

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 53.08: 681.518

№ государственной регистрации АААА-А17-117041410015-9

№ проекта 17-08-00914

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по НИР

Е.С. Попов

26 сентября 2017 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ
МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА РЕГИСТРИРУЕМЫХ СИГНАЛОВ**

(промежуточный отчет за 2017 год)

Руководