 рисунка, 20 таблиц, 41 источник, 1 приложение.

Ключевые слова: *магнитная память метала, нейтронная дифракция, остаточные механические напряжения.*

Объектом исследования в данной работе являются остаточные механические напряжения.

Цель работы: исследовать взаимосвязь между остаточными механическими напряжениями и поверхностным магнитным полем в сварных соединениях.

Основные задачи исследования:

1. Измерение остаточных механических напряжений в сварных соединениях методом нейтронной дифракции.
2. Калибровка и подготовка установки для измерения остаточных магнитных полей вблизи поверхности образца.
3. Измерение с высоким пространственным разрешением остаточных магнитных полей вблизи поверхности.
4. Обработка полученных экспериментальных данных и анализ корреляции между магнитным полем и остаточным механическим напряжением.

Методом исследования является прямая численная корреляция двух переменных.

Научная новизна: получены изображения высокого разрешения магнитного поля на поверхности сварного соединения стали S235JR в трех принципиальных направлениях. В совокупности с детально исследованным профилем остаточного напряжения при помощи нейтронной дифракции, эти данные представляют релевантную информацию для проверки физических основ метода магнитной памяти металла.

Определения, обозначения и сокращения

1. *Собственное магнитное поле* – магнитное поле изделия, возникающее без применения сторонних средств намагничивания, за исключением магнитного поля Земли.
2. *Глобальное магнитное поле* – магнитное поле преимущественного направления намагниченности, исключаяющее поля рассеяния.
3. *Магнитное поле рассеяния* – магнитное поле, возникающее на поверхности изделия в зонах неоднородности структуры металла.
4. *Магнитная память метала* – метод неразрушающего контроля, основанный на анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния.
5. *Нейтронная дифракция* – метод измерения деформации кристаллической структуры изделия и последующего расчета остаточного механического напряжения.
6. *Зона термического влияния* – участок базового металла, не подвергшийся расплавлению, но изменивший структуру в результате нагрева.
7. *Измерительный мост* – устройство измерения сопротивления методом сравнения измеряемой величины с образцовой мерой; выполнен по схеме мостовой цепи.
8. *Сканирование* – процесс построения получения данных с последующей реконструкцией в двумерное изображение.

Определения, обозначения и сокращения (продолжение)

СМПП	Собственное магнитное поле рассеяния
МММ	Магнитная память металла
DAQ / УСД	Устройство сбора данных
TIG	Tungsten inert gas welding / Дуговая сварка неплавящимся электродом в защитной атмосфере инертного газа
ГМС	Гигантское магнетосопротивление
ЗТВ	Зона термического влияния
ЭЭО	Электроэрозионная обработка
ND / НД	Нейтронная дифракция
MF / МП	Магнитное поле
σ_{xx}	Механическое напряжение в поперечном направлении
σ_{yy}	Механическое напряжение в продольном направлении
σ_{zz}	Механическое напряжение в нормальном направлении
d	Постоянная кристаллической решетки
d_0	Постоянная кристаллической решетки контрольного образца
d_{hkl}	Расстояние между hkl плоскостями
θ_{hkl}	Угол рассеяния плоскости hkl
λ	Длина волны
ε	Деформация
Q	Вектор рассеяния
E_{hkl}	Модуль Юнга в плоскости hkl
ν_{hkl}	Коэффициент Пуассона в hkl плоскости
δd	Ошибка измерения постоянной кристаллической решетки
$\delta \lambda$	Ошибка измерения длины волны

Определения, обозначения и сокращения (продолжение)

$\delta\epsilon$	Ошибка измерения деформации
$\delta\theta$	Ошибка измерения угла рассеяния
$\delta\sigma_{xx}$	Ошибка измерения механического напряжения в поперечном направлении
$\delta\sigma_{yy}$	Ошибка измерения механического напряжения в продольном направлении
U_B	Выходное напряжение моста
U_0	Напряжение питания
R_B	Сопротивление моста
R_{ref}	Сопротивление контрольного элемента моста
R_{GMR}	Сопротивление ГМС элемента
σ_{eqv}	вон Мизес эквивалент механического напряжения
H_x	x компонента напряженности магнитного поля (поперечное направление)
H_y	y компонента напряженности магнитного поля (продольное направление)
H_z	z компонента напряженности магнитного поля (нормальное направление)

Оглавление

Реферат.....	9
ВВЕДЕНИЕ.....	15
Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	17
1.1 Магнитные свойства металлов.....	17
1.2 Остаточные напряжения и нейтронная дифракция	20
1.3 Используемые материалы.....	23
1.4 Эквивалент остаточного напряжения.....	25
Глава 2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	27
2.1 Магнитное поле	27
2.1.1 Экспериментальная установка	27
2.1.2 ГМС датчики	28
2.2 Нейтронная дифракция	31
2.2.1 Экспериментальная установка для нейтронной дифракции	31
2.2.2 Образец без деформаций.....	34
2.2.3 Неопределенность измерений	35
Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	37
3.1 Экспериментальные данные нейтронной дифракции.....	37
3.2 Экспериментальные данные измерений СМНР	39
3.3 Нейтронная дифракция и распределение остаточного напряжения	45
3.4 Собственное магнитное поле рассеяния	46
3.5 Корреляция двух методов.....	47
Глава 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	54
4.1 Предпроектный анализ	55
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	55
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	56
4.2 Инициация проекта	58
4.2.1 Цели и результат проекта.....	58
4.2.2 Ограничения и допущения проекта	60
4.3 Планирование управления научно-техническим проектом	61
4.3.1 Иерархическая структура работ проекта.....	61
4.3.2 Контрольные события проекта.....	62

4.3.3 План проекта	62
4.3.4 Основная заработная плата	65
4.3.5 Реестр рисков проекта	65
Глава 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ	67
5.1 Производственная безопасность	67
5.1.1 Идентификация, оценка и анализ опасных и вредных факторов на рабочем операторе ПК	68
5.1.2 Анализ вредных и опасных производственных факторов и перечень рекомендуемых мероприятий по улучшению условий труда	71
5.2 Экологическая безопасность	81
5.2.1 Анализ осуществляемой производственной деятельности и выявления источников вредного воздействия на окружающую среду	82
5.2.2 Перечень рекомендуемых мероприятий по сокращению негативного воздействия на окружающую среду	83
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	83
5.4 Расчет воздухообмена для удаления избыточного тепла	84
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	90
Список использованных источников	91
Приложение A Chapter 3. Research results	94

ВВЕДЕНИЕ

Остаточные механические напряжения являются важным фактором, влияющим на конечные прочностные характеристики компонента или изделия. В некоторых случаях остаточные механические напряжения могут быть полезны, увеличивая максимальную нагрузку. В других – приводят к непредсказуемому выходу изделий из строя. В обоих случаях необходим контроль над остаточным напряжением. Это наиболее актуально, когда осуществить процесс отпуска материала затруднительно или нецелесообразно.

Существуют различные методы для оценки остаточного механического напряжения. Однако неразрушающих способов контроля не так много. Рентгеновская дифракция позволяет проанализировать лишь поверхность объекта, из-за сильного поглощения рентгеновских лучей металлом. Нейтронная дифракция позволяет провести анализ в объеме, однако подобные измерения весьма дороги и невозможны на месте проведения работ. Предложенный Дубовым в 1994 году метод магнитной памяти металла обещает легкую оценку механического напряжения как качественно, так и количественно. Однако исследований, в достаточной степени подтверждающих это, не так много. Большинство данных исследований базируются на весьма неточных измерениях, как остаточного напряжения, так и магнитного поля.

Целью данной работы является выяснение зависимости между остаточным механическим напряжением в сварных соединениях из стали S235JR и распределением магнитного поля на поверхности образца.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Измерение остаточных механических напряжений в сварных соединениях методом нейтронной дифракции;
2. Калибровка и подготовка установки для измерения остаточных магнитных полей вблизи поверхности образца;

3. Измерение с высоким пространственным разрешением остаточных магнитных полей вблизи поверхности;

4. Обработка полученных экспериментальных данных и анализ корреляции между магнитным полем и остаточным механическим напряжением.

Объектом исследования в работе являются остаточные механические напряжения

Предмет исследования: корреляция остаточного механического напряжения и собственного магнитного поля рассеяния.

В качестве метода исследования был использован способ прямой численной корреляции двух переменных.

Научная и практическая новизна работы заключается в:

1) Получении высокоточных измерений собственного магнитного поля рассеяния вблизи поверхности сварных соединений;

2) Измерении профиля остаточного механического напряжения после сварки, методом нейтронной дифракции;

3) Качественной и количественной корреляции собственных магнитных полей рассеяния с реальным остаточным механическим напряжением.

Практическая значимость работы: работа нацелена на получение более глубоких знаний о взаимосвязи остаточного механического напряжения и распределения собственных магнитных полей рассеяния. Данное исследование является релевантным для разработки способа оценки остаточного напряжения методом магнитной памяти металла.

Глава 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Магнитные свойства металлов

Повеление ферромагнитных материалов известно на протяжении долгого времени. Главная причина намагниченности металлов кроется в дипольном моменте и спине электронов в атомах. Однако макро-намагниченность зависит от того, как спины ориентированы во всем материале. Когда ферромагнитный материал нагрет выше температуры Кюри, магнитные моменты могут с легкостью менять направление. Если данный процесс протекает в отсутствии внешнего магнитного поля, намагниченность материала будет минимальна [1]. Тем не менее, в реальной ситуации, производство стали происходит как минимум в магнитном поле Земли. Остаточная намагниченность является первым фактором, оказывающим влияние на полученные данные. Вторым фактором является так называемый Вилари эффект или эффект обратной магнитострикции. В отличие от прямой магнитострикции, обратная магнитострикция заключается в изменении намагниченности под действием механического напряжения. Теория магнитомеханического эффекта была изложена в [2]. В [3] была показана экспериментальная зависимость магнитной индукции B от механической нагрузки (Рисунок 1).

Третьим фактором является геометрия и топография объекта. Первый и второй факторы обуславливают наличие собственных магнитных полей рассеяния (СМПР), на которых основан метод магнитной памяти металла (МПМ). Согласно стандарту ISO 24497-1:2007 [4], СМПР дается следующее определение: «магнитное поле рассеяния, возникающее на поверхности изделия в зонах устойчивых полос скольжения дислокаций под действием рабочих или остаточных напряжений или в зонах максимальной неоднородности структуры металла». По существу, СМПР является полем рассеяния, вызванным собственным магнитным полем объекта. В то время как МПМ является «последствием, которое проявляется в виде остаточной

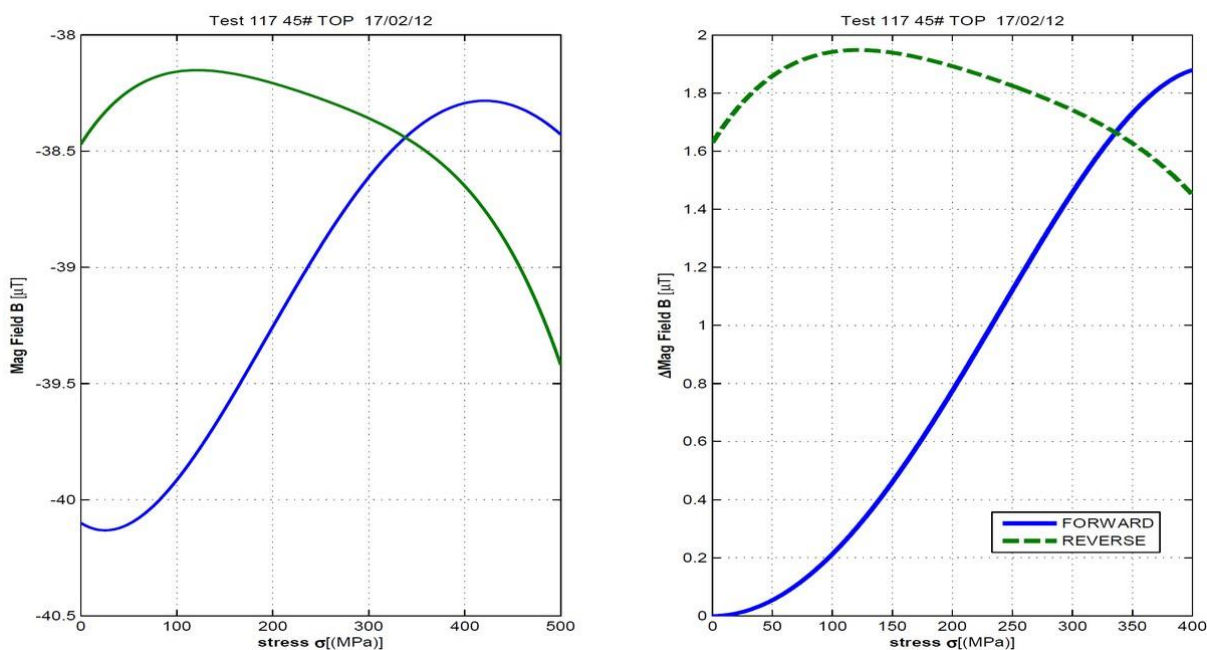


Рисунок 1 – Зависимость магнитной индукции от нагрузки, представлена в [3] для растяжения (forward) и сжатия (reverse).

намагниченности изделий и сварных соединений, сформировавшихся процессе их изготовления и охлаждения в слабом магнитном поле, или в виде необратимого изменения намагниченности изделий в зонах концентрации напряжений и повреждений от рабочих нагрузок». Метод был предложен Дубовым в 1994 [5].

В сварных соединениях, формирование магнитных доменов происходит во время перехода через точку Кюри. Существует множество исследований, связанных с исследованием сварных соединений при помощи МПМ [6]–[10], а так же попыток корреляции МПМ и остаточного механического напряжения [11]–[13].

В [11] была показана взаимосвязь между градиентом магнитного поля и эквивалентного (вон Мизес) механического напряжения, полученного методом конечных элементов (FEM). Нагрузка на образцы составляла до 60 МПа в тестах на растяжение. После достижения нужного напряжения, нагрузка снималась, и образцы анализировались ex-situ. Для МПМ исследования использовался магнетометр TSC-1M-4 от ООО «Энергодиагностика» (Москва, Россия). Результаты полученные в данном исследовании показаны на рисунке 2.

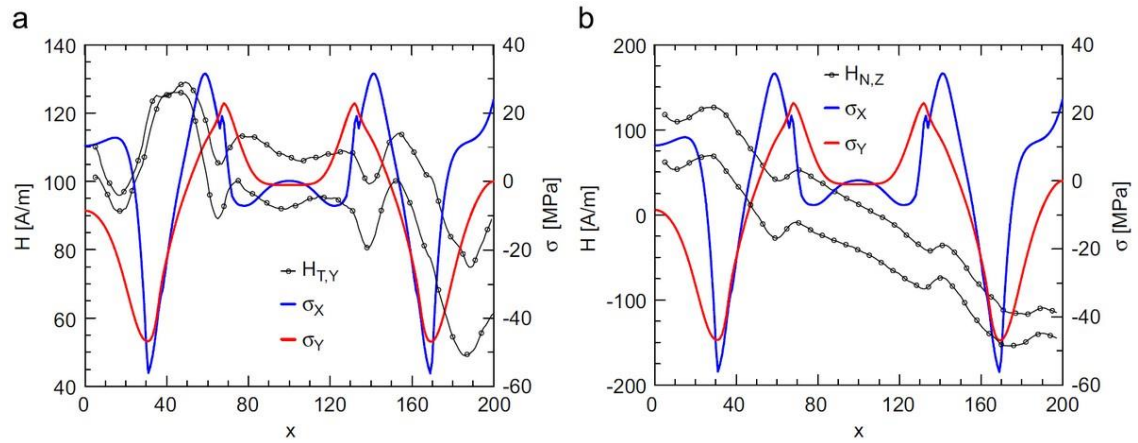


Рисунок 2 – Сравнение распределения остаточных напряжений и напряженности магнитного поля при пластическом растяжении $\varepsilon_p = 5.7\%$, сталь S235: (а) остаточные напряжения σ_x , σ_y и тангенциальная компонента $H_{T,x}$; (б) остаточные напряжения σ_x , σ_y и нормальная компонента $H_{N,z}$ [11].

Для анализа, Роскос рассчитал градиент магнитного поля как

$$\frac{d\vec{H}}{dx} = \frac{d\vec{H}_{T,x}}{dx} + \frac{d\vec{H}_{T,y}}{dx} + \frac{d\vec{H}_{N,z}}{dx}, \quad (1)$$

Где $H_{T,x}$ -тангенциальная компонента в направлении x , $H_{T,y}$ - тангенциальная компонента в направлении y , $H_{N,z}$ -нормальная компонента в направлении z . Результат вычислений представлен на рисунке 3. Полученный результат подтверждает предыдущие исследования остаточных механических напряжений после пластической деформации [14].

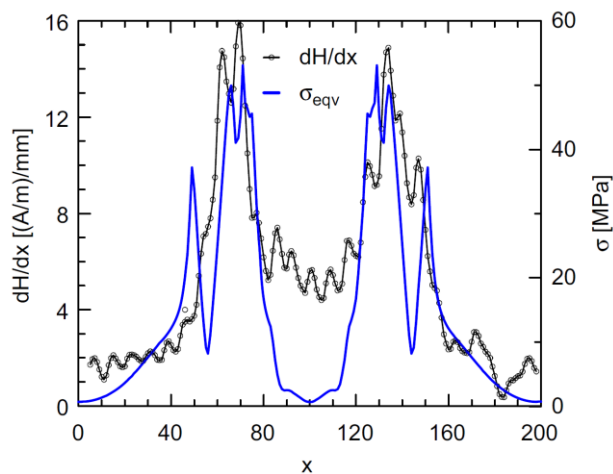


Рисунок 3 – Сравнение распределения остаточного механического напряжения (вон Мизес) и градиента dH/dx для пластической деформации $\varepsilon_p = 2.0\%$. Шкала x в мм.

1.2 Остаточные напряжения и нейтронная дифракция

Нейтронная дифракция широко используется для определения остаточных механических напряжений из-за большой проникающей способности нейтронов. Данная особенность позволяет охарактеризовать распределение напряжений в объеме, включая сложные геометрические формы [15]. Уникальные свойства нейтронного излучения обусловлены в первую очередь отсутствием электрического заряда и, как следствие, малым сечением захвата. В сравнение с рентгеновским излучением, где глубина проникновения оценивается в десятках микрон, нейтроны способны на проникновение десятков миллиметров [15]. В связи с этим, нейтронная дифракция была выбрана для контроля магнитной памяти металла на сварных соединениях.

Феномен дифракции возникает, когда материал с кристаллической решеткой находится под нейтронным потоком с длиной волны, сопоставимой с постоянной кристаллической решетки. Полученная дифракционная картина, по которой постоянная решетки для каждого кристаллографического направления (hkl) может быть получена в соответствии с уравнением 2.

$$2d_{hkl}\sin(\theta_{hkl}) = \lambda \quad (2)$$

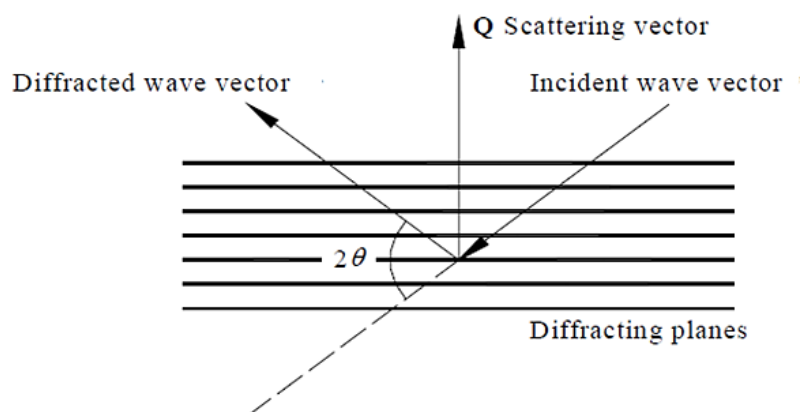


Рисунок 4 – Схематическая иллюстрация Брэгговского рассеяния. Вектор рассеяния Q показывает направление деформации [16].

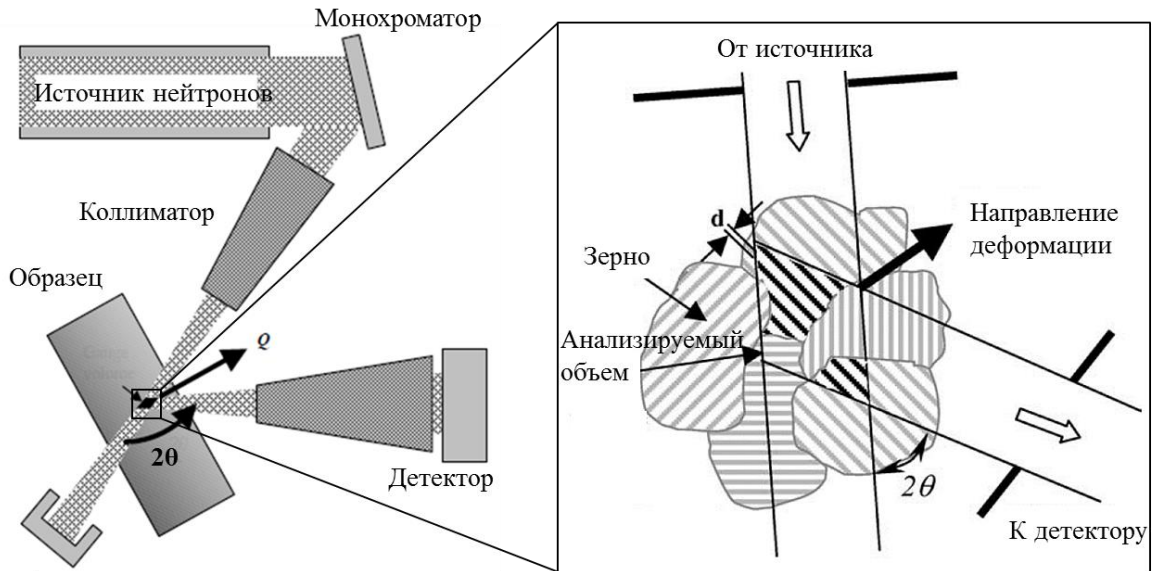


Рисунок 5 – Схематическая иллюстрация типичного дифрактометра с постоянным нейтронным потоком для измерения деформация кристаллических материалов и пояснение дифракции на поликристаллическом материале [16].

На рисунке 5 показано практическое применение уравнения 2. Размер и величина коллимации нейтронного луча контролируются соответствующими устройствами, рассеивается на образце. Перед тем как попасть на детектор, нейтроны проходят сквозь второй коллиматор. Таким образом, будет измерен только объем полученный на пересечении линий двух коллиматоров [15].

Нейтронная дифракция измеряет упругую деформацию ε определенной hkl группы, которая может быть оценена как

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \quad (3)$$

Уравнение 3 может быть соотнесено с остаточным механическим напряжением через тензор s

$$\bar{\varepsilon} = \bar{s}\bar{\sigma} \quad (4)$$

Наиболее полную информацию о распределении напряжений дает измерение в ортогональной координатной системе [17]. В таком случае, остаточное механическое напряжение может быть рассчитано как

$$\sigma_{xx} = \frac{E_{hkl}}{(1 + \nu_{hkl})(1 - 2\nu_{hkl})} [(1 - \nu_{hkl})\varepsilon_{xx} + \nu_{hkl}(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})] \quad (5)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E_{hkl}}{(1 + \nu_{hkl})(1 - 2\nu_{hkl})} [(1 - \nu_{hkl})\epsilon_{yy} + \nu_{hkl}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{zz})] \quad (6)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{E_{hkl}}{(1 + \nu_{hkl})(1 - 2\nu_{hkl})} [(1 - \nu_{hkl})\epsilon_{zz} + \nu_{hkl}(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy})] \quad (7)$$

где E_{hkl} модуль Юнга и ν_{hkl} коэффициент Пуассона.

d_0 - постоянная кристаллической решетки свободного от деформаций образца. Поскольку расчет абсолютной величины остаточного механического напряжения берется из разницы d_0 и d , очень важно провести точные измерения эталонного образца. Существует несколько факторов влияющих на d , не относящихся к остаточному напряжению, включая:

- Изменения химического состава
- Фазовые трансформации
- Изменение температуры

Все вышеперечисленные факторы влияют на неопределенность измерений и будут обсуждаться далее, в экспериментальной главе.

Исследования остаточных напряжений в похожих образцах проводились ранее. Результаты показали наиболее сильные напряжения в близости зоны термического влияния (Рисунок 6). Исследования, проведенные при помощи синхротронного и нейтронного излучения [18] выявили наличие остаточных напряжений на границе сварного шва лишь не поверхности, как показано на рисунке 7. Глубже внутрь материала, деформации сжатия и растяжения выполняют условие равновесия [18].

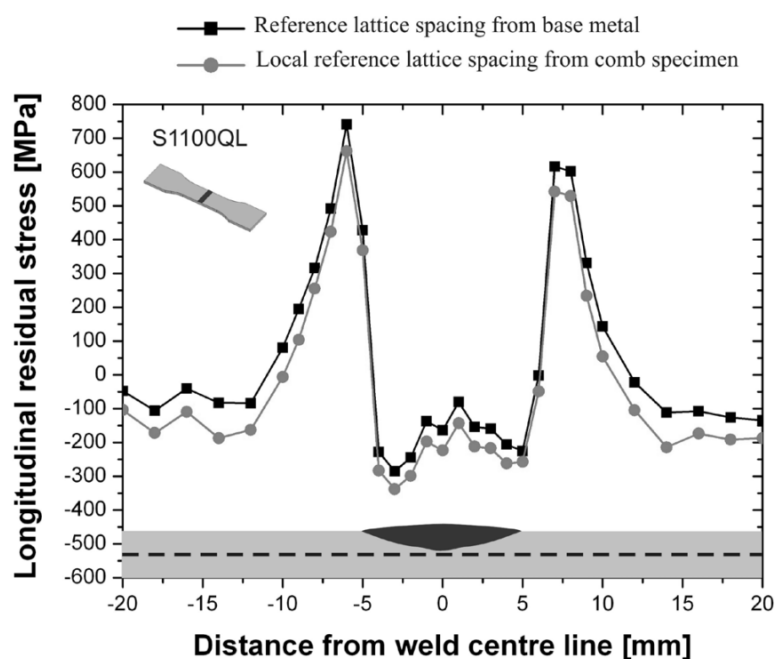


Рисунок 6 – Остаточные механические напряжения с использованием эталонного образца и локального измерения d_0 . Измерения сделаны вдоль пунктирной линии в центре образца [18].

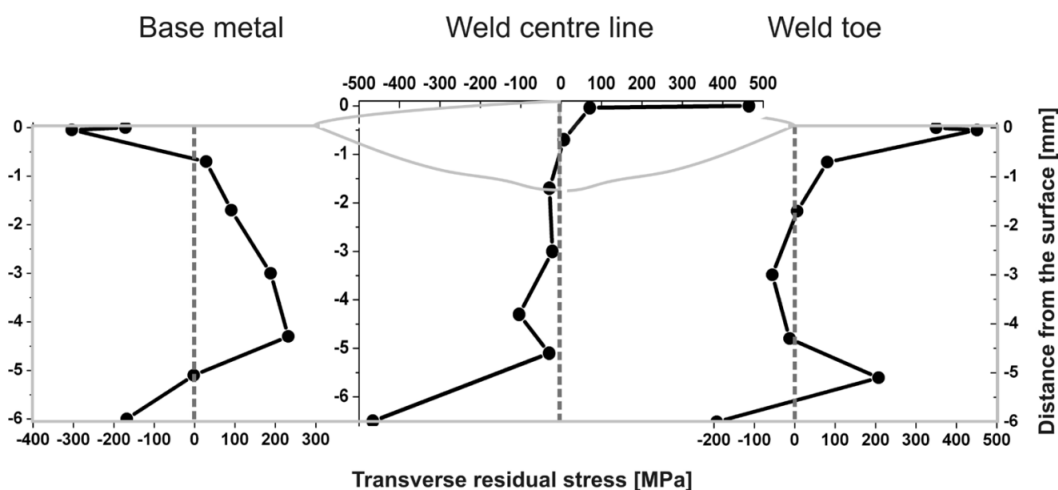


Рисунок 7 – Распределение остаточных механических напряжений в S1100QL полученное при помощи рентгеновского, синхротронного и нейтронного излучения [18].

1.3 Используемые материалы

Базовым материалом для сварных соединений в данной работе является сталь S235JR – низко углеродная ферритная сталь, полученная методом холодного волочения листового материала до толщины 5 мм. Химический состав, как указан производителем, представлен в таблице 1. Микроструктура стали представлена на рисунке 8.

Листовой материал был механически обработан до размеров 250x100x4.8 мм³ (Рисунок 10). Дуговая сварка неплавящимся электродом в защитной атмосфере инертного газа была осуществлена вдоль образца по центру. Сварка проводилась без использования присадочного прутка, на автоматизированном сварочном аппарате, для того чтобы гарантировать максимальную повторяемость результата для всех образцов. Скорость прохода была установлена в 20 см/мин при 200 А постоянного тока.

Дуговая сварка неплавящимся электродом в защитной атмосфере инертного газа (так же известна как TIG, GTAW) включает термическую обработку дуговым разрядом, зажжённым между объектом сварки и неплавящимся вольфрамовым электродом. Область дугового разряда защищается инертным газом, подаваемым через сопло рядом с электродом. Рисунок 9 показывает принцип дуговой сварки неплавящимся электродом в защитной атмосфере инертного газа. Более детальная информация о данном методе может быть найдена в [19].

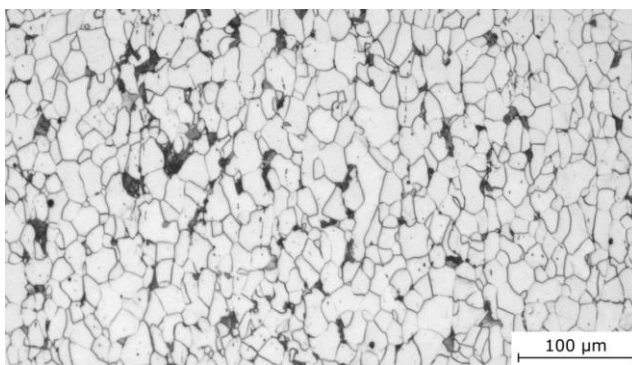


Рисунок 8 – Ферритно-перлитная микроструктура S235JR

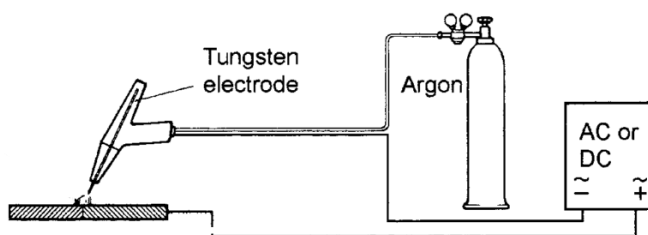


Рисунок 9 – Схематичное изображение дуговой сварки неплавящимся электродом в защитной атмосфере инертного газа

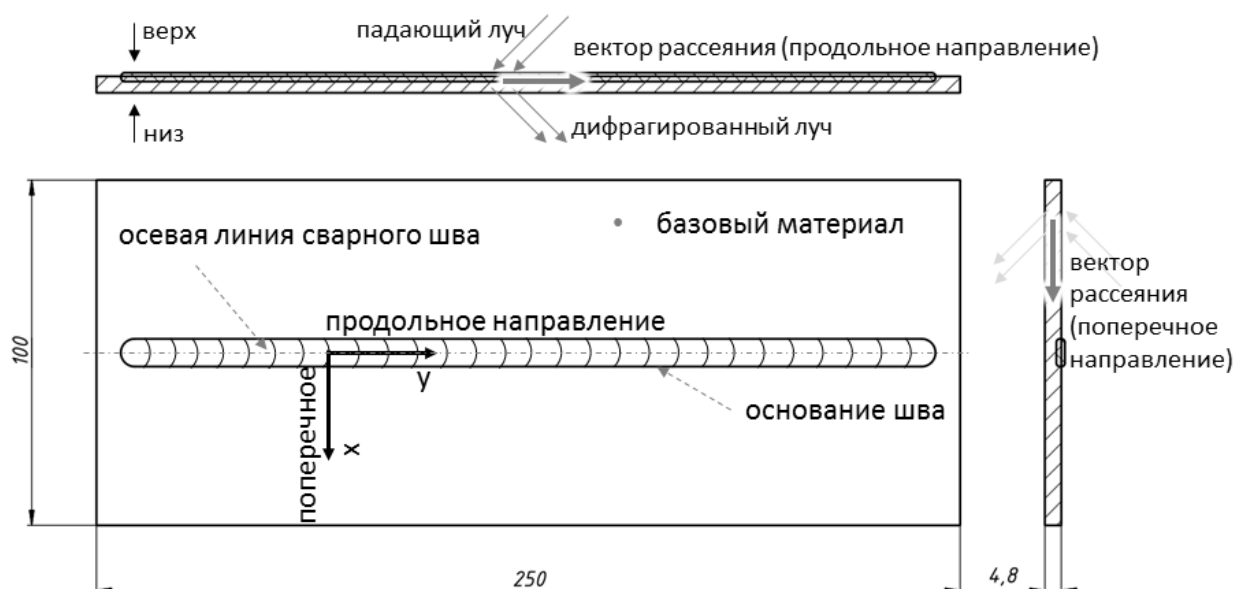


Рисунок 10 – Геометрия и координатная система образцов, размеры в мм.

Как показано на рисунке 10, направление вдоль сварного шва является продольным, перпендикулярно шву – перпендикулярным. Нормальное направление относительно поверхности образца. Сторона с которой проводилась сварка, считается «верхом»; противоположная сторона соответственно «низом».

Таблица 1 – Химический состав S235JR, как указано производителем

C	Cr	Ni	Mn	P	S	Cu	N	Fe
0.17	-	-	1.4	0.035	0.035	0.55	0.012	осн.

1.4 Эквивалент остаточного напряжения

Эквивалент остаточного напряжения по вон Мизесу σ_{eqv} это скалярная величина, которая может быть получена из тензора Коши и служит для связи параметров материала и остаточного механического напряжения.

Для принципиальной координатной системы, напряжение вон Мизеса может быть рассчитано как

$$\sigma_{eqv} = \sqrt{\frac{1}{2}((\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2)}. \quad (8)$$

Учитывая плоскую геометрию образцов, нормальная компонента σ_{zz} принята равной нулю. Как следствие, уравнение 8 примет следующий вид

$$\sigma_{eqv} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}^2}. \quad (9)$$

Уравнение 9 будет использовано далее для расчета эквивалента остаточного механического напряжения.

Глава 2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Магнитное поле

Поскольку метод магнитной памяти металла основан на измерении собственных магнитных полей рассеяния (СМПР), напряженность внешнего магнитного поля должна быть как можно меньше, не превышая напряженности магнитного поля Земли. Измерительная система, основанная на СМПР, не может содержать активных элементов, как системы электромагнитного контроля. К тому же, количество ферромагнитного материала сенсора должно быть учтено. Сенсоры, основанные на эффекте гигантского магнетосопротивления (ГМС), не только удовлетворяют данному условию, но и обладают существенным пространственным разрешением. Данный тип сенсоров был выбран для данного исследования и будет вкратце описан в этой главе, так же как и механико-электронная составляющая экспериментальной установки.

2.1.1 Экспериментальная установка

Измерительная система состоит из четырех главных компонентов: ГМС сенсор, усилитель, устройство сбора данных и механического привода. Привод состоит из трех высокоточных манипуляторов (Aerotech Inc., США). Устройство сбора данных основано на 18-ти битном аналого-цифровом преобразователе, с максимальной частотой выборки 500 kHz в многоканальном режиме (National Instruments, USA). Шестиканальный усилитель имеет варьлируемый коэффициент усиления и коррекцию смещения нуля. Управление приводами и сбор данных осуществляется при помощи программного обеспечения LabVIEW (National Instruments). Принцип измерения заключается в последовательном многострочном сканировании области измерения, с последующим объединением в двумерный массив, который может быть представлен в виде изображения. Расстояние от сенсора до поверхности

измеряемого объекта оценивается в пределе 100 мкм. Для повышения воспроизводимости данных, измерения проводились лишь в одном направлении. Полученная информация обрабатывается в MatLAB (MathWorks, Inc., USA). На рисунке 11 показана блок-схема установки. Усиление сигнала от ГМС датчика позволяет уменьшить влияние посторонних помех и достичь лучшего соотношения сигнал/шум.

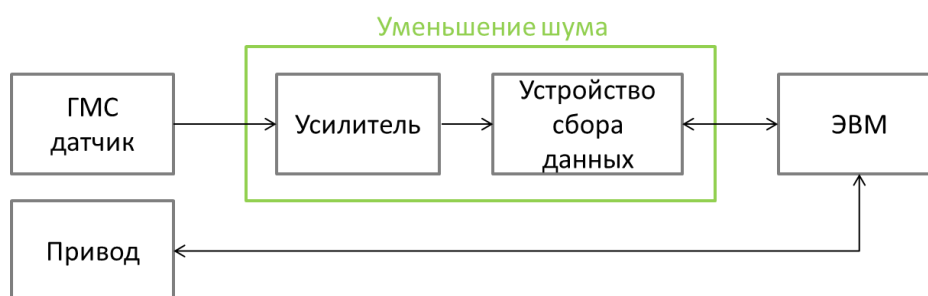


Рисунок 11 - Блок-схема экспериментальной установки. Падение напряжения на ГМР элементе усиливается и передается на устройство сбора данных, подключенное к ПК. Данный ПК так же контролирует приводы.

2.1.2 ГМС датчики

В основе данных датчиков лежит эффект гигантского магнетосопротивления (ГМС). Для уменьшения температурного влияния, ГМС элементы собраны по мостовой схеме. Когда два активных элемента моста разнесены на определенное расстояние, такая конфигурация называется градиометром. Данный тип сенсоров измеряет разницу (градиент) между двумя точками в пространстве. В данной работе использовался многоканальный ГМС-градиометр с 16 каналами, из которых использовались только 6. Шаг сканирования составил 35 мкм. Характеристики датчика представлены в таблице 2.

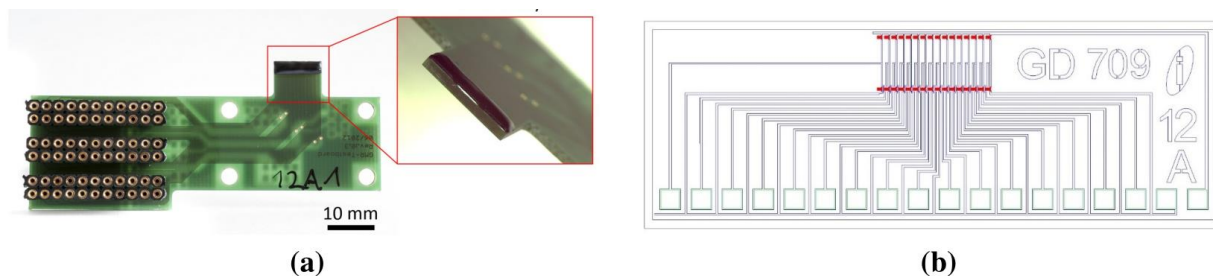


Рисунок 12 – ГМС-градиометр (12A): (a) Общий вид печатной платы датчика; (b) Расположение ГМС-элементов (выделены красным) под черным защитным покрытием.

Таблица 2 – Характеристика ГМС-градиометра (12А)

Параметр	z-компонента
Линейный режим	± 3 кА/м
Размер активной зоны	25 x 30 мкм
Вертикальное расстояние между элементами	250 мкм
Разрешающая способность	160 мкм
Чувствительность	3 мВ/В/кА/м

Калибровка сенсора проводилась при помощи соленоида с известным числом витков и, как следствие, известной напряженностью магнитного поля. Датчик помещался внутрь соленоида, после чего при помощи вариации напряженности магнитного поля ± 9 кА/м калибровочная кривая была получена (Рисунок 13). Так как градиометр не может измерить абсолютную величину магнитного поля, выходное напряжение необходимо рассчитать, используя уравнение 10.

$$U_B = U_0 \left[\frac{R_{GMR1}}{R_{GMR1} + R_{GMR2}} - \frac{R_{ref1}}{R_{ref1} + R_{ref2}} \right] \quad (10)$$

Если $R_{ref1} = R_{ref2}$,

$$U_B = U_0 \left[\frac{R_{GMR1}}{R_{GMR1} + R_{GMR2}} - \frac{1}{2} \right]. \quad (11)$$

В состоянии равновесия, когда $R_{GMR1} = R_{GMR2}$, выходное напряжение U_B моста равно нулю [20]. Как результат калибровки, разница в 1 кА/м равна падению напряжения в 3мВ/В.

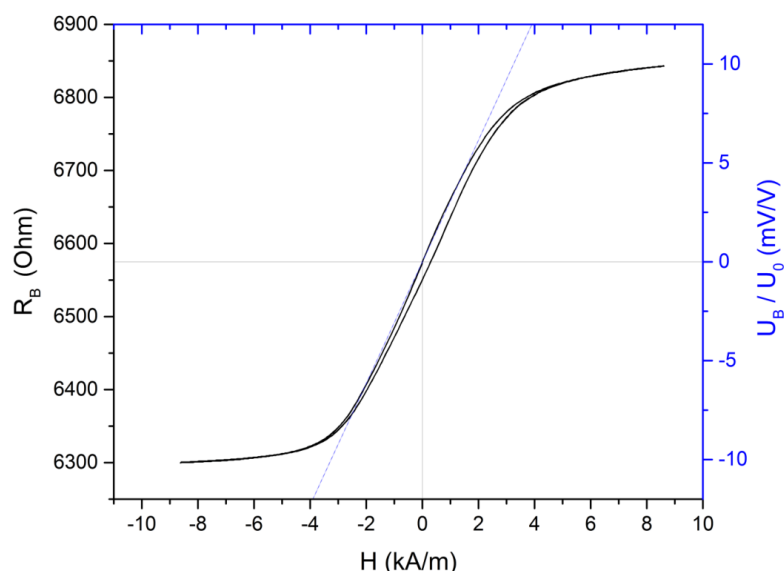


Рисунок 13 – Калибровочная кривая 12А градиометра. Ось U_B/U_0 показывает выходное напряжение моста в мВ при напряжении питания 1 В.

Другой тип сенсора позволяет регистрировать магнитное поле в трех ортогональных осях. Данный сенсор (Рисунок 14) позволяет одновременно получить информацию о трех компонентах магнитного поля: H_x , H_y , H_z . технические характеристики сенсора представлены в таблице 3. Из-за большего размера сенсора, шаг сканирования для данного сенсора составил 140 мкм. Для каждого направления были получены калибровочные кривые в диапазоне ± 4 кА/м (Рисунок 14). Данный сенсор более чувствителен в X и Y направлениях благодаря большему количеству ферромагнитного материала для концентрации силовых линий магнитного поля. В направлении Z чувствительность и остаточная намагниченность заметно меньше в сравнении с X и Y направлениями. Более подробная информация о ГМС сенсорах и оборудовании может быть найдена в [20] и [21].

Таблица 3 – Технические характеристики 3D сенсора

Параметр	Направление оси		
	X	Y	Z
Линейный диапазон	± 800 А/м	± 800 А/м	± 2 кА/м
Чувствительность	80 мВ/В/кА/м	80 мВ/В/кА/м	20 мВ/В/кА/м
Разрешение		180 мкм	
Шаг сканирования		140 мкм	
Диаметр активной зоны		200 мкм	

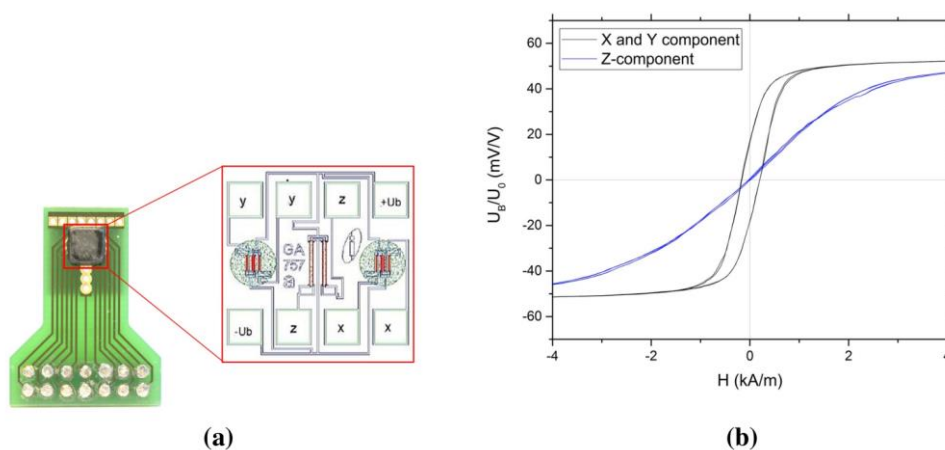


Рисунок 14 – Дизайн и калибровочная кривая для 3D сенсора: (a) Компоновка ГМС элементов; (b) Калибровочная кривая для X Y и Z направлений.

2.2 Нейтронная дифракция

2.2.1 Экспериментальная установка для нейтронной дифракции

Эксперименты по нейтронной дифракции проводились на экспериментальной линии E3 ядерного реактора BER II - Helmholtz Zentrum Berlin (Германия). Данная экспериментальная линия предназначена для анализа деформаций образцов, как простой, так и сложной формы. Установка состоит из двух осей вращения (Ω и 2Θ) диаметром 800 мм и XYZ позиционного стола для ориентации образца в вертикальном и горизонтальном направлениях. (Рисунок 15). Более подробная информация об инструменте представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Технические данные дифрактометра

Параметр	Спецификация
Коллимация	Открытая
Монохроматор	Si (400)
Длина волны	0.1476 нм
Нейтронный поток	10^7 н/см ² /с
Диапазон рассеяния	$35^\circ \leq 2\Theta \leq 110^\circ$
Ширина на уровне половины амплитуды (порошковый стандарт)	0.3 (при $2\Theta = 90^\circ$)
Детектор	30x30 мм ²
Разрешение	$\delta d/d \approx 1.4 \cdot 10^{-3}$
Расстояние образец-детектор	600 – 1300 мм
Максимальный размер луча	10x20 мм ²
Максимальный размер объекта	0.5 м в диаметре
Диапазон сканирования	$\sim 35^\circ \leq 2\Theta \leq 110^\circ$

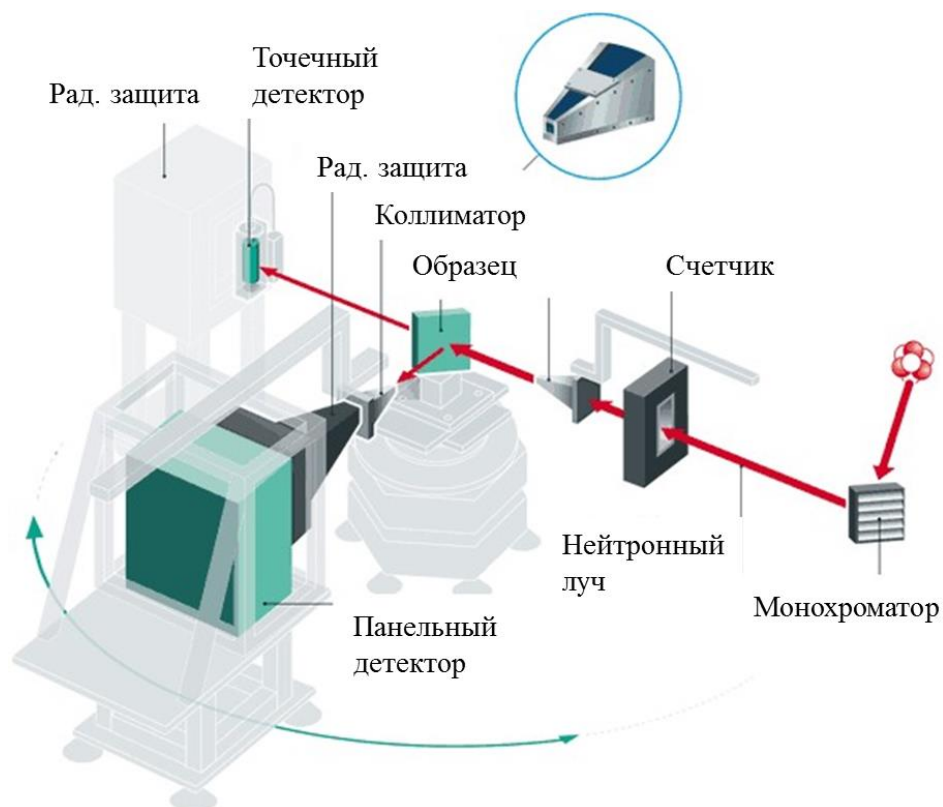


Рисунок 15 – Схематичное изображение дифрактометра и его основных частей [22].

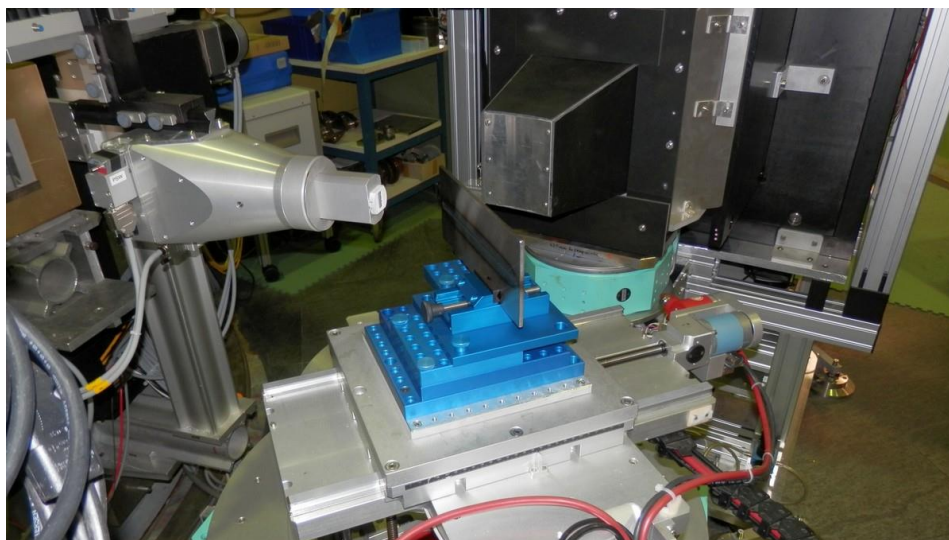


Рисунок 16 – Дифрактометр с установленным образцом для измерения остаточного напряжения в продольном направлении

Поскольку образец представляет собой листовой материал, нормальная компонента деформации была принята равной нулю. Только принципиальные напряжения σ_{xx} и σ_{yy} были измерены. С условием $\sigma_{zz} = 0$, уравнения (5) и (6) упрощаются до уравнений (12) и (13)

$$\sigma_{xx} = \frac{E_{hkl}}{(1 - \nu_{hkl}^2)} [\epsilon_{xx} + \nu_{hkl} \epsilon_{yy}], \quad (12)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E_{hkl}}{(1 - \nu_{hkl}^2)} [\epsilon_{yy} + \nu_{hkl} \epsilon_{xx}]. \quad (13)$$

Расчеты проводились со следующими параметрами: $E_{211} = 215$ ГПа, а $\nu_{211} = 0.242$ для направления $\{211\}$.

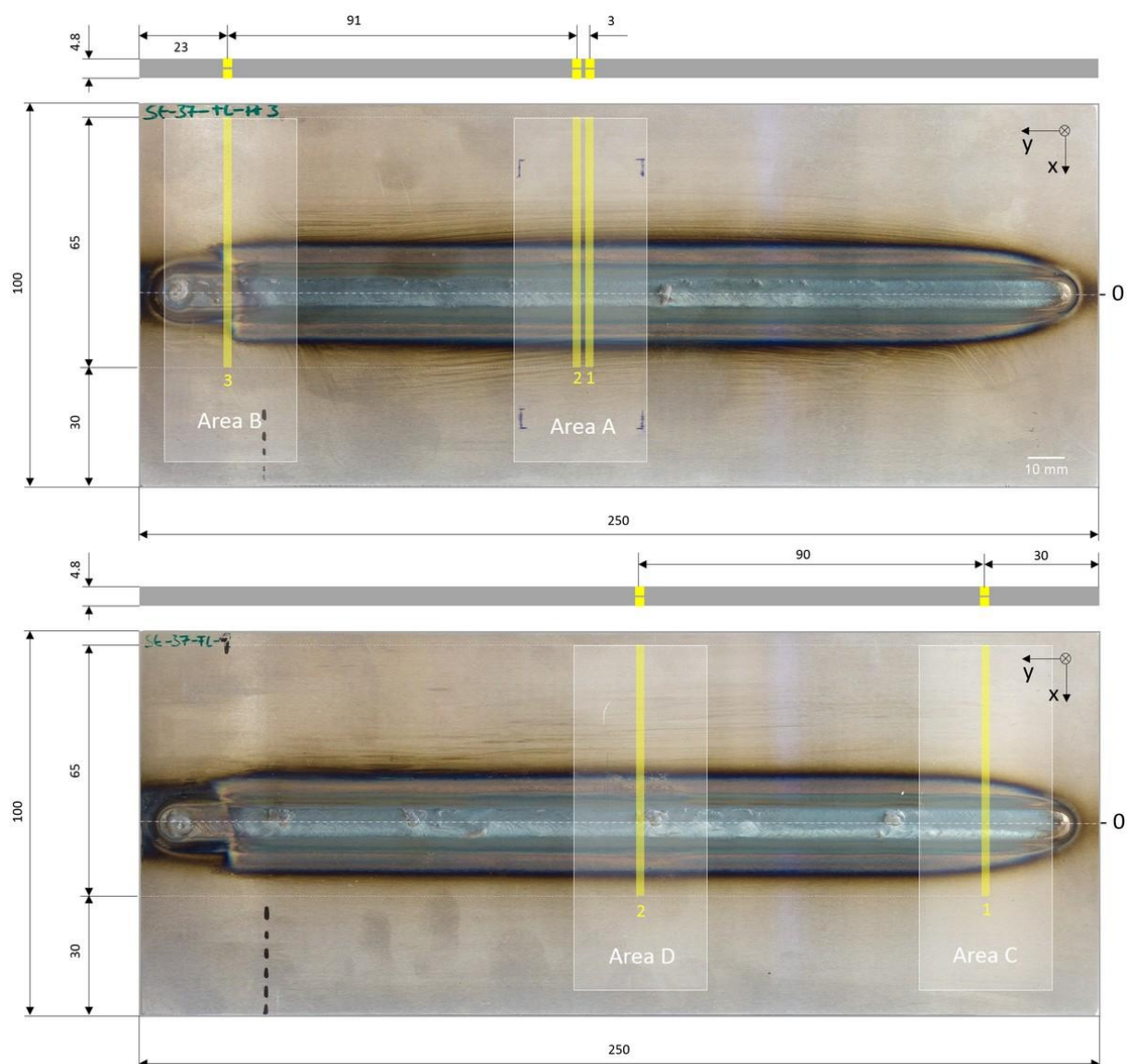


Рисунок 17 – Образцы для изучения остаточных механических напряжений: Образец № 3 (вверху) и № 1 (внизу). Желтые линии представляют область, измеренную при помощи нейтронной дифракции. Выделенная область вокруг – измерена при помощи ГМС сенсоров.

Для того чтобы иметь достаточное пространственное разрешение, учитывая толщину образца 4.8 мм и сварного шва 5 мм, объем наблюдения был выбран $2 \times 2 \times 2 \text{ мм}^3$. Учитывая, что сварной шов представляет собой термически обработанный базовый материал на глубину 1-2 мм, важно дифференцировать верхнюю и нижнюю части листа. Как показано на рисунке 17, образец № 3 был измерен шестью линиями: три линии сверху и три линии снизу. Четыре из них расположены в центре образца, где наиболее были получены наиболее точные о магнитном поле. Из-за ограничений по времени, образец № 1 был измерен четырьмя линиями: две в центре и две на периферии.

2.2.2 Образец без деформаций

Из-за изменения микроструктуры материала во время сварки, включая изменения размера зерен и/или химического состава, важно иметь пространственно разрешенный образец, свободный от деформаций и напряжений. Для получения такого образца один из сварных соединений был разрезан в поперечном сечении при помощи электроэрозионной обработки в прямоугольные элементы, размером $2 \times 2 \times 4.8 \text{ мм}^3$ для отпуска напряжений. Для того чтобы полностью охарактеризовать зону термического влияния, второй разрез был сделан в том же направлении, в 1 мм от первого (Рисунок 18).

Измерения d_0 образца проводились с такими же параметрами, как и для остальных образцов: объем $2 \times 2 \times 2 \text{ мм}^3$ для линий «верх» и «низ». В дополнении к этому, d_0 был измерен с объемом $2 \times 2 \times 4 \text{ мм}^3$, для проверки на соответствие средней величины.

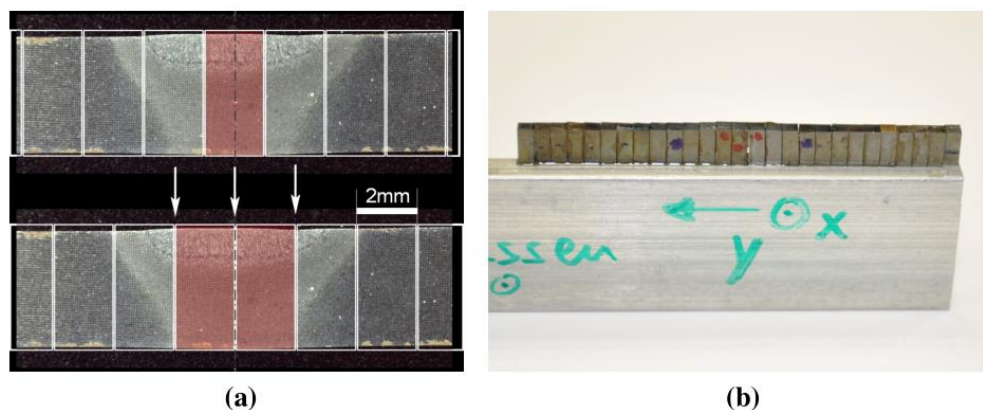


Рисунок 18 – Образец без деформаций (d_0): (a) Сечение в разрезе, показывающее комбинацию элементов из двух разрезов; (b) Образец, подготовленный для измерения. Все элементы закреплены на алюминиевой платформе в последовательности, соответствующей реальному расположению.

2.2.3 Неопределенность измерений

Существуют несколько источников погрешности нейтронных измерений. Наиболее важные из них обобщены в таблице 5.

Таблица 5 – Составляющие погрешности измерения нейтронной дифракции

Источник погрешности	Причина	На что влияет
Источник нейтронов	Несовершенство монохроматора	Длина волны
	Расхождение луча	
Детектор	Эффективность детектора	Угол рассеяния
	Движение коллиматора	
Установка	Поглощение нейтронов	
	Неполный измеряемый объем	

Положение угла рассеяния рассчитывалось при помощи программного обеспечения «StressTexCalculator» при помощи анализа распределения интенсивности. Дальнейшая ошибка была рассчитана как ошибка косвенных измерений. Составляющие погрешности из таблицы 5 могут быть учтены при помощи уравнения (14)

$$\delta d = \sqrt{\left(\frac{1}{2\sin(\theta)}\delta\lambda\right)^2 + \left(\frac{\lambda \operatorname{ctg}(\theta)}{2\sin(\theta)}\delta\theta\right)^2}. \quad (14)$$

Для получения погрешности остаточного механического напряжения, необходимы дальнейшие расчеты:

$$\delta \varepsilon = \sqrt{\left(\frac{d}{d_0^2} \delta d_0\right)^2 + \left(\frac{1}{d_0} \delta d\right)^2}, \quad (15)$$

$$\delta \sigma_{xx} = \sqrt{\left(\frac{E}{1-\nu^2} \delta \varepsilon_{xx}\right)^2 + \left(\frac{E\nu}{1-\nu^2} \delta \varepsilon_{yy}\right)^2}, \quad (16)$$

$$\delta \sigma_{yy} = \sqrt{\left(\frac{E}{1-\nu^2} \delta \varepsilon_{yy}\right)^2 + \left(\frac{E\nu}{1-\nu^2} \delta \varepsilon_{xx}\right)^2}. \quad (17)$$

Как показывают уравнения 16 и 17, ошибка измерения напряжений складывается из ошибок деформаций для каждого направления.

Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Экспериментальные данные нейтронной дифракции

Контрольный образец для нейтронной дифракции был измерен для продольного и поперечного направления деформаций. Измерения были проведены с различным объемом наблюдения для достижения наибольшей воспроизводимости измерений. Центральная линия была измерена с объемом наблюдения $2 \times 2 \times 4 \text{ мм}^3$. Данный объем должен физически усреднить измерения верхних и нижних линий, выполненных с объемом наблюдения $2 \times 2 \times 2 \text{ мм}^3$. Экспериментальные данные подтверждают данное утверждение (Рисунок 19).

Рассчитанные напряжения представлены на рисунках 20 и 21. Каждая точка была рассчитана на основе d_0 контрольного образца. Положения d и d_0 на образце идентичны друг другу. На рисунке 20а, продольный профиль напряжения образца №3 показал выраженные максимумы на расстоянии 7 мм от центра шва для линий 1 и 2 (посередине образца).

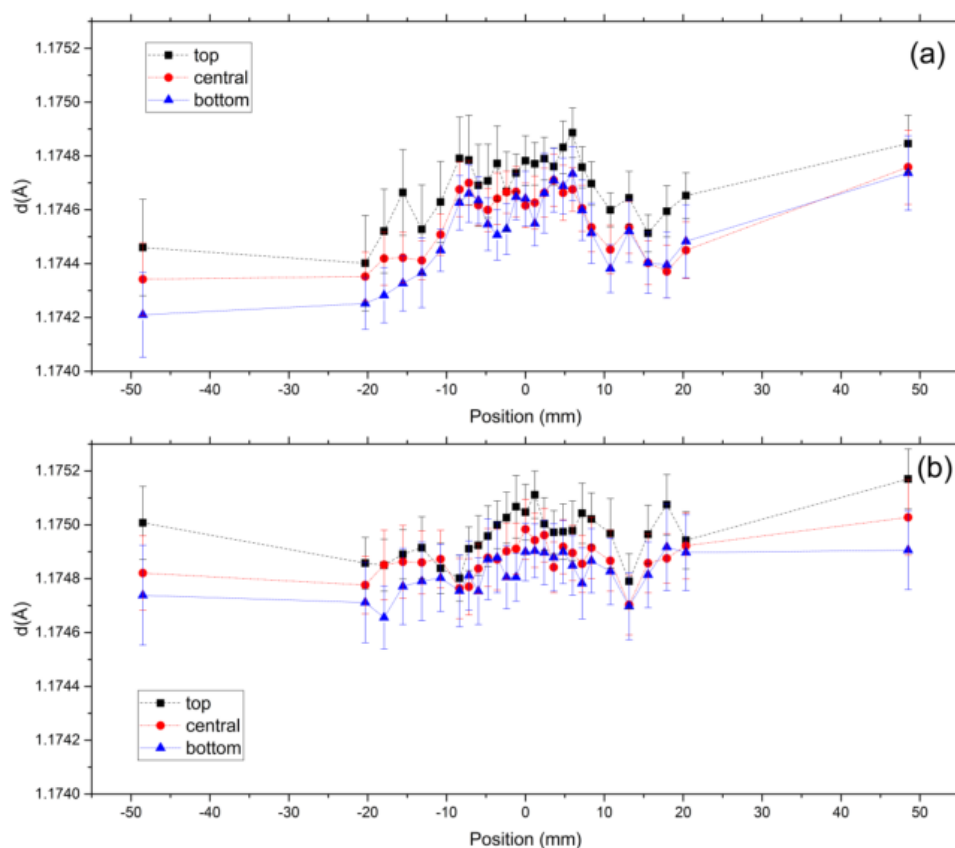


Рисунок 19 – Контрольный образец, свободный от деформаций: а) продольное направление (y); б) поперечное направление (x).

Для линии 3 максимумы немного сдвинуты к центру. Так же для линии 3 амплитуда напряжения слегка меньше чем для линий 1 и 2. Максимальное напряжение растяжения достигает 600 МПа, в то время как напряжение сжатия составляет порядка 210 МПа на позиции минус 30 мм. В дальней зоне, 45 мм в соответствии с теорией, напряжение близко к нулю.

Профиль поперечного напряжения не содержит ярко выраженных максимумов и минимумов. Внизу образца линии 1 и 2 показали напряжения близкие к нулю, в то время как напряжение на верхних линиях составило 230 МПа. Наиболее заметна эта разница в районе сварного шва, где она составляет порядка 100 МПа.

Образец №1 обладает схожим профилем остаточного напряжения. Максимумы продольного напряжения располагаются на тех же позициях, что и для образца №3 и составляют порядка 620 МПа. В поперечном направлении напряжения верхней линии 1 близки к нулю. Стоит отметить, что нижняя линия

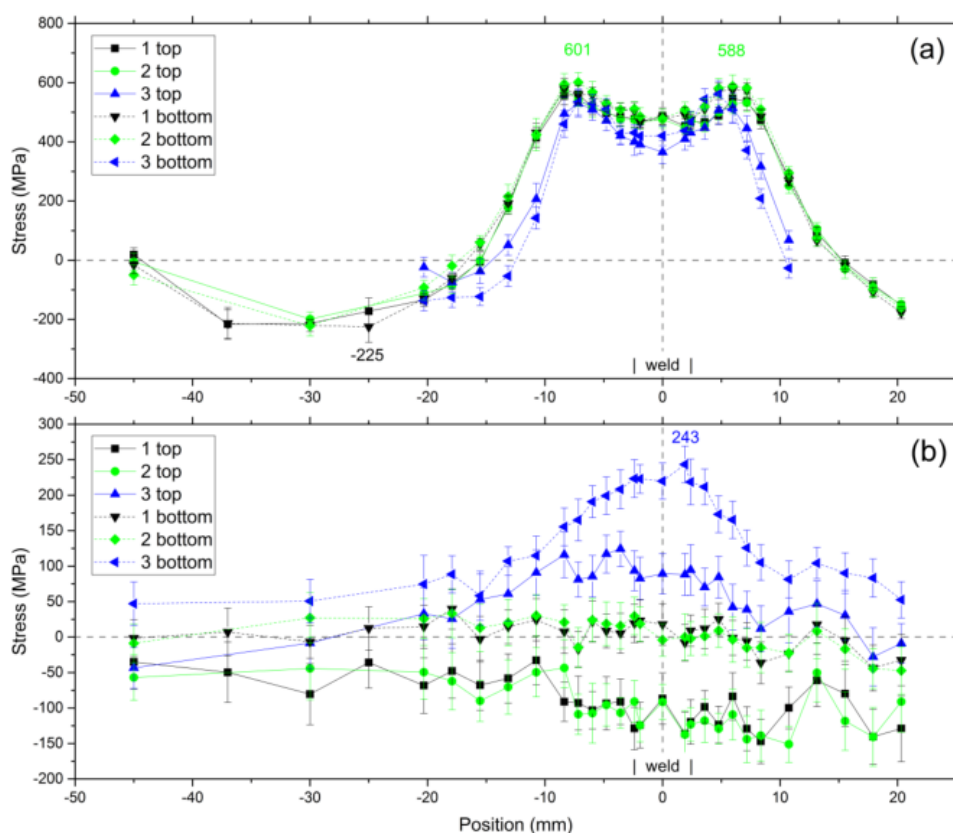


Рисунок 20 – Остаточное механическое напряжение в образце №3: а) продольное направление; б) поперечное направление.

находится под напряжением растяжения в диапазоне 90 МПа. Более того, линия 2 находится под большим напряжением, чем линия 1, достигая 200 МПа для нижней линии. В отличие от образца №3, линии 2 верх и низ сдвинуты в область деформации растяжения, благодаря возможному изгибу образца.

Все образцы показали хорошую воспроизводимость измеренных деформаций. Значения оказались близки как по позиции, так и по амплитуде. Это в свою очередь подтверждает надежность метода нейтронной дифракции.

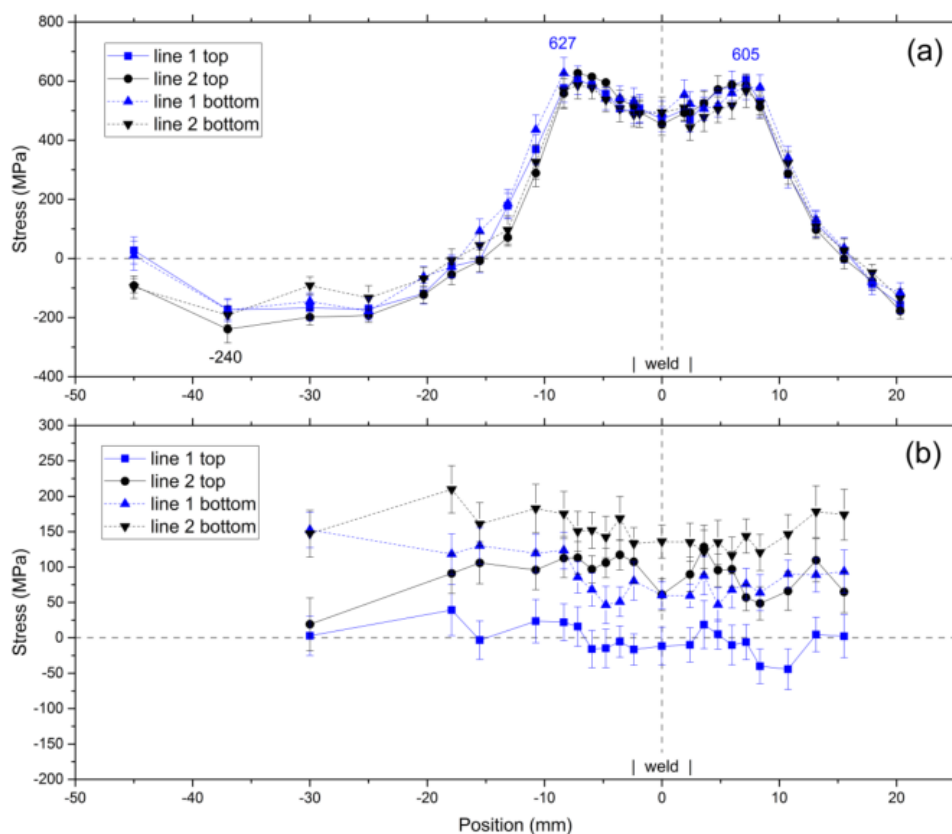


Рисунок 21 – Остаточное механическое напряжение в образце №1: а) продольное направление; б) поперечное направление.

3.2 Экспериментальные данные измерений СМНР

Измерения проводились на тех же двух образцах №1 и №3 при помощи датчиков, описанных во второй главе. Для каждого образца была выбрана область интереса, соответствующая месту нейтронографирования. Существует несколько причин для проведения измерений только определенной зоны. Во первых, изменения топографии существенно меньше на меньшей поверхности.

Во вторых, магнитный поток на краях образца существенно больше. Это отрицательно влияет на эффективность сенсора, а так же усложняет обработку и анализ данных. Зона D была измерена включая края образца для того чтобы показать данный эффект (Рисунок 25).

Рисунок 22 показывает область в центре образца №3 (Зона А). Нулевая позиция соответствует центру сварного шва. Поведение нормальной компоненты магнитного поля выглядит симметричным относительно осевой линии сварного шва.

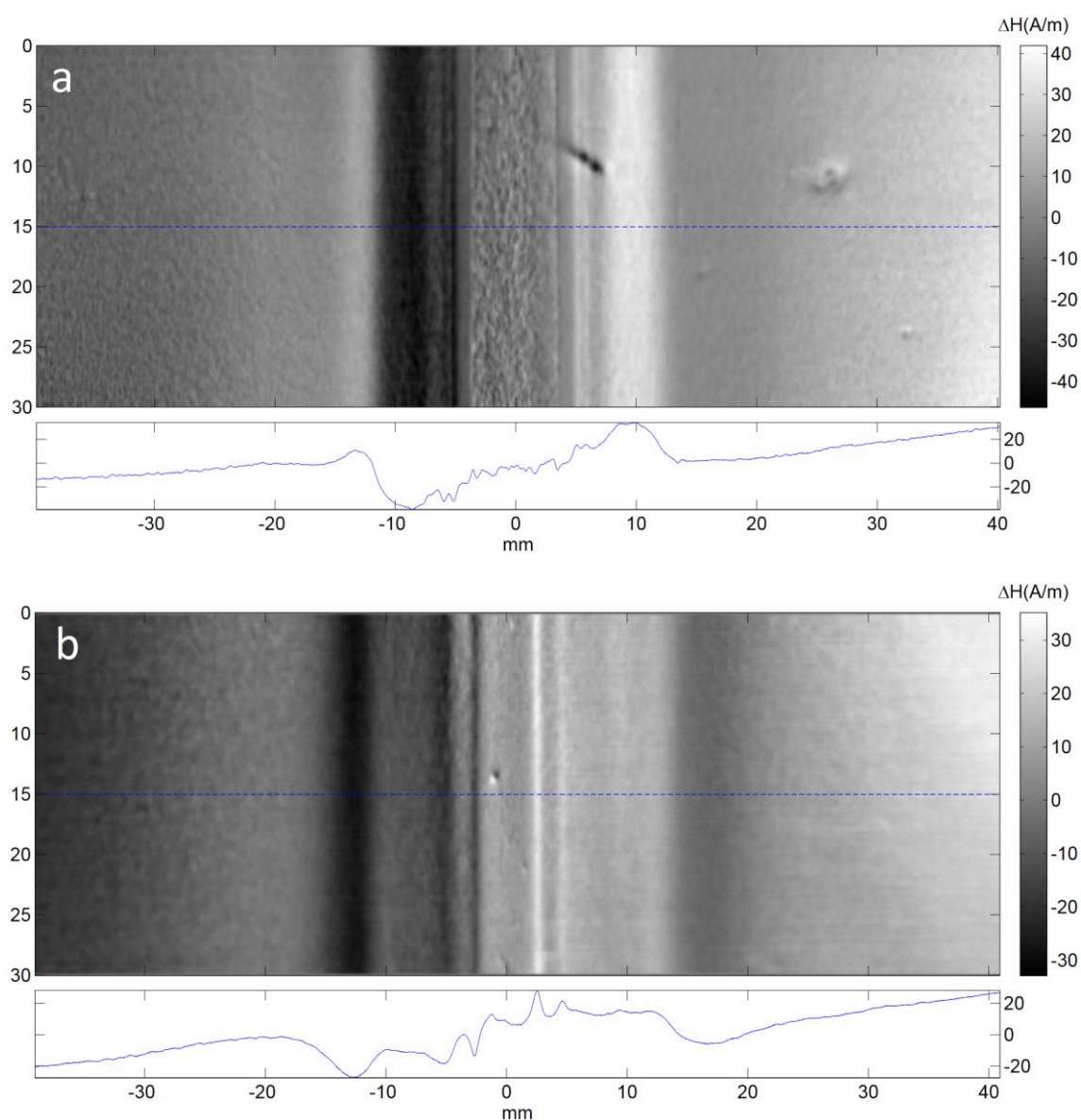


Рисунок 22 – Графическое отображение нормальной компоненты магнитного поля зоны А, полученной при помощи градиометра (12А): а) верх образца; б) низ образца. Профиль под каждым изображением соответствует положению пунктирной линии на рисунке.

Несмотря на то, что данное изображение было получено при помощи градиометра, линейная составляющая глобального магнитного поля отчетливо видна на профиле под рисунком. Так же отчетливо видны несколько магнитных «дефектов», которые не видны при визуальном осмотре. Изучение подобных дефектов, а так же текстуры магнитного поля не входит в задачи данного исследования.

Ближе к краю сварного шва (Зона В, Рисунок 23) СМПР не столь симметрично и повторяет контуры шва. На верхней стороне отчетливо виден след от зажима на позиции 30 мм. Начало сварного шва видно как сверху, так и снизу образца. Внизу видны индикации царапин в виде параллельных линий.

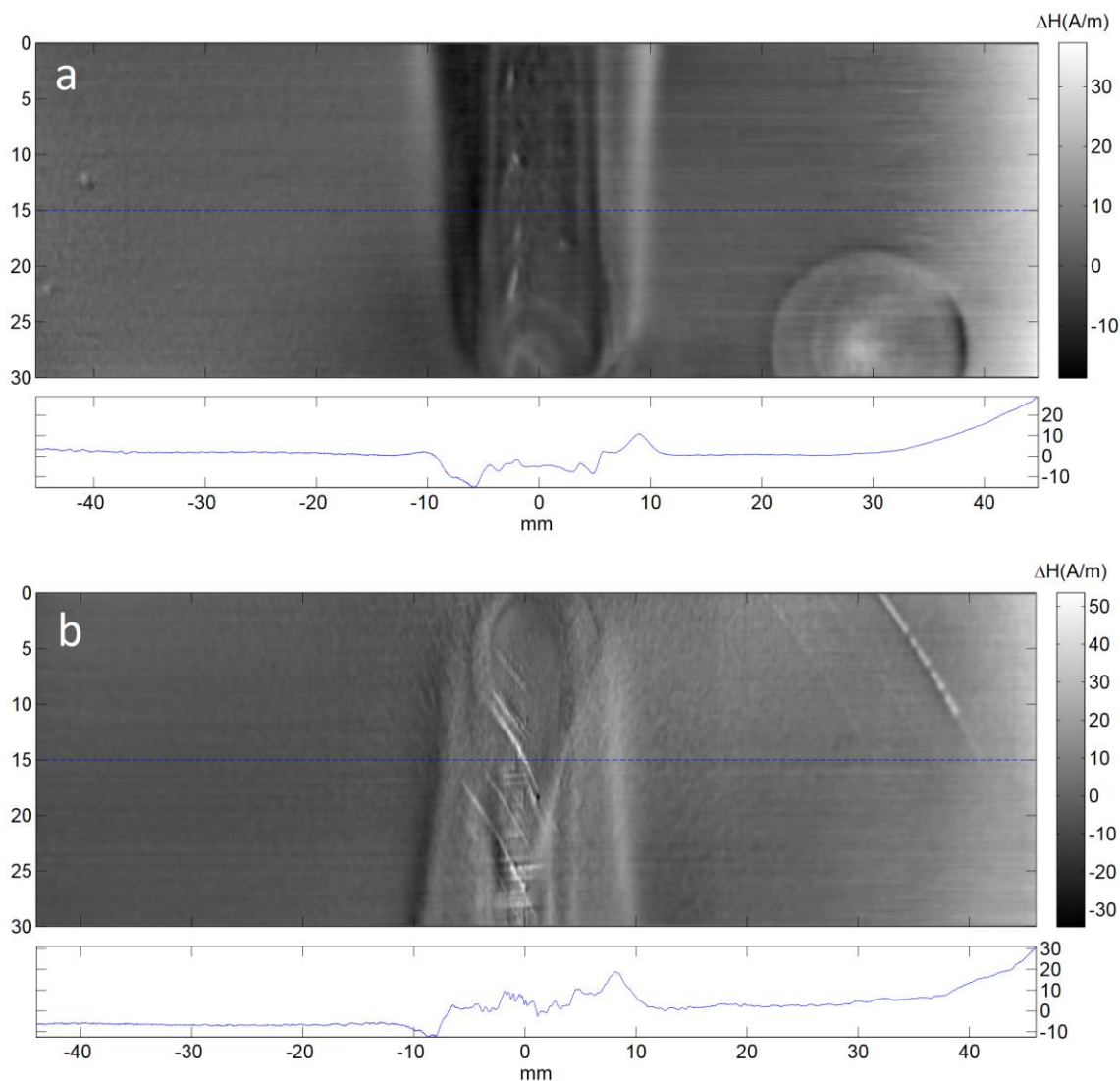


Рисунок 23 – Графическое отображение нормальной компоненты магнитного поля зоны В, полученной при помощи градиометра (12А): а) верх образца; б) низ образца. Профиль под каждым изображением соответствует положению пунктирной линии на рисунке.

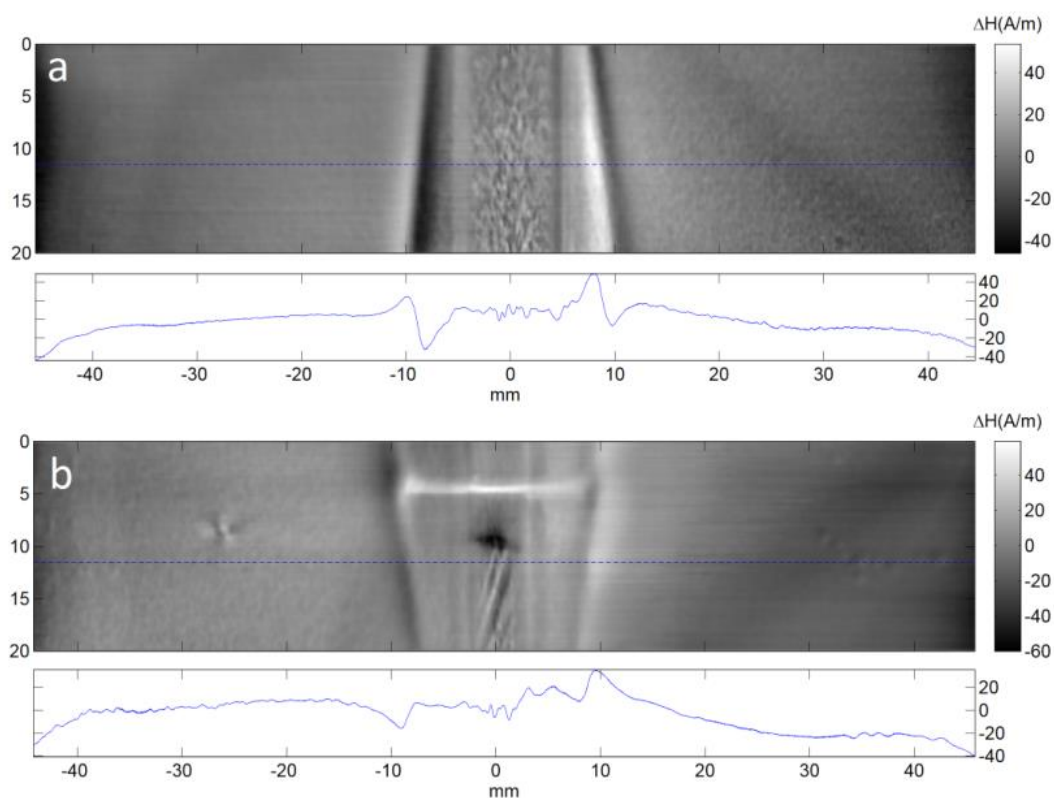


Рисунок 24 – Графическое отображение нормальной компоненты магнитного поля зоны С, полученной при помощи градиометра (12А): а) верх образца; б) низ образца. Профиль под каждым изображением соответствует положению пунктирной линии на рисунке.

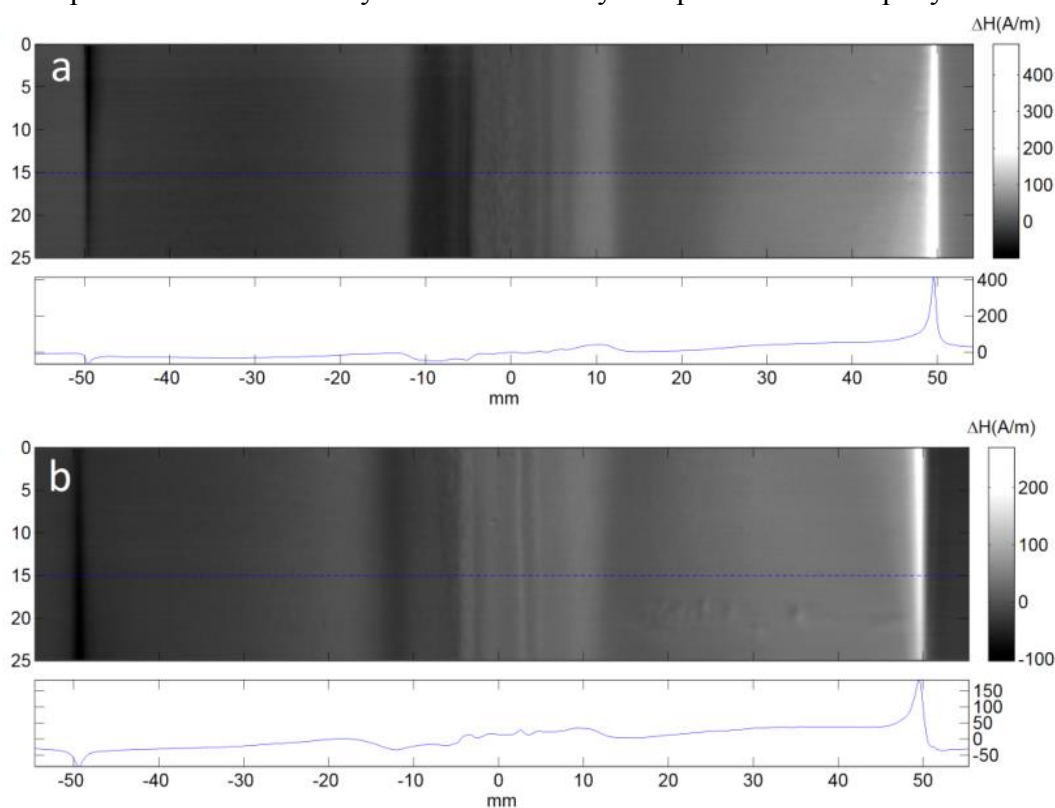


Рисунок 25 – Графическое отображение нормальной компоненты магнитного поля зоны D, полученной при помощи градиометра (12А): а) верх образца; б) низ образца. Профиль под каждым изображением соответствует положению пунктирной линии на рисунке.

В центре образца №1 (Зона D, Рисунок 25) структура магнитного поля сравнима с зоной А. На рисунках 26 и 27 отображены измерения СМПР при помощи трехкомпонентного сенсора. Нормальная компонента магнитного поля H_z очень похожа на измерения градиометра. Максимумы расположены на тех же позициях (10 мм от осевой линии сварного шва). Контрастность и детализация 3D измерений существенно отличаются от градиометра, однако глобальное магнитное поле видно более отчетливо.

В направлении x минимальная амплитуда магнитного поля располагается в 12 мм от осевой линии сварного шва. Максимум находится в 3 мм, что примерно соответствует границе сварного шва и базового материала. В направлении y (продольное направление) сварной шов едва различим. В данном направлении присутствует только глобальное магнитное поле образца. Сумма всех направлений была рассчитана в соответствии с уравнением 18.

$$H_s = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \quad (18)$$

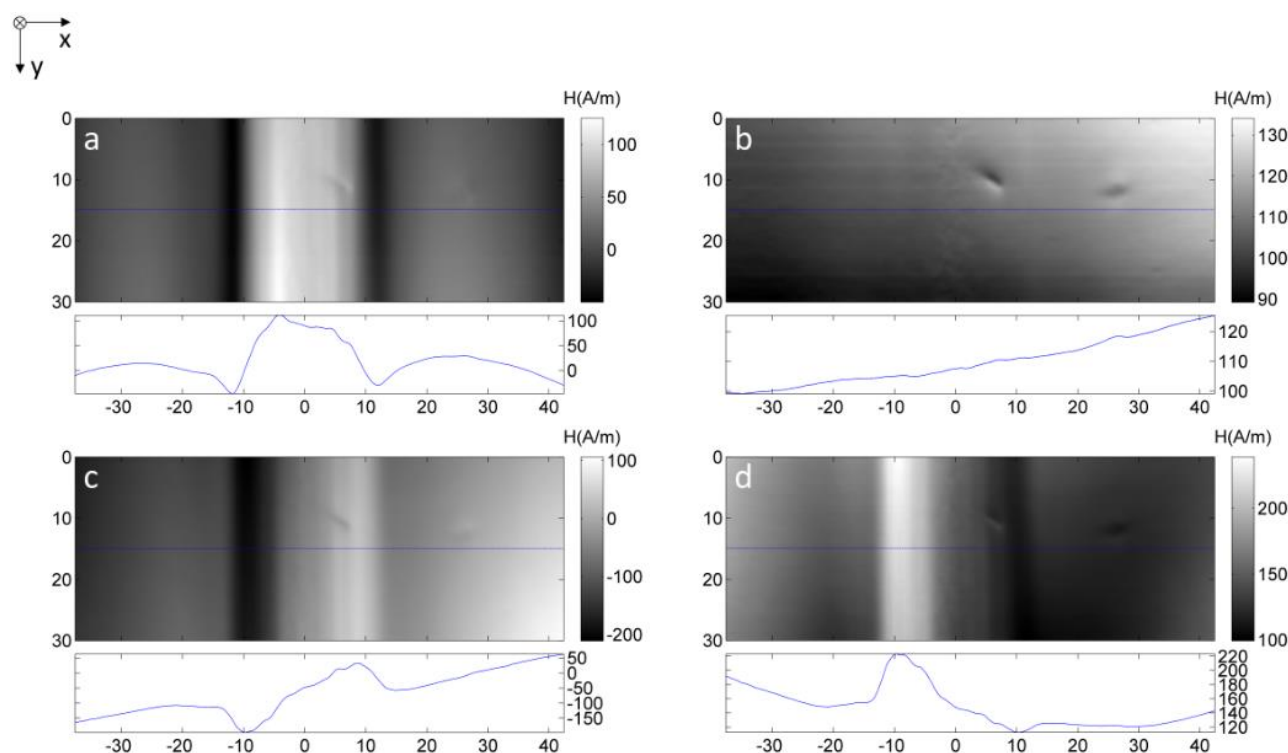


Рисунок 26 – Графическое отображение измерений верхней стороны образца в зоне А, полученной при помощи трехкомпонентного сенсора (3D): а) x-компонента; б) y-компонента; в) z-компонента; г) сумма всех направлений.

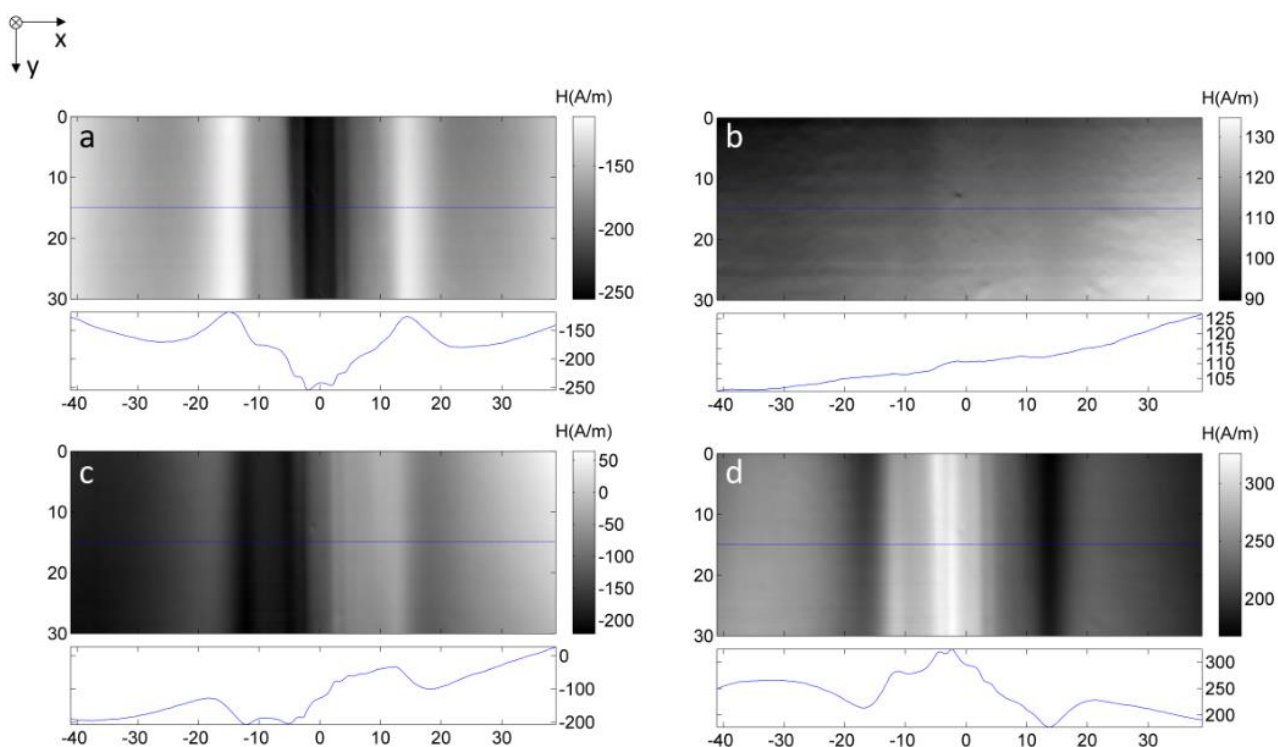


Рисунок 27 – Графическое отображение измерений верхней стороны образца в зоне А, полученной при помощи трехкомпонентного сенсора (3D): а) x-компонента; б) y-компонента; в) z-компонента; г) сумма всех направлений.

Магнитные «дефекты» обнаруженные градиометром, так же видны при измерении 3D сенсором. С нижней стороны образца (Рисунок 27) так же видны область сварного шва и зона термического влияния. Вращение образца производилось по оси y , и как следствие, изображение x-компоненты магнитного поля внизу образца выглядит инвертированным. Максимумы внизу расположены немного далее от осевой линии сварного шва, в сравнение с верхом образца.

3.3 Нейтронная дифракция и распределение остаточного напряжения

Поскольку металл, расплавленный при сварке, сжимается по мере охлаждения, появление остаточных механических напряжений неизбежно. Результаты, полученные при помощи нейтронной дифракции, показали наличие сильного напряжения в продольном направлении. Максимальные значения симметричны относительно сварного шва. В поперечном направлении, механические напряжения имеют гораздо меньшую величину. Это может быть объяснено тем, что механические напряжения в поперечном направлении могут быть отпущены из-за искривления пластины [19]. Действительно, на рисунке 21 видны результаты искривления: линии «верх» и «низ» смещены симметрично относительно друг друга. Поскольку образцы не были полностью зафиксированы, искривление и как следствие отпуск напряжений вполне возможен. В продольном направлении довольно часто механический стресс достигает порядка предела текучести [19]. Однако в данной работе сварной шов был сделан на цельном листе металла, без применения добавочного материала. Как результат, базовый материал расплавлен на поверхности (см. Рисунок 18а) при существенной скорости последующего охлаждения, что могло привести к упрочнению зоны термического влияния [19]. Как следствие, структурный и композиционный состав материала изменился в процессе сварки. Отсутствие добавочно материала способствовало минимизации данного эффекта. Предел текучести указанный производителем (235 МПа) может существенно увеличиться. Похожие результаты были получены в [23], где при помощи электрической дуги были сварены 12мм низко углеродные стальные пластины. Расчет остаточных напряжений с применением пространственно детерминированного эталонного образца, должен способствовать компенсации вариаций микроструктуры и химического состава в сварном шве и зоне термического влияния. Для корреляции с МПМ, важно отметить что напряжения, измеренные при помощи нейтронной дифракции, являются

внутренними и могут отличаться от механических напряжений на поверхности [18].

3.4 Собственное магнитное поле рассеяния

Малые размеры активной зоны сенсоров, в особенности 12А, позволяют различить тонкие магнитные структуры благодаря высокому пространственному разрешению. Следует отметить, латеральное разрешение зависит так же от расстояния между поверхностью объекта и сенсором [20]. Как было указано выше в технических характеристиках сенсоров, магнитные структуры на плоской поверхности могут быть различимы при размерах порядка 160 мкм. Если объект имеет сложную геометрическую форму либо топографию, это так же приведет к изменению разрешения. Процесс сварки был осуществлён учитывая данное обстоятельство. Тем не менее, во время сварки неизбежны изменения формы и топографии образцов. По оценочным данным, данные изменения не должны превышать 300 мкм. Выборочные измерения в зонах с наименьшей вариацией геометрии, позволили повысить разрешение полученных данных.

Информация о магнитном поле, полученная при помощи ГМС сенсоров, является сложной по составу. Как было упомянуто во введении, свой вклад вносит несколько составляющих. Все образцы обладают собственным магнитным полем, которое может быть замечено особенно хорошо на рисунках 26 и 27. В этих измерениях присутствует заметная линейная составляющая, которая говорит о «глобальном» магнитном поле образца. Наиболее отчетливо это проявляется в направлении y ($H_y(x)$). Наличие достаточно сильного магнитного поле может вызвать появление полей утечки из за наличия зон с разной магнитной проницаемостью, каковыми могут быть сварной шов и зона термического влияния.

Важно отметить, что невозможно различить поле утечки и индуцированное магнитострикцией поле только при помощи измерения силы

магнитного поля. В случае магнитострикции, теория позволяет провести прямую взаимосвязь между остаточным механическим напряжением и магнитным полем. В случае полей утечки, проблема носит более сложный характер, и зависит от изменения магнитных свойств материала с температурой. Возможность перемагничивания зоны термического влияния под воздействием индуцированного в процессе сварки магнитного поля так же не может быть исключена. Согласно [3], магнитное поле, индуцированное обратной магнитострикцией должно быть на порядок меньше, чем было обнаружено в данной работе.

Рисунки 26d и 27d полученные с помощью 3D датчика, предоставляют векторную сумму всех трех компонент. Тем не менее, важно анализировать каждую компоненту отдельно. Для корреляции между остаточным механическим напряжением и магнитным полем рассеяния были выбраны x и y компоненты, так как они содержат наибольшее количество информации.

3.5 Корреляция двух методов

Устройство ГМС датчиков позволило изучить малые изменения магнитного поля с высоким пространственным разрешением (35 мкм), обеспеченным высокой точностью манипуляторов и малой активной зоной датчика. Многострочные измерения и представление на основе изображения, позволило изучить магнитные структуры размером менее 0.2 мм, в то время как механические напряжения, полученные при помощи нейтронной дифракции, усреднены в объеме $2 \times 2 \times 2 \text{ мм}^3$. Внутри данного объема могут присутствовать напряжения высшего порядка. Во избежание сравнения разных объемов, для количественного анализа, нейтронная дифракция была сопоставлена с магнитными измерениями, усредненными по $2 \times 2 \text{ мм}^2$ области. Для качественного анализа, точные профили всех магнитных измерений так же представлены в данной главе. Остаточные напряжения представлены как эквивалентный стресс вон Мизеса (σ_{eqv}), в соответствии с уравнением 9. Все

магнитные измерения при помощи 12А датчика представлены по модулю в целях удобочитаемости. Рисунки 28 и 29 отображают наложение эквивалентного стресса и магнитного профиля образца, в соответствии с верхним и нижним измерениями. Поскольку образцы №1 и №3 имеют очень схожие параметры, только образец №3 будет обсуждаться дальше.

Как видно на рисунке 28, положение максимумов НД и МП не совпадают точно, но находятся близко друг у другу. Поскольку положение максимумов находится вдали от сварного шва, данный эффект не может быть объяснен изменениями в топографии образца или вариацией расстояния между сенсором и поверхностью образца. Это подтверждается измерениями нижней стороны (Рисунки 22b, 23b, 24b и 27), где нет существенных изменений в топографии поверхности образца.

Как и в предыдущих работах [11, 12], была рассчитана первая производная МП измерений. Для градиометра не имеет смысла считать производную с исходным разрешением из-за высокого уровня шума и присутствия структур в виде «зерен». В связи с чем, производная была рассчитана с усреднением $2 \times 2 \text{ мм}^2$. Как видно из рисунка 28f, непосредственное сопоставление производной МП измерений с 12А датчиком и НД не выявило прямой зависимости. То же относится и к сопоставлению непосредственно с $\Delta H_z(x)$, показанному на рисунке 28e.

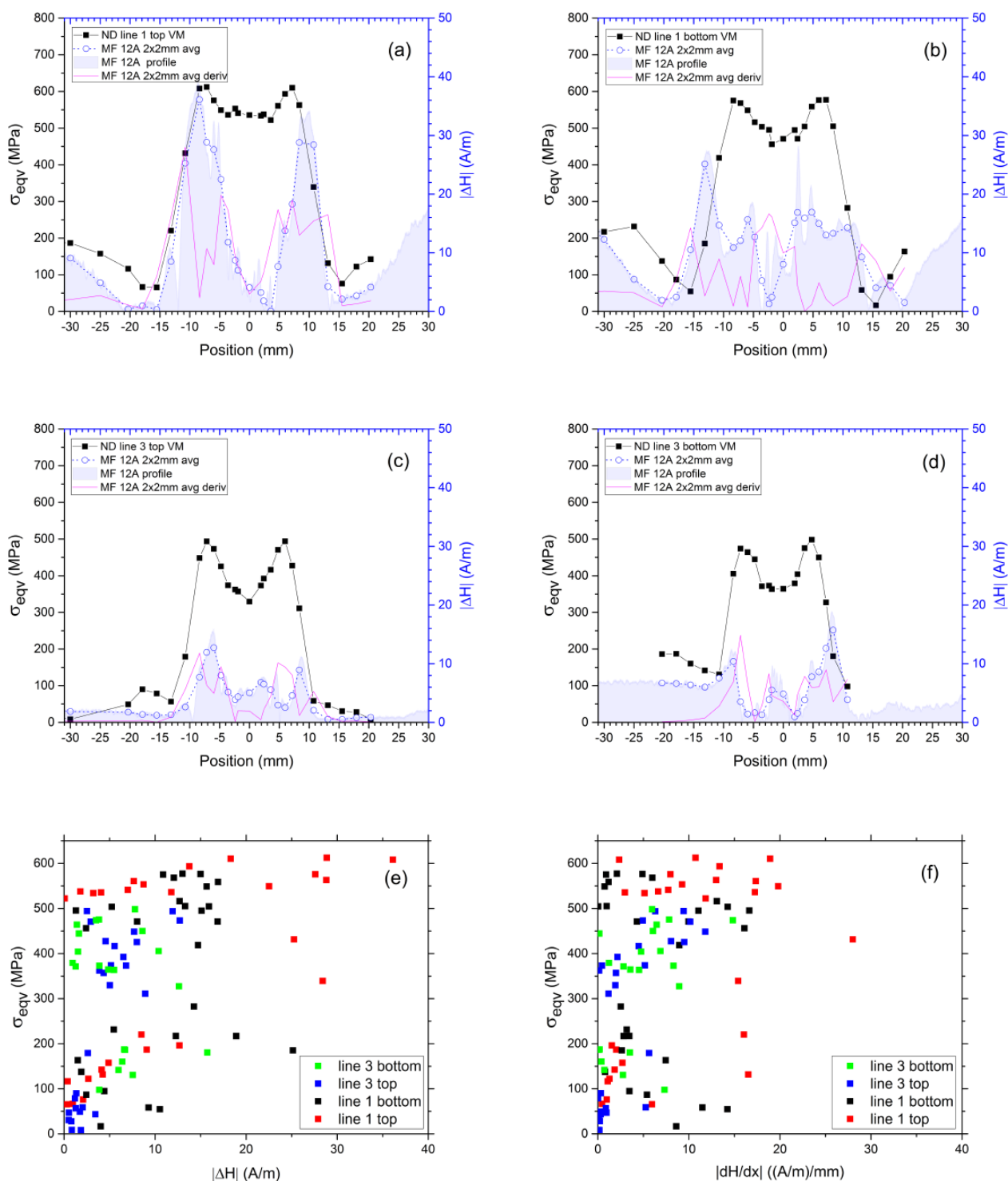


Рисунок 28 – Корреляция эквивалентного остаточного напряжения, полученного способом нейтронной дифракции (НД) с измерением магнитного поля (МП) с использованием градиометра (образец №3): (а) Зона А, верх; (b) Зона А, низ; (c) Зона Б, верх; (d) Зона Б, низ; (e) Эквивалентный стресс и нормальная компонента; (f) Эквивалентный стресс и первая производная нормальной компоненты магнитного поля.

На рисунке 29 представлена x составляющая магнитного поля (перпендикулярно к сварному шву). Можно сделать вывод, что корреляция между этим направлением магнитного поля и остаточным напряжением носит наиболее явный характер. Однако важно отметить, что одно направление не отображает реального направления вектора магнитной индукции. Как было упомянуто ранее, Как упоминалось ранее, глобальное магнитное поле образца необходимо принять во внимание. Следовательно, анализ различных направлений, представленных на рисунках 26 и 27, показывает, что образец намагничен преимущественно в диагональном направлении. Другими словами, глобальное магнитное поле присутствует во всех измерениях. Вполне вероятно, что из-за наложения глобального и локального магнитных полей информация, которая может быть соотнесена с остаточным механическим напряжением, содержится в минимумах, в 11 мм от центра сварного шва (Рисунок 29). То же самое может быть заключено для измерений с нижней стороны (Рисунок 29b). Однако минимумы на нижней стороне расположены на расстоянии 15 мм от центра сварного шва. Подобное смещение не наблюдается в остаточных напряжениях, измеренных при помощи нейтронной дифракции. Результат количественного сопоставления напряжений вон Мизеса и x компоненты МП представлен на рисунке 29е. Количественная взаимосвязь действительно лучше чем у Z компоненты. Смещение вдоль оси H может быть объяснено гистерезисом датчика (Рисунок 14b).

На рисунках 29с и 29d представлена корреляция остаточных напряжений вон Мизеса и производной X компоненты ($dH_x(x)/dx$). В отличие от предыдущих исследований, двумерное картирование магнитного поля на поверхности позволило определить дефекты и избежать их корреляции с остаточным механическим напряжением. Это особенно важно для дифференцирования исходного сигнала. На верхней стороне (Рисунок 29с), максимумы МП близки к максимумам НД. На нижней стороне (Рисунок 29d), эта тенденция несколько иная: максимумы МП которые коррелируют сверху, становятся шире внизу. Можно заметить, что в некоторых точках, особенно в

нижней части, корреляция между $dH_x(x)/dx$ и σ_{eqv} имеет место. В то время как это возможно, чтобы подтвердить это потребуется более высокое пространственное разрешение.

Обзор при помощи визуального представления показан на рисунке 30, где сравниваются магнитное и оптическое изображения, а так же картография нейтронной дифракции. Эквивалентные напряжения линий 1 и 2 были интерполированы в двумерный массив. Температурирующие цвета, которые можно увидеть на оптическом изображении, из-за применения инертного защитного газа в процессе сварки, может не отображать температуру правильно, однако может служить в целях сравнения. На МП изображении на рисунке 30а виден четкий контраст между сварным швом и зоной термического влияния. На другой стороне (Рисунок 30b), на расстоянии 4 мм от центра, так же виден контраст, соответствующий зоне термического влияния (см. Рисунок 18a). Возможность определения зоны термического влияния может быть полезна. Тем не менее, для исследования остаточного механического напряжения это может быть нежелательно, так как это может повлиять на информацию, связанную с остаточным напряжением. Стоит также отметить, что измерения, полученные после нейтронной дифракции, не показали никаких изменений, по сравнению с измерениями предшествующими экспериментам по нейтронной дифракции.

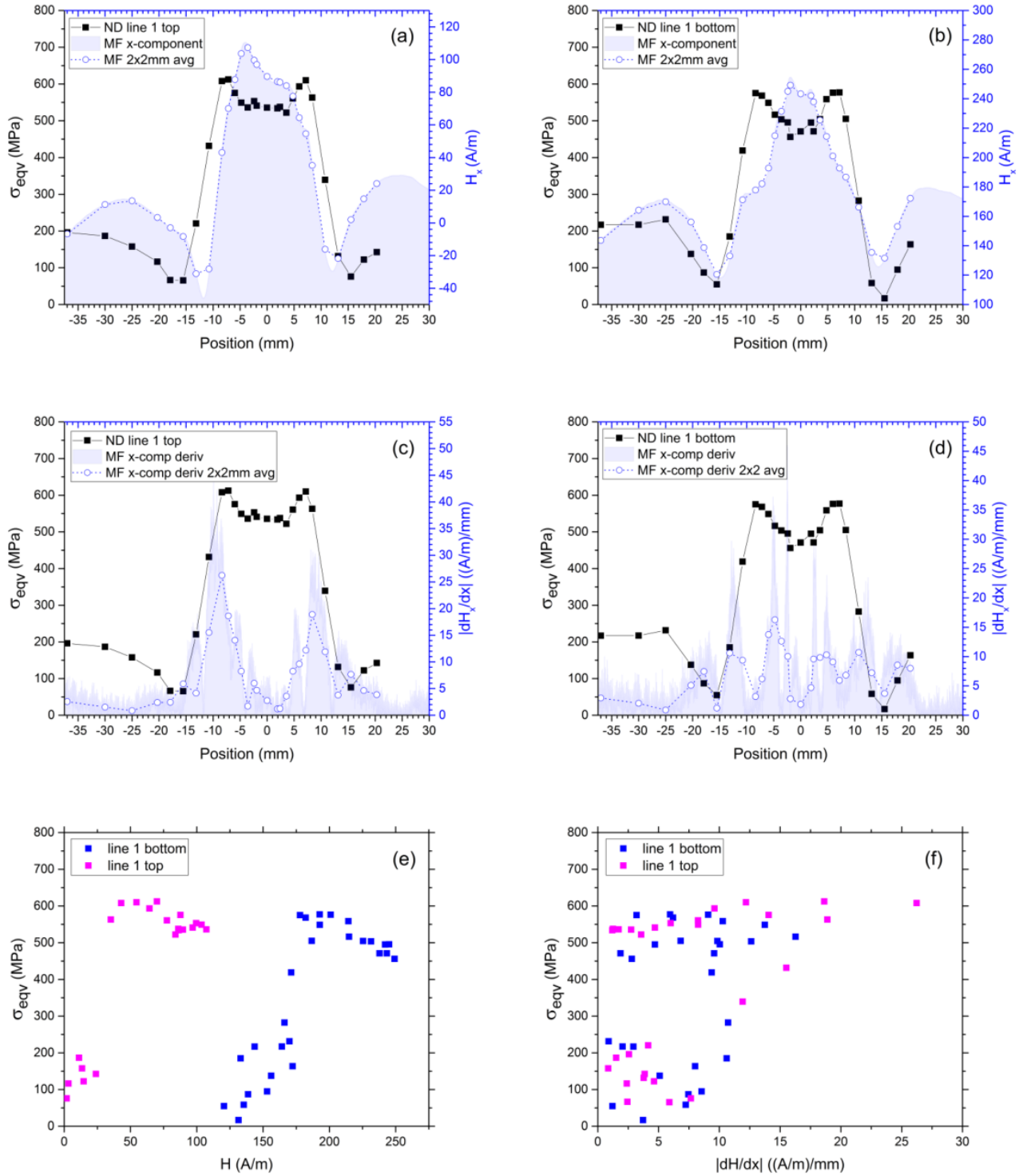


Рисунок 29 – Корреляция эквивалентного остаточного напряжения, полученного способом нейтронной дифракции (ND) с x-компонентой магнитного поля (MF) (3D сенсор, образец №3, зона A): а) верх; б) низ; в) верх, пространственная производная; д) низ, пространственная производная; е) Эквивалентный стресс и x-компонента; ф) Эквивалентный стресс и первая производная x-компоненты магнитного поля.

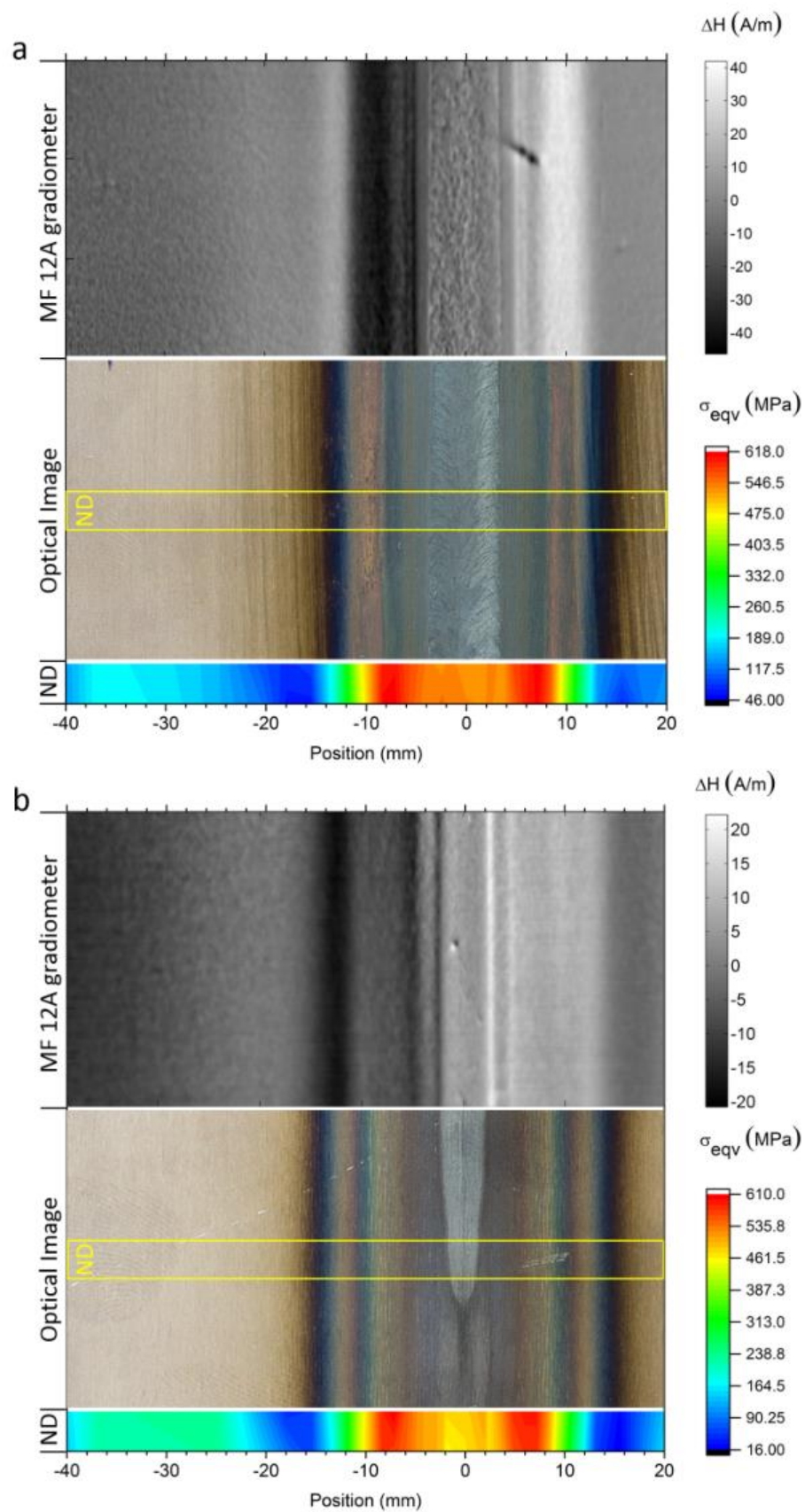


Рисунок 30 – Графическое сравнение остаточного механического напряжения, полученного методом нейтронной дифракции (ND) и нормальной компоненты собственного магнитного поля (MF) полученного градиометрическим сенсором: а) верх образца; б) низ образца.

Глава 4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Проведенное в данной работе исследование направленно на установление экспериментальной зависимости между собственным магнитным полем рассеяния сварных соединений и остаточным механическим напряжением. Метод оценки собственных магнитных полей рассеяния получил название магнитной памяти металла (МПМ).

В настоящее время существуют различные методы для оценки остаточного механического напряжения. Однако неразрушающих способов контроля не так много. Рентгеновская дифракция позволяет проанализировать лишь поверхность объекта, из-за сильного поглощения рентгеновских лучей металлом. Нейтронная дифракция позволяет провести анализ в объеме, однако подобные измерения весьма дороги и невозможны на месте проведения работ. Метод магнитной памяти металла обещает оценку механического напряжения как качественно, так и количественно. Однако исследований, в достаточной степени подтверждающих это, не так много. Большинство подобных исследований базируются на весьма не точных измерениях, как остаточного напряжения, так и магнитного поля. В связи с чем, целью данной работы является экспериментальное выяснение зависимости между остаточным механическим напряжением в сварных соединениях из стали S235JR и распределением собственного магнитного поля на поверхности образца.

Как результат, были получены изображения высокого разрешения магнитного поля на поверхности сварного соединения стали S235JR в трех принципиальных направлениях. В совокупности с детально исследованным профилем остаточного напряжения при помощи нейтронной дифракции, эти данные представляют релевантную информацию для проверки физических основ метода магнитной памяти металла. В этой главе будет дана оценка перспективности данного метода, а так же его ресурсоэффективность и коммерческая ценность.

4.1 Предпроектный анализ

4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для анализа потребителей результатов проведенного исследования был проанализирован целевой рынок и проведено его сегментирование.

Целевой рынок – сегменты рынка, на котором будет продаваться в будущем разработка.

Сегмент рынка – это особым образом выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих определенными общими признаками.

Сегментирование – это разделение покупателей на однородные группы, для каждой из которых может потребоваться определенный товар (услуга).

Учитывая область данного исследования, которое направлено на получение углубленных знаний в области неразрушающего контроля сварных соединений, можно выделить следующие сегменты рынка (таблица 6):

- научно-исследовательские институты;
- высшие учебные заведения;
- предприятия нефтегазовой промышленности;
- крупные промышленные предприятия;

Таблица 6 – Карта сегментирования рынка

Затраты	Неразрушающие методы контроля остаточного напряжения			
	МПМ	Ультразвук	Нейтронная дифракция	Рентгеновская дифракция
Высокие				
Средние				
Низкие				

Наиболее актуальным данное исследование является для научно-исследовательских институтов, а так же компаний, занимающихся разработкой оборудования неразрушающего контроля, основанного на методе магнитной памяти металла. Подобные компании способны производить относительно не дорогое оборудование для контроля остаточных механических напряжений,

которое в свою очередь является востребованным среди средних и крупных промышленных компаний.

4.1.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Систематический анализ конкурирующих разработок существующих на рынке помогает своевременно вносить коррективы в научное исследование, что позволяет повысить конкурентоспособность конечного продукта. Для это важно реалистично оценить сильные слабые стороны разработок конкурентов. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения был проведен при помощи оценочной карты, приведенной в таблице 7.

Критерии для оценки и сравнения ресурсоэффективности и ресурсосбережения, приведенные в таблице 7, подобраны исходя из технических и экономических особенностей исследования, создания и эксплуатации выбранных объектов сравнения. Позиция разработки и конкурентов оценена по каждому показателю по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме составляют 1.

Таблица 7 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
2. Удобство в эксплуатации	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
3. Помехоустойчивость	0,07	2	4	5	0,14	0,28	0,35
4. Энергоэкономичность	0,05	5	3	1	0,25	0,15	0,05

1	2	3	4	5	6	7	8
5. Надежность	0,08	4	4	4	0,32	0,32	0,32
6. Уровень шума	0,04	5	3	3	0,2	0,15	0,15
7. Безопасность	0,13	5	3	3	0,65	0,39	0,39
8. Потребность в ресурсах памяти	0,05	4	4	4	0,2	0,2	0,2
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,13	3	3	5	0,39	0,39	0,65
10. Простота эксплуатации	0,07	5	3	3	0,35	0,21	0,21
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,07	4	5	4	0,28	0,35	0,28
2. Уровень проникновения на рынок	0,07	3	3	3	0,21	0,21	0,21
3. Цена	0,08	5	5	2	0,4	0,4	0,16
4. Послепродажное обслуживание	0,06	5	4	4	0,3	0,24	0,24
Итого	1	59	52	49	4,14	3,69	3,61

B_{Φ} – метод магнитной памяти металла (МПМ); $B_{к1}$ – метод рентгеновской дифракции; $B_{к2}$ – метод нейтронной дифракции.

Анализ конкурентных технических решений проведен по формуле:

$$K = \sum B_i + B_i, \quad (19)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

B_i – вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя.

Конкурентами в данном сравнении выступают методы неразрушающего контроля утилизирующие рентгеновскую и нейтронную дифракцию.

Основываясь на полученной оценочной карте, можно сделать следующие выводы:

1. Разрабатываемый метод является конкурентоспособным благодаря низким энергозатратам и простоте эксплуатации.

2. Метод не требует применения сложного и дорогого оборудования, в отличие от конкурентов. Как следствие, более низкая себестоимость может быть достигнута.

3. Недостатком оценки механических напряжений методом магнитной памяти металла является низкая помехоустойчивость.

4.2 Инициация проекта

4.2.1 Цели и результат проекта

Своевременное выявление участков повышенного механического напряжения в сварных соединениях позволяет предупредить аварийные ситуации и продлить срок эксплуатации изделия. Это в свою очередь минимизирует затраты на ремонтно восстановительные работы.

Целью данной работы является выяснение зависимости между остаточным механическим напряжением в сварных соединениях из стали S235JR и распределением магнитного поля на поверхности изделия.

Объектом исследования в работе являются остаточные механические напряжения. Предмет исследования – корреляция остаточного механического напряжения и собственного магнитного поля рассеяния. В качестве метода исследования был использован способ прямой численной корреляции двух переменных.

Научная и практическая новизна работы заключается в:

- 1) Получении высокоточных измерений собственного магнитного поля рассеяния вблизи поверхности сварных соединений;
- 2) Измерении профиля остаточного механического напряжения после сварки, методом нейтронной дифракции;
- 3) Качественной и количественной корреляции собственных магнитных полей рассеяния с реальным остаточным механическим напряжением.

Работа нацелена на получение более глубоких знаний о взаимосвязи остаточного механического напряжения и распределения собственных магнитных полей рассеяния. Данное исследование является релевантным для разработки способа оценки остаточного напряжения методом магнитной памяти металла. Информация по заинтересованным сторонам проекта представлена в таблице 8.

Таблица 8 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидания заинтересованных сторон
Научное сообщество (лаборатории, научно-исследовательские институты, занимающиеся фундаментальными и прикладными исследованиями в области неразрушающего контроля и диагностики)	Результаты фундаментальных исследований, полученных при выполнении работы. Усовершенствование существующих методов.
Предприятия, занимающиеся транспортировкой газа, нефти и нефтепродуктов.	Появление на рынке недорогой системы для быстрого и точного обнаружения зон высокого остаточного напряжения
Нефтехимические и другие промышленные предприятия	Появление на рынке доступной и надежной системы для контроля остаточных напряжений.

Заинтересованными сторонами проекта являются лица или организации, интересы которых могут быть прямо или косвенно могут быть затронуты в ходе исполнения и/или завершения проекта.

В таблице 9 предоставлена информация по иерархии целей проекта в критериях достижения целей, включая цели в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Таблица 9 – Цели и результат проекта

Цели проекта	Выяснение зависимости между остаточным механическим напряжением и собственным магнитным полем рассеяния
Ожидаемые результаты проекта	Углубленное понимание процессов приводящих к появлению остаточных напряжений
	Выявление причин приводящих к перераспределению магнитных полей рассеяния изделия
	Улучшение методики магнитной памяти металла для контроля остаточных механических напряжений в сварных соединениях
Требования к результату проекта	Полученные данные должны точно отражать распределение остаточных механических напряжений в сварных соединениях
	Полученные данные о собственном магнитном поля рассеяния изделия должны иметь достаточное разрешения для последующего анализа и корреляции

4.2.2 Ограничения и допущения проекта

Ограничивающими проект факторами могут являться степени свободы участников проекта, а так же «границы проекта» - параметры, которые не будут реализованных в рамках данного исследования.

Таблица 10 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения / допущения
Источник финансирования	Федеральный институт исследования и тестирования материалов (Берлин, Гнрмания)
Сроки проекта	1.06.2015 – 01.01.2016 гг.
Дата утверждения плана управления проектом	01.06.2015
Дата завершения проекта	01.01.2016

4.3 Планирование управления научно-техническим проектом

4.3.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) представляет собой шаблон, нацеленный на детализацию структуры работ и определение содержания всего проекта. На рисунке 31 представлена иерархическая структура работы по корреляции остаточного механического напряжения и собственного магнитного поля рассеяния в сварных соединениях.

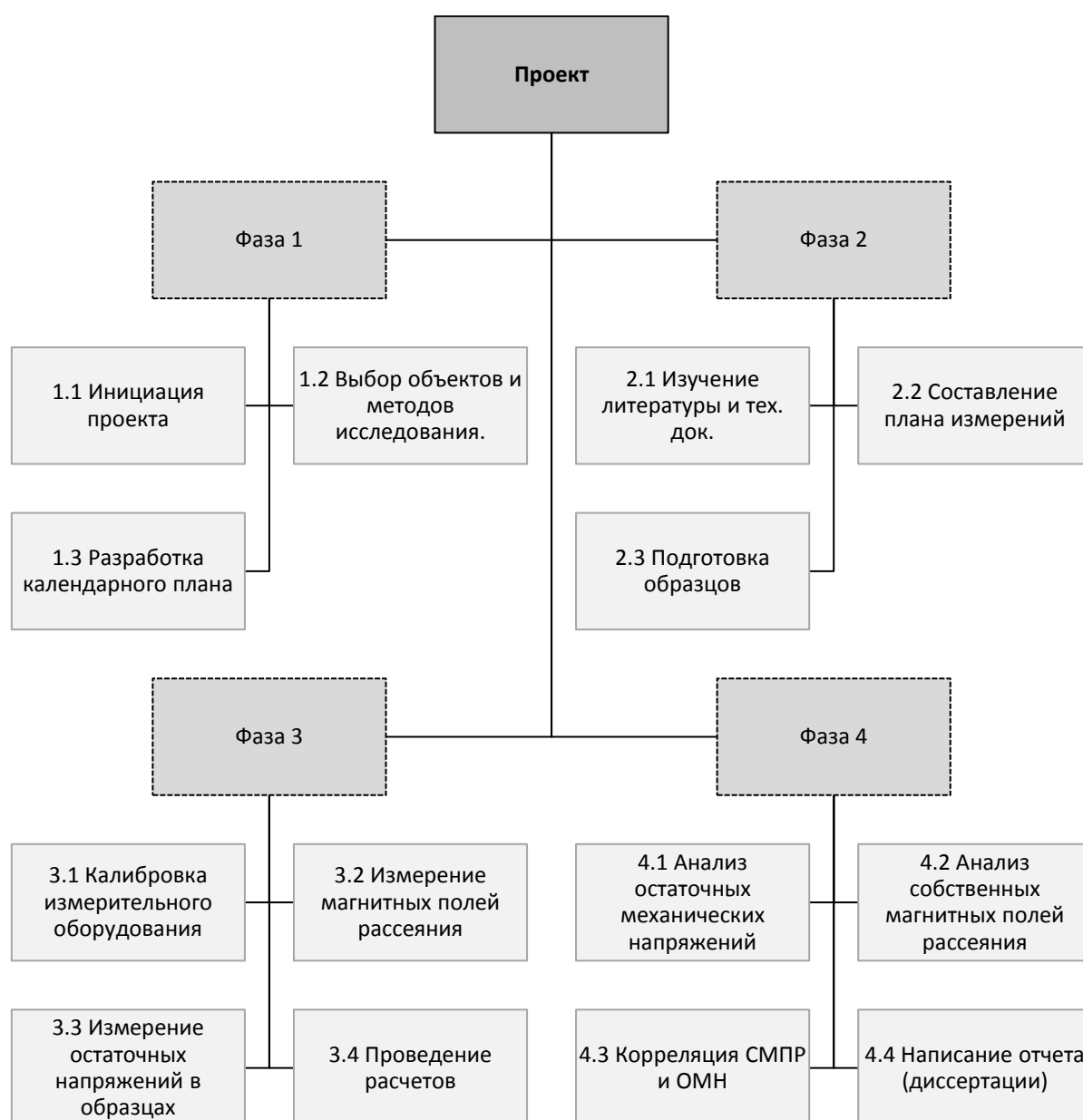


Рисунок 31 – Иерархическая структура работ по научному проекту

4.3.2 Контрольные события проекта

В данном разделе отражены ключевые события проекта, их даты и результаты. Эта информация представлена в таблице 11.

Таблица 11 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Инициация проекта	01.06.15	Техническое задание, календарный план
2	Формирование требований к проекту	14.06.15	Исходные данные к работе
3	Проведение измерений	01.09.15	Данные и расчеты
4	Анализ результатов	01.01.16	Итоги проекта, диссертация

4.3.3 План проекта

В рамках планирования научного проекта был составлен линейный график, представленный в виде таблицы (табл. 12), позволяющий эффективно и своевременно выполнять запланированный объем работ.

Для наиболее наглядного представления была построена диаграмма Ганта - тип столбчатых диаграмм (гистограмм), который используется для иллюстрации календарного плана проекта, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Диаграмма представлена в таблице 13.

Таблица 12 – Календарный план проекта

Код работы (из ИСР)	Название	Длитель- ность, дн.	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников (ФИО ответственных исполнителей)
1.1	Инициация и обсуждение проекта	5	01.06.15	05.06.15	Д. Бруно С. Кабеза Р. Штегеманн В. Лямкин
1.2	Выбор объектов и методов исследования.	5	08.06.15	12.06.15	С. Кабеза Р. Штегеманн В. Лямкин
1.3	Разработка календарного плана	3	15.06.15	17.06.15	С. Кабеза Р. Штегеманн В. Лямкин
2.1	Анализ литературы	45	18.06.15	01.08.15	В. Лямкин
2.2	Составление плана измерений	3	01.08.15	03.08.15	С. Кабеза В. Лямкин
2.3	Подготовка образцов	7	03.08.15	10.08.15	Р. Штегеманн В. Лямкин
3.1	Калибровка измерительного оборудования	3	03.08.15	05.08.15	В. Лямкин
3.2	Измерение магнитных полей рассеяния	21	05.08.15	25.08.15	Р. Штегеманн В. Лямкин
3.3	Измерение остаточных напряжений в образцах	11	25.08.15	04.09.15	С. Кабеза Р. Штегеманн В. Лямкин
3.4	Проведение расчетов	27	05.09.15	01.10.15	В. Лямкин
4.1	Анализ остаточных механических напряжений	10	01.10.15	10.10.15	В. Лямкин
4.2	Анализ собственных магнитных полей рассеяния	11	10.10.15	20.10.15	В. Лямкин
4.3	Корреляция СМПР и ОМН	13	20.10.15	01.11.15	В. Лямкин
4.3	Написание отчета (диссертации)	62	01.11.15	01.01.16	В. Лямкин
Итого		226			

Таблица 13 - Календарный план-график проведения НИОКР

Код работы (из ИСР)	Вид работы	Исполнители	Т _к кал. дн.	Продолжительность выполнения работ																							
				июнь			июль			август			сентябрь			октябрь			ноябрь			декабрь			январь		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1.1	Инициация и обсуждение проекта	Р, М	5																								
1.2	Выбор объектов и методов исследования.	Р, М	5																								
1.3	Разработка календарного плана	Р, М	3																								
2.1	Анализ литературы	М	45																								
2.2	Составление плана измерений	Р, М	3																								
2.3	Подготовка образцов	Р, М	7																								
3.1	Калибровка измерительного оборудования	М	3																								
3.2	Измерение магнитных полей рассеяния	М	21																								
3.3	Измерение остаточных напряжений в образцах	Р, М	11																								
3.4	Проведение расчетов	М	27																								
4.1	Анализ остаточных механических напряжений	М	10																								
4.2	Анализ СМНР	М	11																								
4.3	Корреляция СМНР и ОМН	М	13																								
4.3	Написание отчета (диссертации)	М	62																								
	Общее количество календарных дней		226																								



Руководитель проекта



Исполнитель (магистрант)

4.3.4 Основная заработная плата

В настоящую статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, рабочих макетных мастерских и опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме.

Стандартной заработной платой для научного сотрудника в как в Федеральном институте исследования и тестирования материалов, так и в Германии в целом является зарплата, уровня E13. Согласно ресурсу «oeffentlicher-dienst.info», на 2016 год расчет заработной платы производится исходя из отчислений, приведённых в таблице 14.

Таблица 14 – Зарплата научного сотрудника BAM по TVöD E13

Основная заработная плата, евро	3587.82	
Подходный налог	602,83	Класс I
Налог солидарности	33,15	-
Медицинское страхование	305,80	15.5%
Страхование от беспомощности	53,14	-
Пенсионные отчисления	348,69	-
Страхование по безработице	55,94	-
Надбавка к пенсии	50,38	6.45%
Сумма отчислений	1449,93	40.6%
Остаток	2123.43	

4.3.5 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информация по этим рискам сведена в таблицу 15.

Таблица 15 – Реестр Рисков

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления	Влияние риска	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Неверная гипотеза взаимодействия СМПР и процесса электродуговой сварки	Получение неверного результата	средняя	высокое	высокий	Проведение дополнительных консультаций	Недостаток информации
2	Ошибочные измерения собственного магнитного поля рассеяния	Получение неточного результата	низкая	среднее	средний	Калибровка оборудования	Работа на неоткалиброванном оборудовании
3	Ошибочные измерения остаточных механических напряжений	Получение неточного результата	низкая	высокое	высокий	Проверка изначальных данных	Задание неверных параметров при измерении
4	Ошибка в расчетах корреляции СМПР и ОМН	Получение неверного результата	средняя	высокое	высокий	Повторная проверка вычислений	Человеческий фактор

Глава 5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ

При проведении исследования необходимо учитывать социальные, правовые, культурные и экологические аспекты. Не менее важными являются вопросы охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности. Исследователь должен нести социальную ответственность за принятые решения.

В данном разделе приведены результаты анализа рабочего места оператора ПК, на предмет выявления вредных и опасных факторов (ВОПФ), источников загрязнения окружающей среды и возможных чрезвычайных ситуаций. Были идентифицированы и оценены воздействия вредных и опасных факторов в процессе производственной деятельности на работника, общество и природную среду. Предложены мероприятия по снижению их воздействий и защиты от них.

Основу раздела составляют материалы по вопросам охраны труда, а также окружающей среды и обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях.

5.1 Производственная безопасность

Данная научно-исследовательская работа была выполнена с использованием персонального компьютера (ПК) и оргтехники (принтер, копировальный аппарат). Исходя из характера работы и используемого в процессе исследовательской деятельности оборудования в подразделе «Производственная безопасность» будет рассматриваться рабочее место оператора ПК.

Операции, проводимые при помощи ПК, включали расчет остаточного механического напряжения в ПО Origin, а так же написание алгоритма обработки двумерного массива данных для анализа собственного магнитного поля рассеяния в ПО MatLAB.

5.1.1 Идентификация, оценка и анализ опасных и вредных факторов на рабочем операторе ПК

Согласно ГОСТ 12.0.003–74 ССБТ. «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [24], «Руководство, по гигиенической оценке, факторов рабочей среды и трудового процесса» Р2.2.2006-05 [25], а так же СанПиН 2.2.2/ 2.4.1340 «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы» [26] наибольшую угрозу здоровью операторов ПК представляют вредные факторы на рабочем месте, представленные ниже в Таблице 16.

Таблица 16 – Перечень вредных и опасных факторов на рабочем месте оператора ПК

Наименование рабочих зон	Перечень оборудования и материалов на рабочем месте (источники ВОПФ)	Вредные и опасные факторы на рабочем месте	Предельно-допустимые значения в соответствии с НД
Перечень вредных факторов на рабочем месте оператора ПК			
Офис 235. Корпус №60 Федерального института исследования и тестирования материалов (Берлин, Германия).	Персональный компьютер	Недостаточный уровень освещения	Освещенность рабочей поверхности (Е) должна составлять не менее 300-500 лк на поверхность стола и не менее 300 лк на поверхности экрана [26].
		Повышенный уровень пульсации освещенности	Коэффициент пульсации освещенности (K_n) не должен превышать 5% [26].
		Повышенная яркость светящихся поверхностей (окна, светильники и др.)	Яркость бликов на экране должна составлять не более 40 кд/м ² [26].

		Пониженный уровень влажности воздуха	Относительная влажность воздуха должна находиться в пределах: – холодный период (категория работ Ia): 15-75%; – теплый период (категория работ Ia): 15-75% (в соответствии СанПиН 2.2.4.548-96 [27].
		Повышенная температура воздуха	Температура воздуха должна находиться в пределах: – холодный период (категория работ Ia): 22-24°C; – теплый период (категория работ Ia): 20-25°C (в соответствии СанПиН 2.2.4.548-96 [27].
		Повышенный уровень ЭМП	Напряженность ЭМ поля рабочей зоны не должна превышать: – в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц – 25 В/м; – в диапазоне от 2 кГц до 400 кГц – 2,5 В/м. Плотность магнитного потока не должна превышать: – в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц – 250 нТл; – в диапазоне от 2 кГц до 400 кГц – 25 нТл [26].
		Напряженность электростатического поля	Уровень ЭСП не должен превышать 20 кВ/м [26].
		Повышенный уровень шума	Уровень шума не должен превышать 50 дБА [26].
		Нарушение норм аэроионного состава воздуха	Концентрация аэроионов положительной полярности (p^+) должна находиться в диапазоне от 400 до 50000 ион/см ³ , аэроионов отрицательной полярности (p^-): от 600 до 50000 ион/см ³ (в соответствии СанПиН 2.2.4.1294-03 [28].

		Напряженность труда: – Длительность сосредоточенного наблюдения. – Плотность сигналов в среднем. – Визуальный контроль видеотерминалов при их графическом типе отображения.	Не должна превышать 26-50% времени смены Не должна превышать 76-175 сигналов за 1 час работы. Не должно превышать 5 часов в смену [27].
		Тяжесть труда: – локальная нагрузка (с участием мышц кистей и пальцев рук).	Не более 40 000 движений за смену [27].
Перечень опасных факторов на рабочем месте оператора ПК			
	Все узлы персонального компьютера и подключенное к нему периферийное оборудование. Корпус системного блока и внешних устройств.	Электро- безопасность	"Правила устройства электроустановок" (ПУЭ) [29], ГОСТ ССБТ 12.1.038-82 [30] , ГОСТ ССБТ 12.1.030-81 [31].
	Все узлы персонального компьютера и подключенное к нему периферийное оборудование. Корпус системного блока и внешних устройств. Горючие материалы (бумага).	Пожарная безопасность	ГОСТ ССБТ 12.1.010-76 [32], ГОСТ ССБТ 12.1.004–91 [33],

5.1.2 Анализ вредных и опасных производственных факторов и перечень рекомендуемых мероприятий по улучшению условий труда

Освещенность

Освещение является важным фактором для производственных условий работы, так как через зрительный аппарат человек получает порядка 90 % информации. От освещения зависят такие факторы, как утомление, производительность труда и безопасность. Достаточное освещение способствует улучшению протекания основных процессов нервной деятельности, стимулирует обменные и иммунобиологические процессы, оказывает положительное влияние на суточный ритм физиологических функций организма человека. Наблюдения показывают, что за счет улучшения освещения на рабочих местах достигается прирост производительности труда от 1,5 до 15%. Человек способен воспринимать диапазон электромагнитного излучения от 380 до 770 нм, т.е. от ультрафиолетовых до инфракрасных излучений.

Для обеспечения нормативных уровней освещенности в большинстве требуют следующих необходимо:

- установка дополнительного количества светильников;
- установка более мощных ламп;
- установка дополнительного светильника для местного освещения рабочей поверхности;
- использование более эффективных ламп.

Пульсации светового потока, порой сопровождающие люминесцентные лампы, приводят к ухудшению функционального состояния центральной нервной системы, оказывают негативное влияние на нервные элементы коры головного мозга и на фоторецепторные элементы сетчатки.

Существует несколько способов ограничить глубину пульсации освещенности:

- поочерёдное присоединение соседних светильников в ряду (реже соседних рядов) к разным фазам сети;
- включение ламп в светильниках с люминесцентными лампами по схемам, с питанием части ламп отстающим, а части ламп опережающим током;
- установка в одной точке двух или трех светильников разных фаз (лампы таких типов, как ДРЛ и ДРИ);
- питание различных ламп в многоламповых люминесцентных светильниках от разных фаз;
- высокочастотное питание источников света.

В таблице 17 приведены нормативные значения освещенности в горизонтальной плоскости, согласно СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение».

Таблица 17 – Нормативы искусственного освещения

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Освещенность, лк		
				при системе комбинированного освещения		при системе общего освещения
				всего	в том числе от общего	
Высокой точности	От 0,30 до 0,50	Малый	Темный	2000 1500	200 200	500 400
		Малый Средний	Средний Темный	1000 750	200 200	300 200
		Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	750 600	200 200	300 200
		Средний Большой «	Светлый « Средний	400	200	200
Средней точности	Св. 0,5 до 1,0	Малый	Темный	750	200	300
		Малый Средний	Средний Темный	500	200	200
		Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	400	200	200
		Средний Большой «	Светлый « Средний	-	-	200
Малой точности	Св. 1 до 5	Малый	Темный	400	200	300
		Малый Средний	Средний Темный	-	-	200
		Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	-	-	200
		Средний Большой «	Светлый « Средний	-	-	200

Микроклимат

При работе любого оборудования выделяется определенное количество тепла, зависящее от потребляемой мощности. При работе ЭВМ повышается температура в помещении и понижается влажность воздуха, из-за значительной потребляемой мощности. При работе ЭВМ, образующийся теплый воздух выгоняется из системного блока специальными вентиляторами. Это приводит к дополнительной циркуляции воздуха в помещении, что сказывается на вышеперечисленных факторах.

Большое влияние на состояние человеческого организма оказывают метеорологические условия в производственных помещениях. Так, влажность, температура, и скорость перемещения воздуха влияют на теплообмен между окружающей средой и телом человека. Там где используются персональные компьютеры, формируются определенные условия окружающей среды – микроклимата. При низкой влажности воздуха, возможна адсорбция частиц пыли из за появления электростатического заряда на частицах пыли, что способствуют развитию аллергических заболеваний. Для того чтобы поддержать нормальную температуру и относительную влажность в помещении, его необходимо регулярно проветривать, а так же в помещении желательно наличие систем кондиционирования и ионизации воздуха. Не менее важной является проведение влажной уборки. Для повышения влажности воздуха могут использоваться увлажнители.

Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений представлены в таблице 18, согласно СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений». Допустимые микроклиматические условия установлены по критериям допустимого теплового и функционального состояния человека на период 8-часовой рабочей смены. Они не вызывают повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта,

напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности.

Таблица 18 – Оптимальные величины показателей микроклимата

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхности, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	22 - 24	21 - 25	60 - 40	0,1
	Iб (140 - 174)	21 - 23	20 - 24	60 - 40	0,1
	IIa (175 - 232)	19 - 21	18 - 22	60 - 40	0,2
	IIб (233 - 290)	17 - 19	16 - 20	60 - 40	0,2
	III (более 290)	16 - 18	15 - 19	60 - 40	0,3
Теплый	Ia (до 139)	23 - 25	22 - 26	60 - 40	0,1
	Iб (140 - 174)	22 - 24	21 - 25	60 - 40	0,1
	IIa (175 - 232)	20 - 22	19 - 23	60 - 40	0,2
	IIб (233 - 290)	19 - 21	18 - 22	60 - 40	0,2
	III (более 290)	18 - 20	17 - 21	60 - 40	0,3

Электромагнитные поля (ЭМП)

Организм человека является чувствительным к воздействию электромагнитных полей. Подобное воздействие ведет к изменениям в деятельности центральной нервной системы, возможны нарушения сна, головные боли, повышенная утомленность и раздражительность. Отмечаются так же и изменения в деятельности сердечнососудистой системы. Они проявляются в брадикардии, гипотонии и изменениях состава крови. Все вышеперечисленные изменения приобретают ярко выраженный характер с увеличением частоты излучения. Функциональные изменения в организме под действием электромагнитных волн способны накапливаться, но если исключить воздействие излучения или улучшить условия труда, возможно, обратить данные последствия.

Существует несколько способов уменьшения напряженности электрических и магнитных полей электрической и магнитной составляющих и плотности потока энергии:

1) уменьшение силы тока в проводнике или антенне (уменьшение мощности излучения);

2) защита расстоянием – увеличение расстояния между излучающим устройством и защищаемым объектом;

3) уменьшить E , H и мощность поля «защитой временем».

За счет правильного выбора ориентации вилки питания системного блока и монитора в сетевой розетке, электрические поля ПК могут быть существенно снижены. Для того чтобы установить оптимальное положение вилки питания в розетке необходимо воспользоваться инструментальным контролем уровней полей на рабочих местах. Возможность изменения полярности включения в розетку сетевой вилки питания системного блока и дисплея ПК, а так же маркировка фазного и нулевого проводов позволяет облегчить данную операцию.

Система заземления является важной частью организации электропитания рабочего места. Ее отсутствие приводит к увеличению электромагнитных излучений ПК в несколько раз. Каучук, поролон, поглотители на полиуретановой основе, пенокерамические материалы являются хорошими поглотителями полей электромагнитных излучений.

Электростатические поля (ЭСП)

Из-за трения, на поверхности клавиатуры способны образовываться электростатические заряды, приводящие к появлению слабого электростатического поля. ЦНС и сердечнососудистая система человека наиболее чувствительна к подобному воздействию. Если имеет место пребывание человека в условиях с напряженностью ЭСП имеет более 5 кВ/м в течении длительного периода времени, возможно нарушение суточного биоритма, снижение адаптационных резервов организма, а так же нервно-эмоциональное напряжение, снижение работоспособности.

Наиболее эффективными методами по защите от ЭСП является заземление оборудования и поддержание оптимальной (60-40%) влажности в помещении.

Шум

Воздействие в течение продолжительного времени способно снизить остроту слуха и зрения, а так же привести к утомлению центральной нервной системы. В результате чего возможно ослабление внимания и снижение производительность труда. Если уровень шума не удовлетворяет техническим нормам, проводят следующие мероприятия согласно ГОСТ 12.1.029 [41]:

- изменение расположение оборудования;
- ослабление шума источников (возможно применение звукоизолирующих экранов).

Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах для трудовой деятельности разных категорий тяжести и напряженности (в дБА) представлены в таблице 19, согласно СН 2.2.4/2.1.8.562-96 "Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки".

Таблица 19 – Предельно допустимые уровни звука в дБА

Категория напряженности трудового процесса	Категория тяжести трудового процесса				
	легкая физическая нагрузка	средняя физическая нагрузка	тяжелый труд 1 степени	тяжелый труд 2 степени	тяжелый труд 3 степени
Напряженность легкой степени	80	80	75	75	75
Напряженность средней степени	70	70	65	65	65
Напряженный труд 1 степени	60	60	-	-	-
Напряженный труд 2 степени	50	50	-	-	-

Аэроионный состав воздуха

В рабочих помещениях необходимо соблюдение поддержание достаточного количества кислорода, а так же низкий уровень загрязнения воздуха. Помимо этого, недостаток отрицательных аэроионов может ослабить иммунную систему, в результате возможно учащение заболеваний дыхательных путей. Отрицательные аэроионы уменьшают загрязненность воздуха пылью, дымом, газами и микроорганизмами, а так же снижают накопление и образование электростатических зарядов.

Аэроионный состав воздуха может быть нормализован применять прошедшие санитарно-эпидемиологическую оценку и имеющие действующее санитарно-эпидемиологическое заключение аэроионизаторы, предназначенные для использования в санитарно-гигиенических целях.

Оператор подвергается воздействию ионизирующего излучения в процессе работы, находясь в непосредственной близости от монитора. При соблюдении требуемого расстояния между источником ионизирующих излучений и работающим воздействие ионизирующего излучения на организм можно свести к минимуму.

Напряженность труда

Значительное умственное напряжение, а так же другие психоэмоциональные нагрузки способны привести к изменению состояния центральной нервной системы и нервно-мышечного аппарата.

Для 8-ми часовой смены регламентированные перерывы следует устанавливать:

- для II категории работ группа В (творческая работа в режиме диалога с ЭВМ) через 2 часа от начала смены и через 1,5–2 часа после обеда продолжительностью 15 мин. каждый или по 10 минут через каждый час работы [35].

Тяжесть труда

Отличительным признаком оператора ПК является выполнение множества мелких высокодифференцированных движений пальцами рук. При выполнении подобных движений в динамике смены, в нервно-мышечном аппарате рук может развиваться функциональная недостаточность. Субъективно это состояние оценивается как чувство усталости в руках. Длительное выполнение подобной работы может приводить к утомлению,

перенапряжению нервно-мышечного аппарата и явиться причиной возникновения профессиональной патологии.

Для сохранения высокой работоспособности и предотвращения профессионального заболевания, целесообразно выполнять комплекс упражнений для снятия накопившегося напряжения и расслабления пальцев, ладоней и рук. Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 10–30 см от края, обращенного к пользователю, или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы. Рекомендуется оснащать клавиатуру дополнительной опорной планкой, (см. рисунок 32 [34]).



Рисунок 32 – Правильные положения запястья и кисти руки при работе на клавиатуре

Электробезопасность

В соответствие с ПУЭ («Правила устройства электроустановок») помещение, оснащенное средствами вычислительной техники, является помещением с повышенной опасностью поражением электрическим током, так как существуют условия для одновременного прикосновения к металлическим корпусам электрооборудования с заземленными частями или конструкциям здания и оборудования.

Напряжение в электрических цепях питания и управления ПК, является достаточным для электротравмы оператора при отсутствии заземления или зануления оборудования (источник - переменный ток промышленной частоты 50 Гц напряжением 220 В, служащий для питания ПК, а также токи высокой частоты напряжением до 12 000 В систем питания отдельных схем и узлов дисплея) [34].

Корпуса электропотребляющих установок должны быть заземлены (занулены). Запрещается использовать в качестве контура заземления паропроводные, водопроводные, газовые, отопительные и другие трубы, радиаторы и т.п. Питающие электрические кабели должны иметь ненарушенную изоляцию и сечение, соответствующее передаваемой мощности.

Пожарная безопасность

Требования к пожарной безопасности установлены ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ «Пожарная безопасность. Общие требования» [33]. Помещение где проводилась научно-исследовательская работа относится к категории В (горючие и трудно горючие вещества и материалы). Пожарная нагрузка в аудитории представлена мебелью, оборудованием, канцелярскими принадлежностями из сгораемых материалов.

Пожарная безопасность обеспечена системой пожарной защиты. Планы эвакуации, а так же инструкции по действию персонала, регламентирующие действия персонала в случае возникновения очага возгорания и указывающие места расположения пожарной техники, размещены в общедоступных местах. Помещение оборудовано первичными средствами пожаротушения, такими как универсальные пенные огнетушители.

Место оператора в эргономической системе

Работа с компьютером характеризуется значительным умственным напряжением и нервно-эмоциональной нагрузкой операторов, высокой напряженностью зрительной работы и достаточно большой нагрузкой на мышцы рук при работе с клавиатурой ЭВМ. Большое значение имеет рациональная конструкция и расположение элементов рабочего места, что важно для поддержания оптимальной рабочей позы человека-оператора.

Высота рабочей поверхности стола должна быть в пределах 68–85 см; оптимальная высота рабочей поверхности стола – 72,5 см. Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение оборудования и

оргтехники с учетом их конструктивных особенностей (размер ПК, клавиатуры, пюпитра и др.) и характера выполняемой работы. Высота рабочей поверхности стола должна быть в пределах 68–85 см; оптимальная высота рабочей поверхности стола – 72,5 см. Дисплей в зависимости от размеров алфавитно-цифровых знаков должен находиться от глаз пользователя на оптимальном расстоянии 60–70 см, но не ближе 50 (см. рисунок 33).

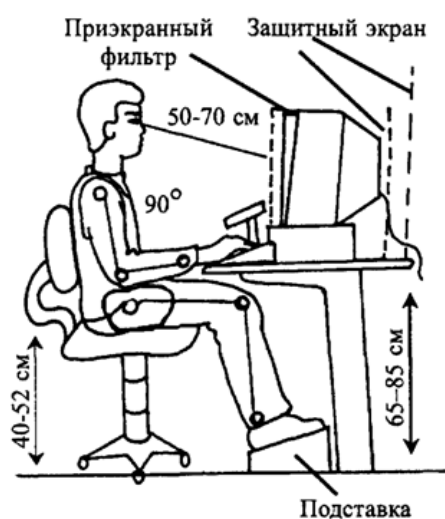


Рисунок 33 – Рекомендации по рабочей позе оператора

5.2 Экологическая безопасность

Раздел «Охрана окружающей среды» разрабатывался в соответствии с требованиями СНиП 11-01-95 «По разработке раздела проектной документации» [35]. При выполнении проектных работ, эксплуатации оборудования действующим природоохранным законодательством предусмотрены мероприятия по охране окружающей среды. При этом были проанализированы возможные источники вредных воздействий техногенной деятельности при разработке и реализации ВКР на различные природные среды окружающей среды (литосферу и гидросферу).

5.2.1 Анализ осуществляемой производственной деятельности и выявления источников вредного воздействия на окружающую среду

В результате анализа осуществляемой в процессе выполнения научно-исследовательской деятельности в корпусе №60 были выявлены следующие вредные воздействия на окружающую среду:

Макулатура. Большую долю в образовавшихся твердых бытовых отходах составляет макулатура, в основном это картонная, упаковочная бумага, отходы печатной продукции, отходы бумаги [36]. Относится к 5-му классу – практически неопасные. Степень воздействия – очень низкая, экологическая система и ее компоненты не нарушаются. Собирается в специальный контейнер для последующей переработки.

Ртутные люминесцентные лампы. Относятся к I-му классу опасности для окружающей среды и подлежат обязательному обезвреживанию. Отработанные лампы передаются специальному персоналу для последующей утилизации.

Запчасти компьютеров и вышедшие из эксплуатации ПК. Вышедшие из строя компоненты компьютерной техники, а так же принтеров и другой оргтехники не подлежат общей утилизации. Подобная техника собирается в специально отведённом месте, после чего будет доставлена в BSR Recyclinghof – компанию занимающуюся переработкой отходов в Берлине.

Бытовые сточные воды. Водоснабжение осуществляется от городского водопровода. Негативное воздействие на водные ресурсы возможно при загрязнении сточных вод. Сброс сточных вод из корпуса, в котором расположена аудитория, производится в городскую канализацию.

Выбросы вредных веществ при работе с ПК в атмосферу невелики и не требует каких-либо мероприятий в отношении воздействия на окружающую среду.

Негативное воздействие на растительный и животный мир в процессе производственной деятельности не выявлено.

5.2.2 Перечень рекомендуемых мероприятий по сокращению негативного воздействия на окружающую среду

Макулатура может быть переработана, либо использована как вторсырье предприятиями для производства теплоизоляционных материалов, бугорчатых прокладок, материалов строительного назначения и т.д. Для переработки ртутных ламп необходимо вовлечение во вторичный оборот стеклобоя цветных металлов, получаемых при переработке ртутных ламп [36]. Должно быть организовано сотрудничество с предприятиями, частными предпринимателями и организациями, которые могут быть заинтересованы в таких видах сырья.

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В данном разделе приводится краткий анализ возможных чрезвычайных ситуаций (ЧС) в зоне выполнения работ (природного, техногенного или военного характера). Из рассмотренных ЧС выбираются наиболее вероятные с подробным описанием одного.

К возможным чрезвычайным ситуации относится:

- 1) Техногенный характер:
 - неисправности в системе электроснабжения;
 - пожар;
 - обрушение здания;
 - разгерметизация трубопроводов водо- газоснабжения, отопления.
- 2) Природный характер:
 - землетрясение.
- 3) Социальный характер:
 - теракт.
- 4) Экологический характер:
 - превышение ПДК вредных примесей в атмосфере.

В данном разделе было решено подробно рассмотреть ЧС социального характера и разработать перечень рекомендуемых действий при захвате заложников.

Действия при захвате заложников

В случае если в силу определенных обстоятельств вы стали заложником на рабочем месте, то необходимо выполнять следующие действия:

- не допускать действий, которые могут спровоцировать нападающих к применению оружия и привести к человеческим жертвам;
- выполнять требования преступников, если это не связано с причинением ущерба жизни и здоровью людей. Не противоречить преступникам, не рисковать своей собственной жизнью и жизнью окружающих;
- если имеется возможность, без ущерба жизни и здоровью заложников, передать информацию о количестве преступников, их вооружении и экипировке, особенностях поведения и манеры ведения разговора и т.д. в правоохранительные органы.

Если будет проводиться операция по освобождению заложников силовым методом, то необходимо создать максимум условий правоохранительным органам своим поведением для успешного ее проведения (лечь на пол, лицом вниз или сесть у стены и т.д.) [37].

5.4 Расчет воздухообмена для удаления избыточного тепла

Для предотвращения неблагоприятного воздействия на работающих в рабочих помещениях вредных факторов, а именно: повышенной (или пониженной) температуры, повышенной относительной влажности следует предусматривать системы вентиляции и кондиционирования воздуха.

Устройство, содержание и эксплуатация систем должны соответствовать требованиям:

– СНиП 2.04.05-91 "Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха" [38];

– ГОСТ 12.4.021-75 "ССБТ. Системы вентиляционные. Общие требования"[39].

Вентиляция и кондиционирование воздуха должны обеспечивать соответственно допустимые и оптимальные нормы микроклиматических параметров на рабочих местах, оснащенных ПК.

Расчет воздухообмена следует проводить по теплоизбыткам от машин, людей, солнечной радиации и искусственного освещения [40].

В производственных помещениях объемом до 20 кубометров на одного работающего при отсутствии загрязнения воздуха производственными вредностями вентиляция должна обеспечивать подачу наружного воздуха в количестве не менее 30 куб.м/час на одного работника, а в помещениях объемом 20–40 кубометров на одного работающего – не менее 20 куб.м/час. Во всех указанных случаях при этом должны быть выдержаны нормы по влажности и температуре и воздуха.

Аудитория №235, корпуса №60, где располагалось рабочее место исследователя, имеет площадь 18 м² и объем 63 м³.

Таблица 20 – Характеристики помещения

Ширина	4,5 м.
Длина	4 м.
Высота потолка	3,5 м.
Площадь помещения	18 м ²
Объём помещения	63 м ³
Количество рабочих	3 чел.
Объём каждого работающего	21 м ³

Санитарными нормами установлено, что объем производственных помещений на одного работающего должен составлять не менее 15 м^3 , а площадь помещения – не менее 4.5 м^2 . Учитывая вышеприведенные требования рассчитаем допустимое количество одновременно работающих человек:

$$\text{а) } N < 18 / 4.5 = 4$$

$$\text{б) } N < 63 / 15 = 4,2$$

Для выполнения указанных требований в данном помещении могут работать не более четырех человек.

Исходные данные для расчета:

1. Норма температуры в рабочей зоне для помещений, характеризуемых избытком [$>23 \text{ Вт/м}^3$] теплоты для легкой работы $t = 20\text{--}22 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Объем помещения: 63 м^3 .

3. Количество аппаратуры и выделяемая ей мощность:

– монитор Samsung S22D300HY - $K_1=3$ шт. – $W_1=120 \text{ Вт}$;

– ЭВМ IBM PC - $K_2=3$ шт. – $W_2=300 \text{ Вт}$.

4. Количество работающих: $n = 3$.

При расчете необходимо исходить из требований санитарно-профилактических норм, предъявляемых к помещениям типа дисплейного класса.

Для одного человека необходимо $L'=20 \text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха. Для удаления тепла выделенного аппаратурой тоже необходим воздухообмен.

Исходя из количества работающих, необходим следующий воздухообмен

$$L_1 = n \times L' \quad (20)$$

$$L_1 = 3 \times 20 = 60 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$L_2 = Q_{\text{я}} / \gamma_{\text{в}} \times c (t_{\text{вых}} - t_{\text{пр}}), \quad (21)$$

где $Q_{\text{я}}$ – явно выделяемое тепло в помещении в Дж/ч ;

$\gamma_{\text{в}} = 1.206 \text{ кг/м}^3$ – удельная масса приточного воздуха;

c – теплоемкость воздуха – $1 \text{ кДж/кг } K = 0,24 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$;

$t_{\text{вых}}$ – температура воздуха, уходящего из помещения;

$t_{\text{пр}}$ – температура воздуха, подаваемого в помещение.

$t_{\text{вых}}$ обычно определяется по следующей формуле:

$$t_{\text{вых}} = t_{\text{рз}} + t(H-L), \quad (22)$$

где $t_{\text{рз}}$ – температура в рабочей зоне;

H – высота от пола до центра вытяжного отверстия;

t – температурный градиент ($0,5 - 1,5 \text{ } ^\circ\text{C/м}$);

L – высота от пола до рабочей зоны.

Определяем количество тепла, выделяемого оборудованием:

$$Q_{\text{об}} = 860 \times P_{\text{об}} \times Y_1, \text{ ккал/ч} \quad (23)$$

где: Y_1 – коэффициент перехода тепла в помещение, зависящий от вида оборудования;

$P_{\text{об}}$, кВт – мощность, потребляемая оборудованием;

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном}} \times Y_2 \times Y_3 \times Y_4, \text{ кВт} \quad (24)$$

где: $P_{\text{ном}}$, кВт – номинальная (установленная) мощность электрооборудования помещения;

Y_2 – коэффициент использования установленной мощности, учитывающий превышение номинальной мощности над фактически необходимой;

Y_3 – коэффициент загрузки, т.е. отношение величины среднего потребления мощности (во времени) к максимально необходимой;

Y_4 – коэффициент одновременности работы оборудования.

При ориентировочных расчетах произведение всех четырех коэффициентов можно принимать равным:

$$Y_1 \times Y_2 \times Y_3 \times Y_4 = 0,25$$

$$Q_{\text{об}} = 860((0,3 \times 0,25)^3 + (0,12 \times 0,25)^3) = 270,9 \text{ ккал/ч} = 1134,2 \text{ кДж/ч}.$$

Избыточное тепло, выделяемое системой освещения:

$$Q_{\text{осв}} = 860 \times P_{\text{осв}} \times \alpha \times b \times \cos(\varphi), \text{ ккал/ч} \quad (25)$$

где : α – коэф. перевода электрической энергии в тепловую,

для ламп накаливания $\alpha = 0,92-0,97$,

для люминесцентных ламп $\alpha = 0,46-0,48$;

b – коэффициент одновременности работы (при работе всех светильников $b = 1$);

$\cos(\varphi) = 0,7-0,8$ – коэффициент мощности;

$P_{\text{осв}}$, кВт – мощность осветительной установки.

$$Q_{\text{осв}} = 860 \times 0,05 \times 0,47 \times 1 \times 0,8 = 16,17 \text{ ккал/ч} = 67,7 \text{ кДж/ч}$$

Избыточное тепло выделяемое людьми:

$$Q_{\text{л}} = N \times q_{\text{л}}, \text{ ккал/ч} \quad (26)$$

где : N – количество людей в помещении

$q_{\text{л}}$, ккал/ч – тепловыделения одного человека

$$Q_{\text{л}} = 3 \text{ чел} \times 60 \text{ ккал/ч} = 180 \text{ ккал/ч} = 753,6 \text{ кДж/ч}$$

Избыточное тепло, вносимое за счет солнечной радиации

$$Q_{\text{р}} = m \times S \times q_{\text{ост}}, \text{ ккал/ч} \quad (27)$$

где : m – количество окон ($m = 1$);

S , м² – площадь одного окна ($S = 2,5 \text{ м}^2$);

$q_{\text{ост}}$, ккал/ч – солнечная радиация через остекленную поверхность ($q_{\text{ост}} = 65 \text{ ккал/ч}$).

$$Q_{\text{р}} = 1 \times 2,5 \times 65 = 162 \text{ ккал/ч} = 678,3 \text{ кДж/ч}$$

Теплоотдача, происходящая естественным путем

Для теплого периода года (среднесуточная температура воздуха выше +10 °C) принимаем $Q_{\text{отд}} = 0$.

Определение потребного воздухообмена необходимо определить количество избыточного тепла по формуле:

$$Q_{\text{изб}} = Q_{\text{об}} + Q_{\text{осв}} + Q_{\text{л}} + Q_{\text{р}} - Q_{\text{отд}}, \text{ ккал/ч} \quad (28)$$

где: $Q_{об}$, ккал/ч – тепло, выделяемое оборудованием;

$Q_{осв}$, ккал/ч – тепло, выделяемое системой освещения;

$Q_{л}$, ккал/ч – тепло, выделяемое людьми в помещении;

$Q_{р}$, ккал/ч – тепло, вносимое за счет солнечной радиации;

$Q_{отд}$, ккал/ч – теплоотдача естественным путем.

$$Q_{изб} = 270,9 + 16,17 + 180 + 162 - 0 = 629,07 \text{ ккал/ч} = 2633 \text{ кДж/ч.}$$

Температура удаляемого воздуха:

$$t_{вых} = 22 + 1,5 (2,5 - 1) = 24,25 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Если температура поступающего воздуха $t_{п}=18 \text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда воздухообмен равен:

$$L_2 = 2633 / 1,2 \times 1 \times (24,25 - 18) = 2633 / 7,5 = 351,06 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Кратность воздухообмена определяется по формуле:

$$n = L / V_{п}, \text{ ч}^{-1} \quad (29)$$

где: $V_{п}$ – внутренний объем помещения, м^3 .

$$n = 351,06 / 63 = 5,57 \text{ ч}^{-1} \approx 6$$

Согласно СН 245-71, кратность воздухообмена $n > 10$ недопустима, т.к. n равна 6, то можно считать, что кратность воздухообмена находится в пределах нормы.

Вывод: система воздухообмена обеспечивает собственную производительность $351 \text{ м}^3/\text{ч}$ и кратность воздухообмена равной 6 для поддержания нормального микроклимата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи нейтронной дифракции были получены следующие результаты:

1. Наличие сильного остаточного напряжения после термической обработки (сварки), превышающего предел текучести материала;
2. Преобладает продольное направление деформаций, с максимумом в пределах зоны термического влияния;
3. Поперечное направление является не столь выраженным, с небольшим возрастанием напряжения в зоне сварного шва.

Измерения собственных магнитных полей рассеяния показали:

1. Градиент магнитного поля перпендикулярен преобладающему направлению деформации;
2. Обнаружение зоны термического влияния возможно измерением собственного магнитного поля рассеяния;
3. Множество факторов влияют на полученный результат: геометрия, намагниченность, магнитострикция, температурные трансформации материала, процесс сварки.

Корреляция этих двух методов возможна, но не столь очевидна и нуждается в дальнейшем исследовании. Вероятность возникновения полей рассеяния из-за геометрии изделия является не существенной. Наиболее вероятными гипотезами являются:

- Изменение магнитной проницаемости материала при сварке;
- Намагничивание зоны термического влияния в процессе сварки;
- Эффект обратной магнитострикции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] J. M. D. Coey, *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge University Press, 2010.
- [2] D. Jiles, "Theory of the magnetomechanical effect," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 32, no. 15, pp. 1537–1546, Aug. 1999.
- [3] S. G. H. Staples, "Using Magnetostriction and the Villari Effect to detect Anomalies in Steel Materials List of Figures," *PhD Transf. Rep.*, 2012.
- [4] International Standard, "ISO 24497-1:2007(E) Non-destructive testing - Metal magnetic memory. Part 1: Vocabulary," 2007.
- [5] A. A. Dubov, "Energy Diagnostics - Physical Basis of the Metal Magnetic Memory Method," in *11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014)*, 2014.
- [6] M. Roskosz, "Metal magnetic memory testing of welded joints of ferritic and austenitic steels," *NDT E Int.*, vol. 44, no. 3, pp. 305–310, 2011.
- [7] A. Dubov and S. Kolokolnikov, "Quality assessment of welded joints by the metal magnetic memory method compared to conventional NDT methods and means for materials' properties," *Abstr. 17th World Conf. Non-Destructive Test.*, pp. 25–28, 2008.
- [8] S. Kolokolnikov, A. Dubov, and O. Steklov, "Assessment of welded joints stress-strain state inhomogeneity before and after heat treatment based on the metal magnetic memory method," *Energodiagnostika Co. Ltd.*
- [9] S. M. Kolokolnikov and A. A. Dubov, "Determination of mechanical properties of welded joints metal by strength parameters in the stress concentration zones detected by the metal magnetic memory method," *Energodiagnostika Co. Ltd.*
- [10] M. Roskosz, A. Rusin, and J. Kotowicz, "The metal magnetic memory method in the diagnostics of power machinery componen," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 43, no. 1, pp. 362–370, 2010.
- [11] M. Roskosz and M. Bieniek, "Evaluation of residual stress in ferromagnetic steels based on residual magnetic field measurements," *NDT E Int.*, vol. 45, no. 1, pp. 55–62, 2012.
- [12] M. Roskosz, A. Rusin, and M. Bieniek, "Analysis of relationships between residual magnetic field and residual stress," *Meccanica*, vol. 48, no. 1, pp. 45–55, 2013.
- [13] A. Dubov and S. Kolokolnikov, "The problems of residual stress testing in welded joints and their solution using the MMM method," *Energodiagnostika Co. Ltd.*
- [14] M. Kuroda, S. Yamanaka, K. Yamada, and Y. Isobe, "Evaluation of residual stresses and plastic deformations for iron-based materials by leakage magnetic flux sensors," *J. Alloys Compd.*, vol. 314, pp. 232–239, 2001.
- [15] M.T. Hutchings, P.J. Withers, T.M. Holden, "Introduction to characterization of residual stress by neutron diffraction," *Mater. Today*, vol. 8, no. 5, p. 57, May 2005.

- [16] International Atomic Energy Agency, *Measurement of residual stress in materials using neutrons*. IAEA.
- [17] G. A. Webster, R. W. Wimpory, *Polycrystalline materials determination of residual stresses by neutron diffraction*. Joint Research Centre, European Commission, 2002.
- [18] M. Farajian, T. Nitschke-Pagel, R. C. Wimpory, M. Hofmann, and M. Klaus, "Residual stress field determination in welds by means of X-ray, synchrotron and neutron diffraction," *Materwiss. Werksttech.*, vol. 42, no. 11, pp. 996–1001, 2011.
- [19] K. Weman, *Welding processes handbook*. Woodhead Publishing Ltd, Abington Hall, Abington, 2003.
- [20] M. Pelkner, "Untersuchung und Anwendung von GMR-Sensorarrays für die Zerstörungsfreie Prüfung von ferro- magnetischen Bauteilen," Universität des Saarlandes, 2014.
- [21] C. Glenske and U. Loreit, "New 3D-Magnetic Field Sensors with GMR-Spin Valve Layers," *Magnetoresistive Sensors Magn. Syst. Symp.*, pp. 79–86, 2009.
- [22] Helmholtz-Zentrum Berlin, "<https://www.helmholtz-berlin.de/>," 2015. [Online]. Available: https://www.helmholtz-berlin.de/user/experimental-infrastructure/instruments-neutrons/index_en.html.
- [23] A. Paradowska, J. W. H. Price, R. Ibrahim, and T. Finlayson, "A neutron diffraction study of residual stress due to welding," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 164–165, pp. 1099–1105, 2005.
- [24] ГОСТ 12.0.003–74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
- [25] Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценки факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. – М.: Минздрав России, 1999.
- [26] СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». – М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003.
- [27] СанПиН 2.2.4.548-96 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений». – М.: Госкомсанэпиднадзор, 1996 г.
- [28] СанПиН 2.2.4.1294-03. Гигиенические требования к аэроионному составу воздуха производственных и общественных помещений. – М.: Госкомсанэпиднадзор России, 2003.
- [29] Приказ Минэнерго РФ от 08.07.2002 N 204 "Об утверждении глав Правил устройства электроустановок".
- [30] ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.

- [31] ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Защитное заземление, зануление.
- [32] ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования.
- [33] ГОСТ 12.1.004–91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования (01. 07. 92).
- [34] РД 153-34.0-03.298-2001. Типовая инструкция по охране труда для пользователей персональными электронно-вычислительными машинами ПЭВМ в электроэнергетике – М.: Министерство энергетики России, 2001.
- [35] СНиП 11-01-95 «Инструкция о порядке разработки, согласования, утверждения и составе проектной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений» – М.: 1995.
- [36] Анализ отходов I-III классов опасности, образующихся в вузах на примере ГОУ ВПО НИ ТПУ [Электронный ресурс] / Ю. М. Федорчук, В. Н. Извеков, О. Н. Русниа // Энергетика: экология, надежность, безопасность: материалы докладов XVI Всероссийской научно-технической конференции, 8-10 декабря 2010 г., Томск
- [37] План-конспект для проведения занятий по ГО и ЧС[Электронный ресурс] / URL: <http://ispu.ru/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. Дата обращения: 24.05.2016 г.
- [38] СНиП 2.04.05-91 "Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха".
- [39] ГОСТ 12.4.021-75 "ССБТ. Системы вентиляционные. Общие требования".
- [40] Расчет потребного воздухообмена. Методические указания к выполнению самостоятельной работы по дисциплине “Безопасность жизнедеятельности” для студентов всех специальностей. – Томск: изд. ТПУ, 2005. – 16 с.
- [41] ГОСТ 12.1.029 «Средства и методы защиты от шума».

Приложение А
Chapter 3. Research results

Раздел 3
Результаты проведенного исследования

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
1БМ4Н	Лямкин Виктор Владимирович		

Консультант кафедры _____ (аббревиатура кафедры) _____ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

Консультант – лингвист кафедры _____ (аббревиатура кафедры) _____ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

Chapter 3. RESEARCH RESULTS

3.1 Experimental data of neutron diffraction

The strain-free reference sample was measured both in longitudinal and transversal directions to the weld positions. Different depths and gauge volumes were considered in order to increase point-location sensitivity. The central line was measured with 2x2x4mm 3 gauge volume, to get the whole thickness and validate results of top and bottom lines. Therefore, the 2x2x4mm 3 gauge volume is supposed to physically average lines from top and bottom. It was proved by the experimental results (Figure19). Difference between the highest and the lowest value is in the order of 0.007Å.

Stresses are presented in Figures 20 and 21. The calculation was done pointwise: every strain point was corrected with its own d_0 reference corresponding to stress direction and top/bottom position. In the Figure20a, the longitudinal stress

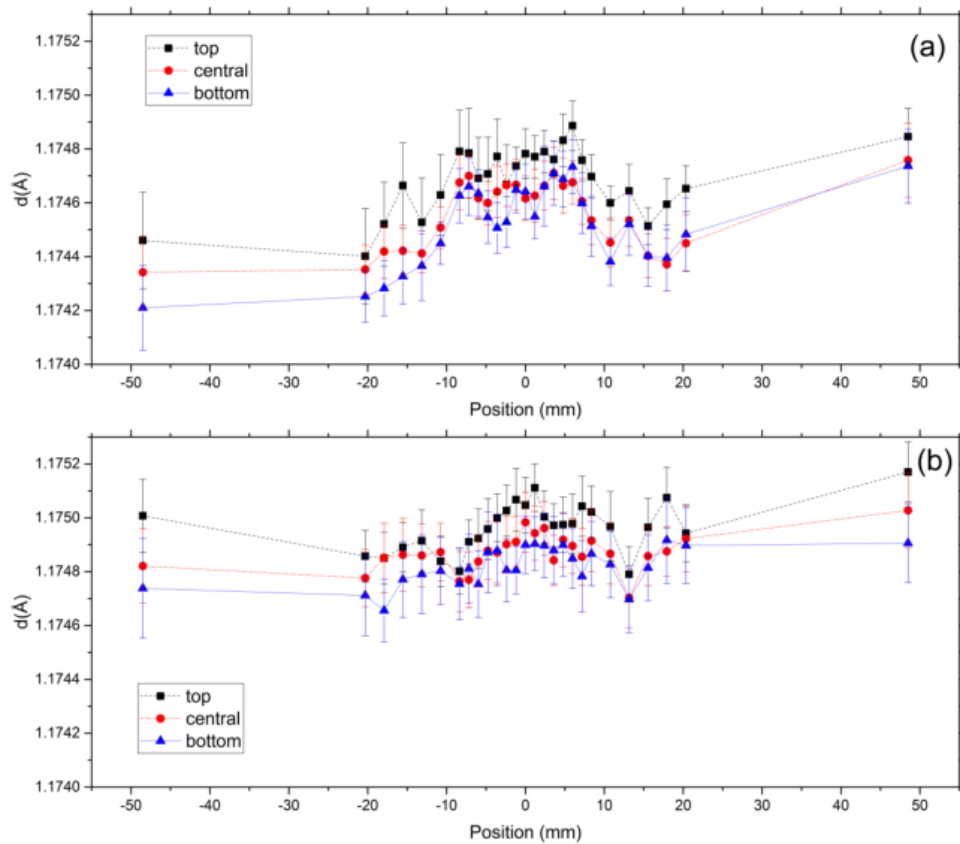


Figure 19 - Strain-free reference lattice spacing: (a) longitudinal direction; (b) transversal direction.

profile of Specimen No.3 shows pronounced peaks at 7mm from weld center for lines 1 and 2 in the middle of the sample. For line 3 the peaks are slightly shifted towards the center of the weld and stresses are slightly lower compared with lines 1 and 2. Maximum tensile stress for all line profiles in longitudinal direction is about 600 MPa, while maximum compressive stresses of -210 MPa are present around -30mm position. In the far field, at -45mm, stress was confirmed to be close to zero. The evolution of the stress profile of transversal component was more flat. On the bottom of the plate, lines 1 and 2 indicated stresses close to zero, whereas at the top position the compression stresses reached -150 MPa. Line 3 was mostly under tensile stresses with a maximum of 230 MPa. The stress difference between top and bottom lines was more pronounced in the weld zone, of the order of 100 MPa.

Specimen No.1 exhibits similar stress profiles as found for specimen No.3. Maximum longitudinal stresses were located at the same positions and were of the order of 620 MPa.

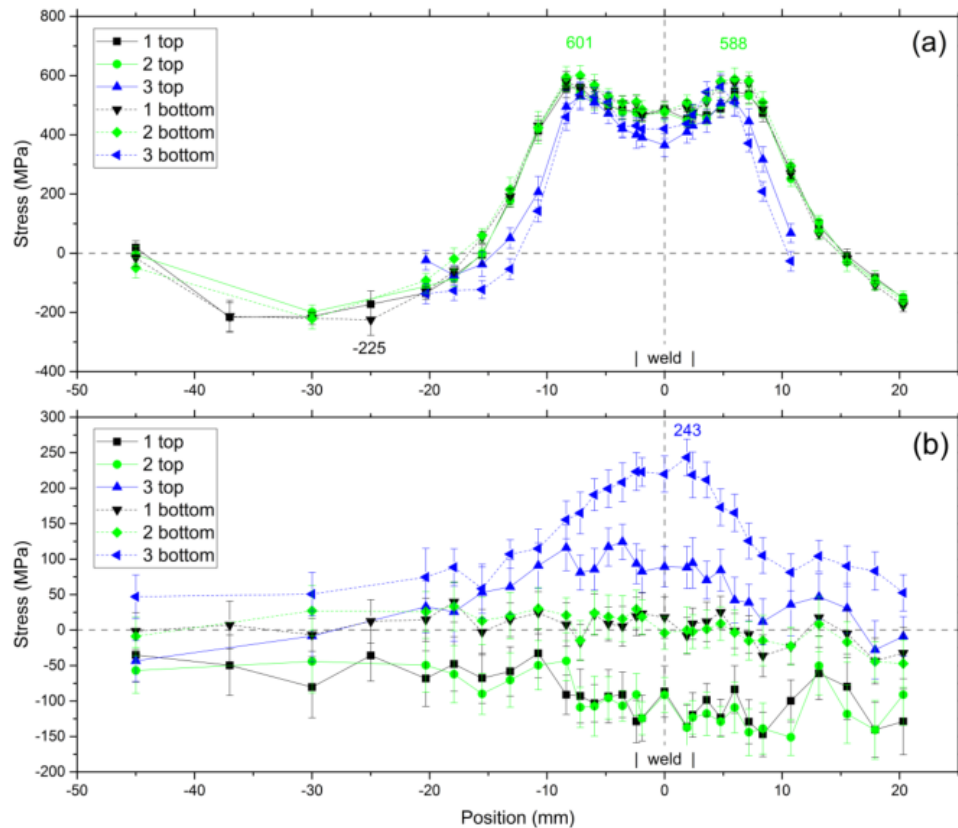


Figure 20 - Stresses of specimen No.3: (a) longitudinal direction; (b) transversal direction.

In transversal direction, stresses of line 1 top were very close to zero, although it is interesting to note that the bottom line 1 seems to be under a tension stress about 90 MPa. Furthermore, line 2 was under higher tension stress compared with line 1, reaching 200 MPa at the bottom. Compared with specimen No.3, lines 2 top and 2 bottom are shifted into tensile region due to possible bending. All samples showed high consistence and reproducibility of residual stress fields, with nearly identical behaviour; even numerical values were close. This shows a proof of the good reproducibility of neutron diffraction measurements.

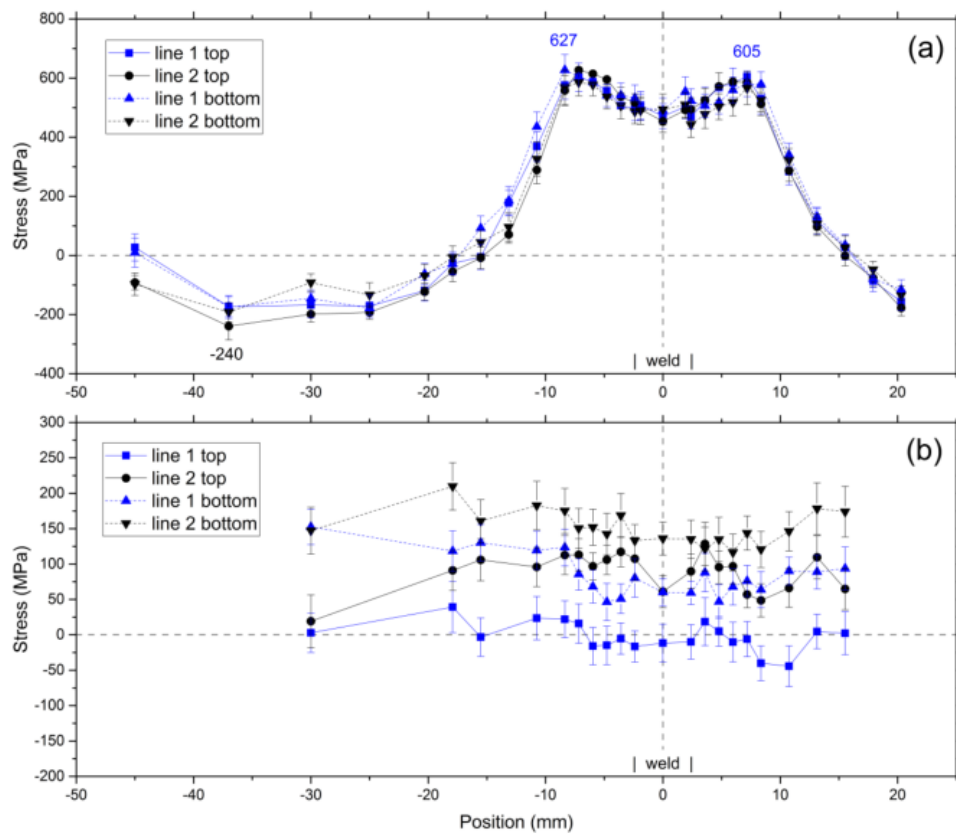


Figure 21 - Stresses of specimen No.1: (a) longitudinal direction; (b) transversal direction

3.2 Experimental data of magnetic measurements

Measurements were carried out on two specimens with two different types of sensor, described in the experimental chapter. For every specimen were selected regions of interest (ROI), corresponding to the location of neutron diffraction measurement. There are several reasons to narrow down to the ROI. First, change in

the surface topography is smaller over limited area, what allows to use smaller lift of. Secondly, magnetic flux density at edges is higher, which would affect the performance of the sensor and also make the interpretation of data more difficult. Area D was intentionally measured through the edges to show this effect (Figure25).

Figure22 shows area in the middle of specimen No.3 (Area A). Zero position corresponds to the middle of the weld. The behaviour of observed z component (normal to the plate), seems to be symmetric across the weld in this area.

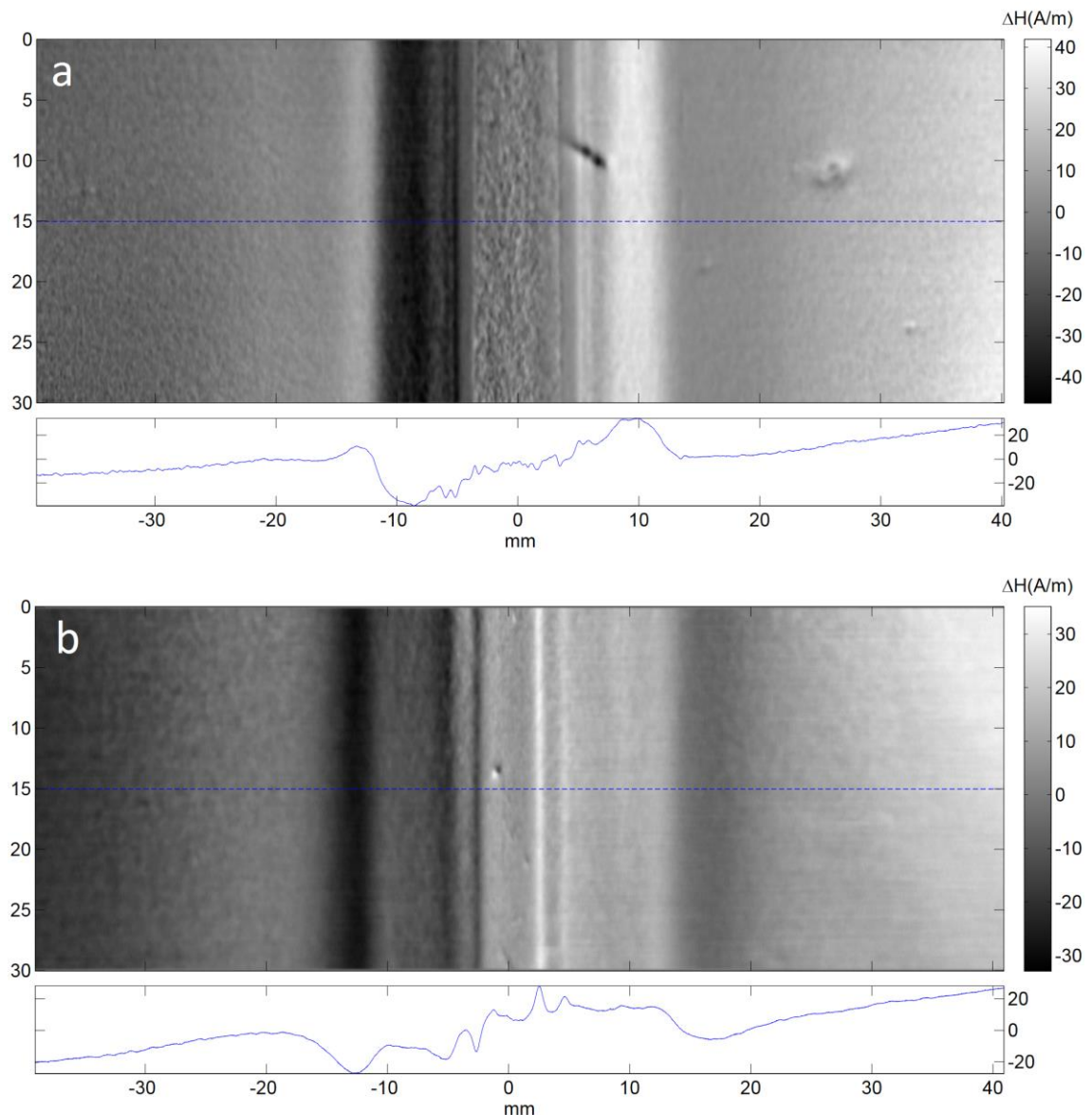


Figure 22 - Representation of the normal component of magnetic field in the area A, obtained with gradiometer (12A): (a) top side of the specimen; (b) bottom side. Profile under each image corresponds to the position of the dashed line.

Even though the image was acquired with gradiometer, linear component of global magnetic field can be recognized on the profile under the image. There are several magnetic “defects” (visible on the image), which could not be found by visual observation. Grain-like structure of magnetic field, visible due to high spatial resolution, is out of the scope of this study, as well as single magnetic defects.

Closer to the edge of the specimen, in area B (Figure23), the magnetic field is less symmetric and follows weld profile. On the top side the trace from a clamp can be seen as a circle at 30mm. Weld starting position can be seen from the top, as well as from the bottom. On the bottom side small scratches in the middle cause leakage of magnetic field and detected as sharp lines.

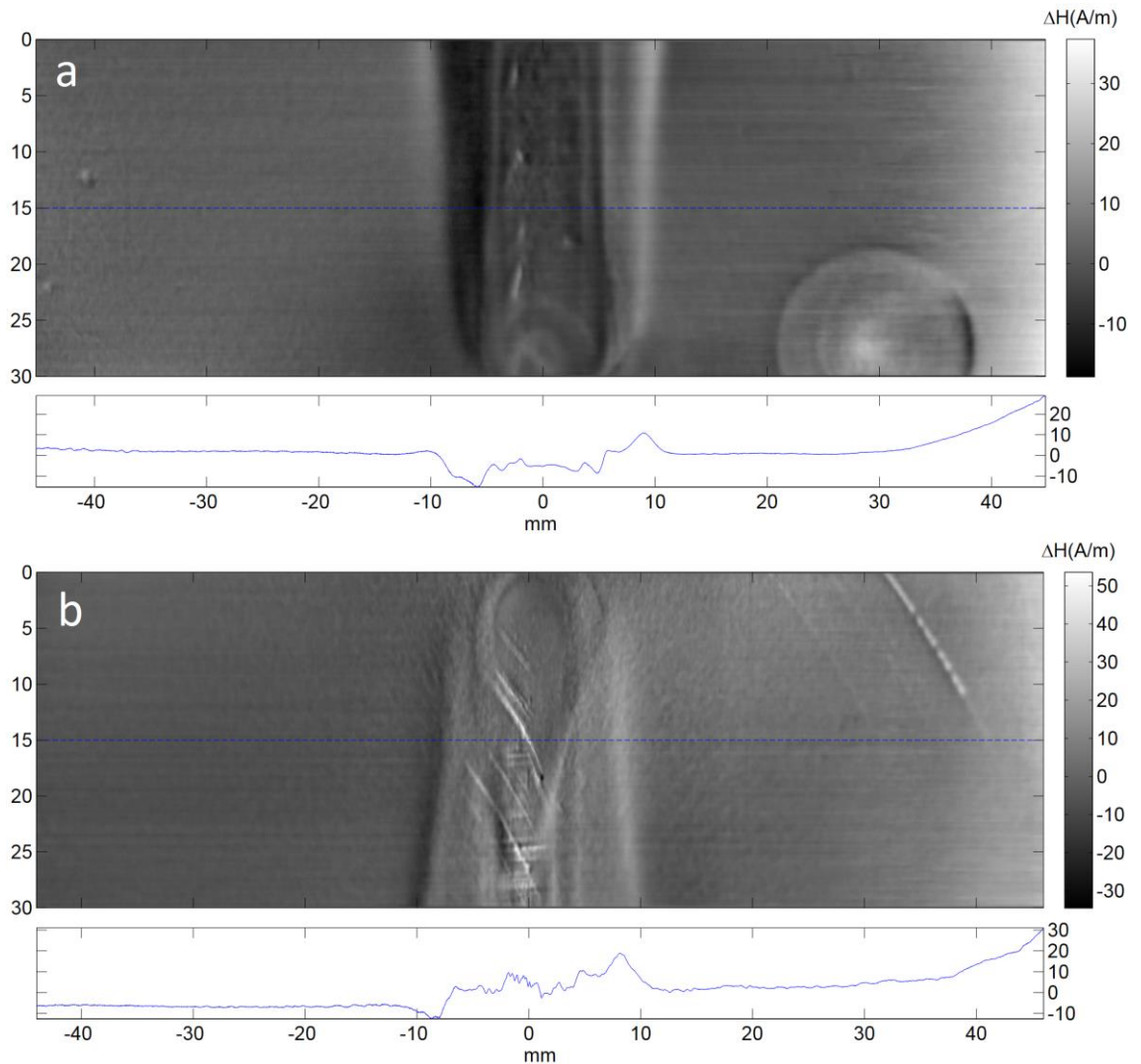


Figure 23: Representation of the normal component of magnetic field in the area B, obtained with gradiometer (12A): (a) top side of the specimen; (b) bottom side. Profile under each image corresponds to the position of the dashed line.

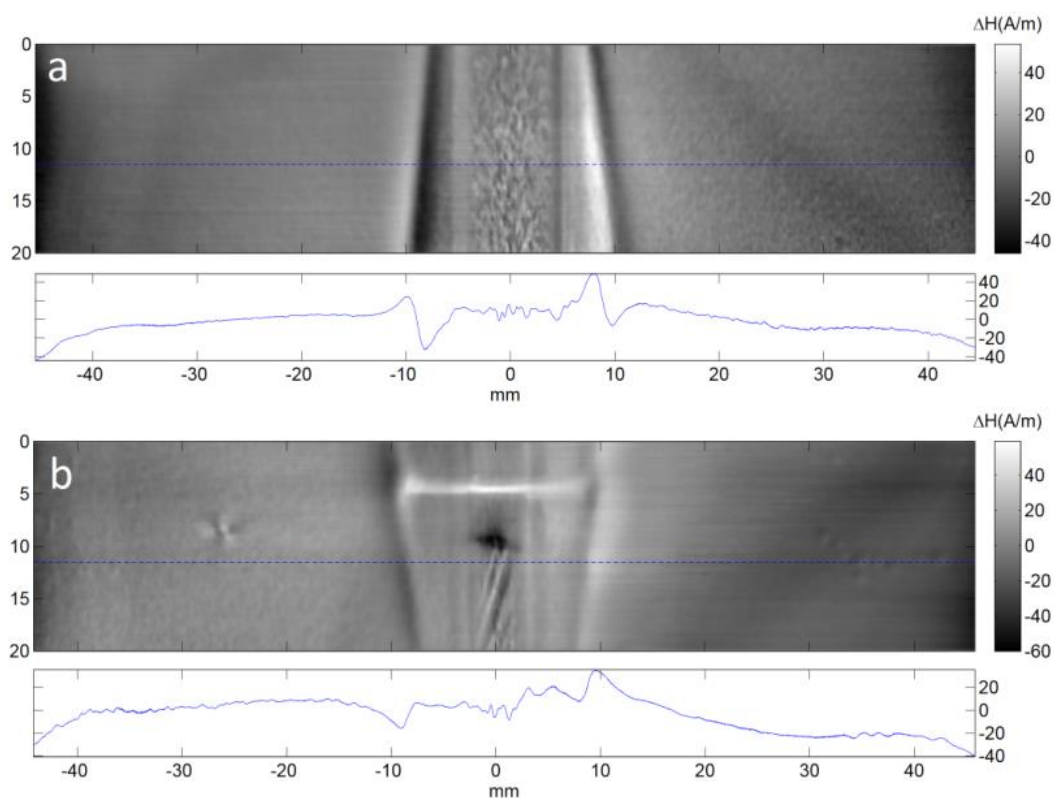


Figure 24: Representation of the normal component of magnetic field in the area C, obtained with gradiometer (12A): (a) top side of the specimen; (b) bottom side. Profile under each image corresponds to the position of the dashed line.

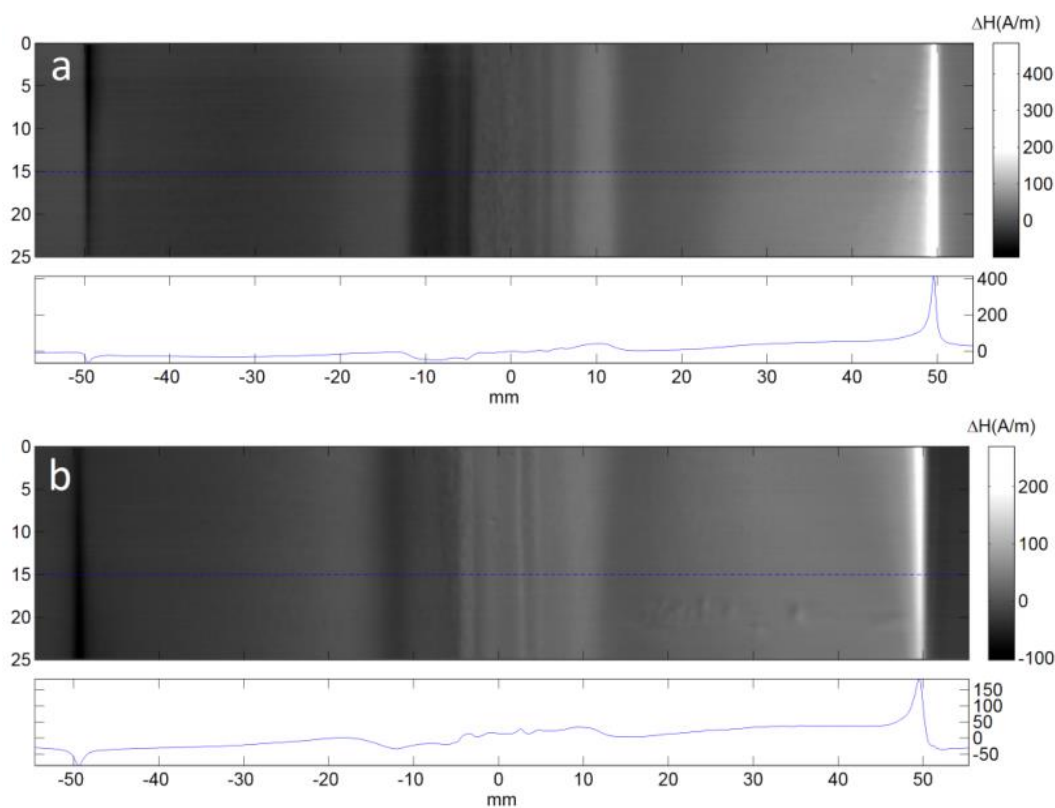


Figure 25: Representation of the normal component of magnetic field in the area D, obtained with gradiometer (12A): (a) top side of the specimen; (b) bottom side. Profile under each image corresponds to the position of the dashed line.

In the middle of specimen No.1 (area D, Figure25) the magnetic structure is comparable with area A. Figures 26 and 27 depict area A measured with three directional sensor from top and bottom sides respectively. Z direction looks very similar to gradiometer measurements. Peaks are at the same position (10mm). The contrast between weld/heat affected zone and base material is less, but the global magnetization is more conspicuous and can be seen as linear component on the profile.

For the x component, the lowest magnetic field is at 12mm from the weld centreline and highest at 3mm, which corresponds to the border between weld and base material. In the y direction (longitudinal) the weld is hardly noticeable. Only global magnetization is visible at this direction. Sum of all components H_S , presented in Figures 26d and 27d was calculated as square root of sum of squares of every component (Eq.18)

$$H_S = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \quad (18)$$

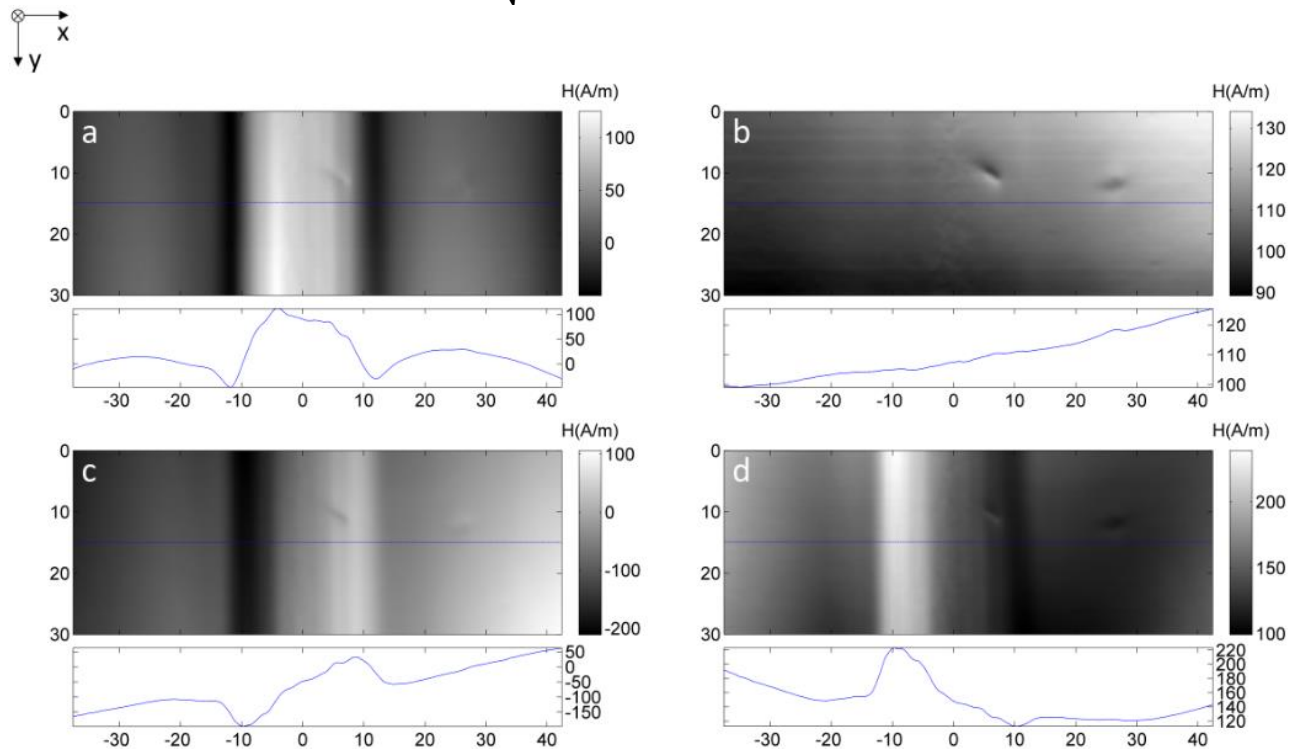


Figure 26 - Three directional measurement representation of the top side of the area A: (a) x component; (b) y component; (c) z component; (d) sum of all components. The profile under each image corresponds to the position of the dashed line. Horizontal axes show the distance from the weld centre in mm.

Small defects are visible with three dimensional sensor, as well as gradiometer. From the bottom side, the weld and the heat affected zone are clearly visible. Rotation of the sample was done along y axis and, therefore, image in x directions looks inverted. Peaks at the bottom side are broader compared with top side by 2mm.

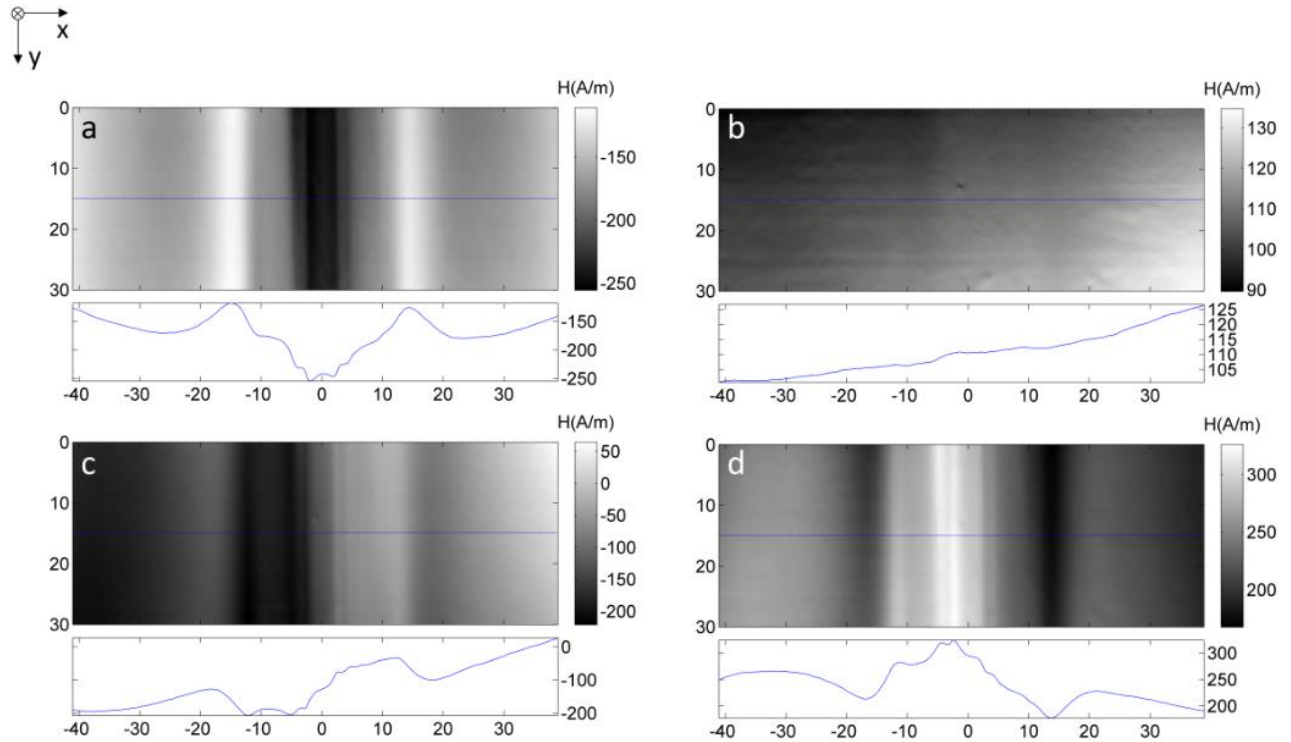


Figure 27 - Three directional measurement representation of the bottom side of the area A: (a) x component; (b) y component; (c) z component; (d) sum of all components. Profile under each image corresponds to the position of the dashed line. Horizontal axes shows the distance from the weld centre in mm.

3.3 Neutron diffraction and stress distribution

Due to the fact that molten metal in weld contracts as it cools, residual stresses in welds are inevitable. Results obtained with neutron diffraction showed occurrence of high stress fields in longitudinal direction, with peak stresses symmetric to the weld. In contrast, in the transverse direction stresses have much smaller amplitude. This could be explained by the fact that residual stresses in transverse direction are easier to release by bending/shrinkage of the plate across the weld [19]. Indeed, Figure21 shows signs of bending in the transverse direction: top

and bottom lines are shifted symmetrically. Since plates were not restrained, distortion and, therefore, release of stress has occurred in this direction. In the longitudinal direction, it is common to have residual stress of the order of the yield strength [19]. However, in this study welding was performed on a single piece of S235JR sheet material, without the filler. This resulted in a molten base material very close to the surface (see Figure 18a) and a substantial rate of cooling, which may result in hardening of HAZ [19]. Therefore chemical and structural composition of metal changes during welding process. To minimise this effect no additional material, such as filler rod, was used during welding. The yield strength, specified by the manufacturer (235 MPa) can substantially increase. Similar results were obtained in [23], where flux cored arc welding process was applied on low carbon steel 12mm thickness plates.

Performed pointwise calculation of stresses with strain free reference comb sample should allow compensating possible microstructure variations in the weld and the heat affected zone. For correlation with MMM, it is important to note that stresses measured by neutron diffraction are bulk stresses and can differ from the stresses at the surface [18].

3.4 Magnetic field acquisition results

The small active area of the sensor, particularly the 12A, makes it possible to resolve magnetic structures with high spatial resolution. It can be noted that the spatial resolution depends not only on the size of the sensor, but also on the lift-off from the surface [20]. As it is mentioned in the sensor technical data, magnetic structures on the plane surface can be resolved with 160 μ m resolution. If the geometry of an object leads to a variation in the lift-off, this will lead to variations in resolution as well. Weld plates for this investigation were produced without significant surface changes, taking this into account. However, during the welding process, steel plates were inevitably deformed to some extent (not more than 300 μ m).

The selection of particular area of interest allows examining magnetic properties with smaller lift-off and therefore higher lateral resolution.

Information on magnetic fields, acquired with GMR sensors, has a complex nature. As mentioned in the introduction, it is a combination of several contributions. All samples under study exhibited global magnetization, which needs to be taken into account. It can be seen clearly with the 3D sensor in figures 26 and 27. There is a noticeable linear behaviour in normal component of magnetic field ($H_z(x)$) from the global magnetic field of the sample. At the same time, the y component $H_y(x)$ shows only global magnetic field. In $H_x(x)$ the global MF could be seen as a decrease of amplitude close to the edges and in blunt peaks at 25mm from weld centreline. Occurrence of strong enough magnetic field may result in generation of leakage fields due to change in magnetic permeability of the material within the weld and the heat affected zone.

It is important to mention that it is not possible to distinguish between leakage field and field induced by inverse magnetostriction only by mapping the magnetic field strength. In case of magnetostriction, theory allows direct comparison of magnetic field and stress. In case of leakage fields, the problem is more complex and depends on the change of magnetic properties of the metal with temperature. The possibility of re-magnetization of the heat affected zone due to high temperatures with current induced MF cannot be excluded either. However, according to [3], inverse magnetostriction effect for observed stresses should induce fields one order of magnitude smaller than it is observed in this study.

Images 26d and 27d obtained with the 3D sensor, present a sum of all MF components. Nevertheless it is important to analyse each of the component separately. For correlation between residual stress fields and magnetic fields, x and z MF components were chosen as they contain most of the information.

3.5 Correlation of the two techniques

The GMR sensor design allowed examining weak magnetic fields with high spatial resolution (35 μ m), empowered by the high precision of the linear manipulators and by the small active area of the detector. Multi-line measurements and image based representation allowed observing small magnetic structures, whereas stresses observed by neutron diffraction, are averaged over the gauge volume. Within this volume, stresses of higher order may take place. To avoid comparison between different volumes, for quantitative analysis, neutron diffraction data was correlated to an average of magnetic field measurements of 2x2mm² area. For qualitative analysis, the exact profiles from MF measurements are shown as well in this chapter. ND stress profiles were given by their von Mises equivalent stress (σ_{eqv}), as mentioned in Equation 9. All magnetic field measurements from the 12A sensor are presented as modulus of the direct measurements for presentation purposes. Figures 28 and 29 show the same area and the same position for neutron diffraction lines and magnetic field measurement profiles with respect to top and bottom sides of the plate. Since Specimens No.1 and 3 showed very similar behaviour, only results from specimen No.3 will be discussed further.

As it can be seen in Figure 28, ND and MF peaks and dips positions do not match exactly, however they are close to each other. Since peak positions are far from the weld, this behaviour of magnetic field could not be explained by the change of the lift-off or as an occurrence of magnetic leakage field due to uneven geometry. This is confirmed in bottom side images (Figures 22b, 23b, 24 and 27), where there are no sharp changes in the surface topography.

As in previous studies [11,12], derivatives of all GMR signals were calculated. For gradiometer measurements it is not reasonable to process the direct signal, due to the presence of high contrast grain-like structures. Therefore, the derivative of MF was done with 2x2mm² averaging. As Figure 28f depicts, direct pointwise correlation of stress and derivative of gradiometer measurements (normal component) has high inconsistency and nearly random correlation. Pointwise

correlation of stresses directly with $\Delta H_z(x)$, presented in Figure 28e, has no noticeable dependence as well.

Figure 29 depicts the x component of magnetic field (transverse direction to the weld). It could be concluded that measurements of x component correlate with the von Mises equivalent stress better than other components (y and z). However, it is important to note, that one direction alone does not represent full information on magnetic field distribution. As mentioned earlier, global magnetic field of the specimen needs to be taken into consideration. Hence, analysis of different components from Figures 26 and 27 reveal that specimen is magnetised in diagonal direction. In other words, global magnetic field of the sample contributes to x, y and z components of 3D measurements. It is probable that due to superposition of global and local magnetic field, stress related information is contained only in dips at 11mm position from the weld centre (Figure 29). The same could be concluded for the bottom side (Figure 29b). However, dips at the bottom side are located at approximately 15mm from weld centre. Such a peak shift for top to bottom is not observed in neutron diffraction measurements. Result of quantitative correlation between the von Mises equivalent stress and the x component of the 3D magnetic field measurements are presented in Figure 29e. The quantitative agreement is indeed better than for the z component. The shift along H axes can be explained by the hysteresis behaviour of the sensor (see Figure 14b).

Figures 29c and 29d show the correlation of von Mises stress with the derivative of x component $dH_x(x)/dx$. In contrast to previous investigations with line measurements [11, 12], mapping and image-based representation of magnetic field allows avoiding possible local surface defects and making analysis in different directions. This is particularly important for the derivative of the magnetic field strength, as even a small amplitude change can give a strong response. At the top of the plate (Figure 29c), peak positions are close to maximum stress positions. At the bottom (Figure 29d), this tendency is somewhat different: MF peaks that correlate with neutron diffraction at the top, become broader at the bottom. It could be noticed that at some points, especially at the bottom, correlation between $dH_x(x)/dx$ and

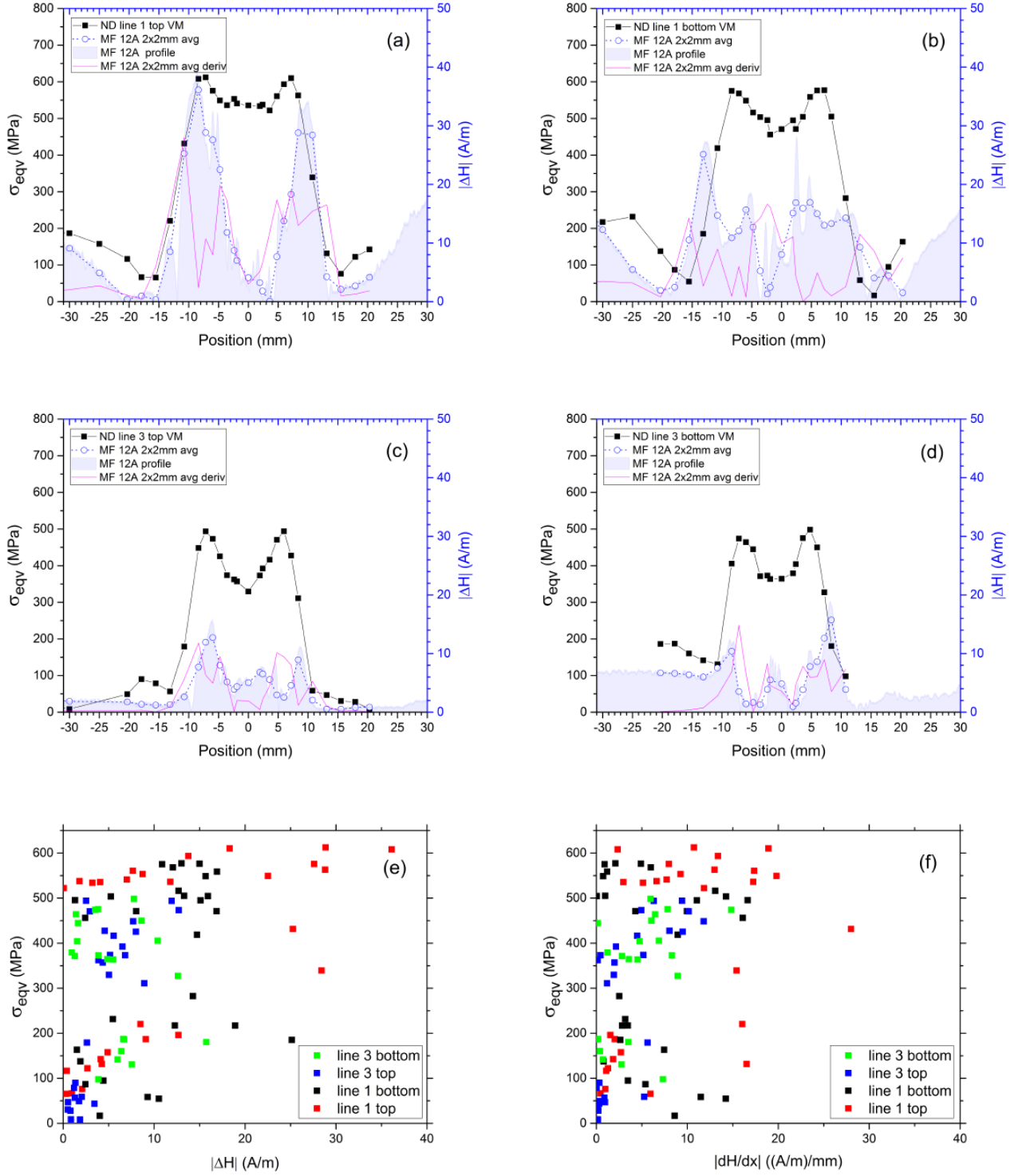


Figure 28 - Correlation of von Mises equivalent stress, calculated from neutron diffraction data (ND) with magnetic field measurements (MF) using gradiometer (for sample No.3): (a) Area A, top side; (b) Area A, bottom side; (c) Area B, top side; (d) Area B, bottom side; (e) von Mises equivalent stress versus change in magnetic field strength of normal component (gradiometer); (f) von Mises stress equivalent versus the derivative of change in magnetic field strength of the normal component (gradiometer).

change of σ_{eqv} takes place. While this is possible, the confirmation with spatially resolved mapping of stress would be required.

An overview is given by visual representation in Figure30, where optical, magnetic and neutron diffraction mapping images were combined together. Von Mises equivalent stress from lines 1 and 2 was colour-mapped (with interpolation). Tempering colours that can be seen on the optical image, due to inert gas cover during welding process, may not represent temperature correctly, but can serve for comparison purposes. MF image of the 12A sensor in Figure30a depicts a clear contrast between weld and heat affected zone. At the bottom (4mm distance from weld centre line) there is also noticeable contrast that corresponds to the heat affected zone (see Figure18a). The possibility of HAZ determination can be beneficiary. However, for stress investigation it could be undesirable as it may influence the stress related information. It is also worth noting that magnetic field images obtained after neutron measurements showed no difference to those measurements before; in other words ND did not affect the magnetic field.

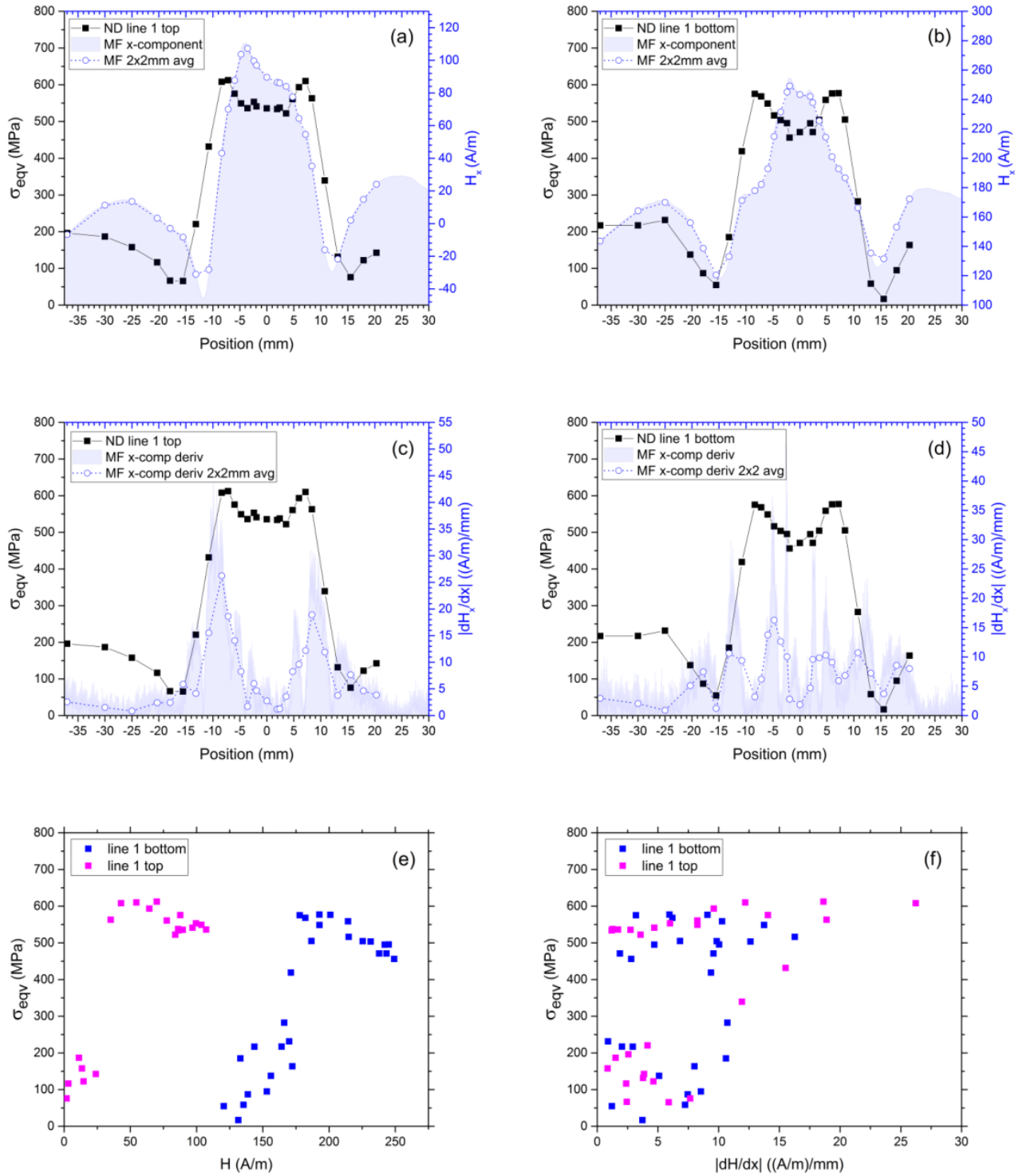


Figure 29: Correlation of von Mises equivalent stress, calculated from neutron diffraction data (ND) with x component of magnetic field measurements (MF) using 3D sensor (for sample No.3): (a) Area A, top side; (b) Area A, bottom side; (c) Derivative of the magnetic field strength versus stresses at the top; (d) Derivative of magnetic field strength versus stresses at the bottom; (e) von Mises stress equivalent versus magnetic field strength in x direction (gradiometer); (f) von Mises stress equivalent versus the derivative of magnetic field strength in x direction.

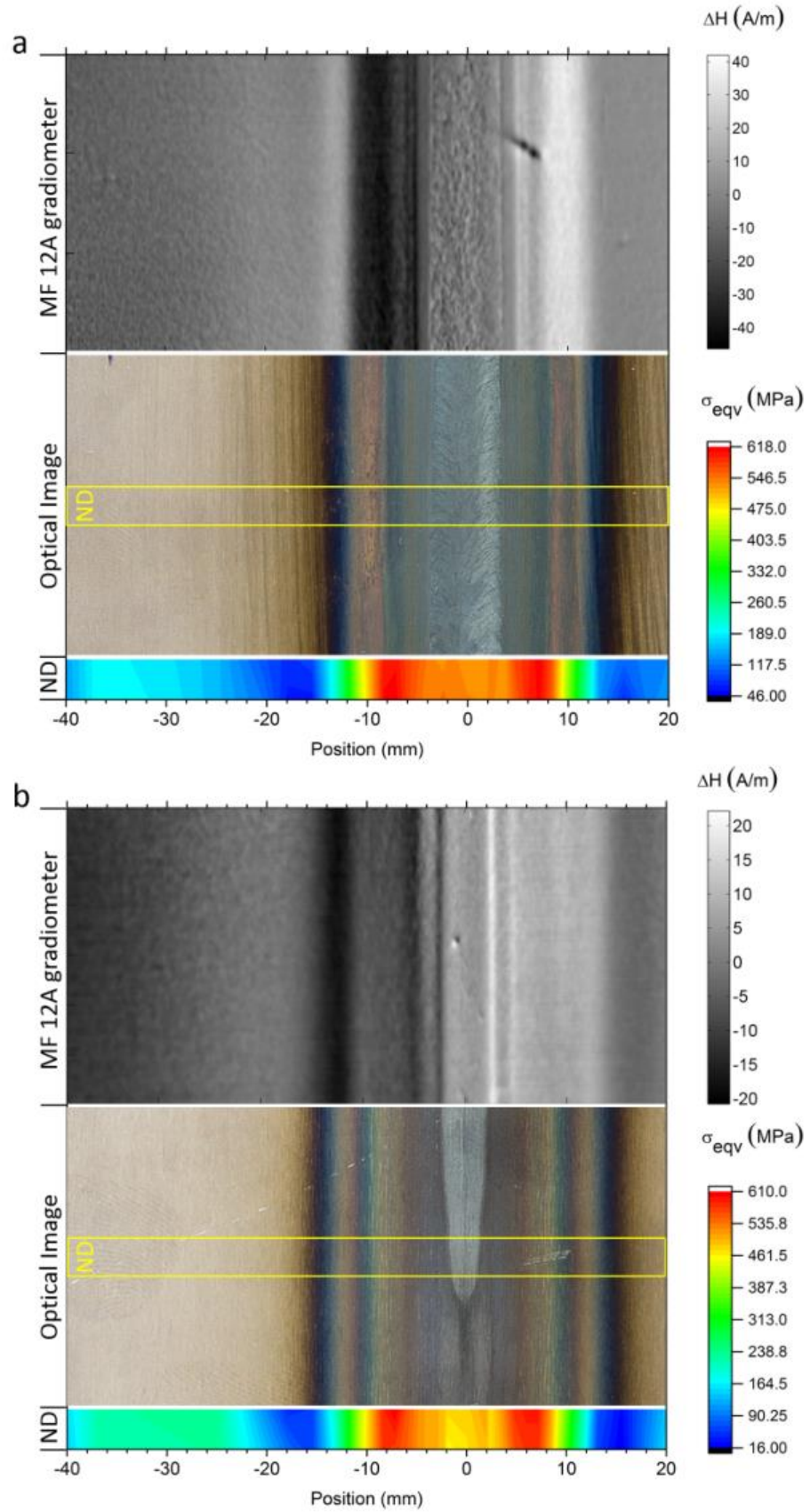


Figure 30: Image based correlation of optical image, neutron diffraction (ND) and magnetic field measurements (MF) of normal component by gradiometer (12A) in the area A: (a) Top side of the specimen; (b) Bottom side of the specimen.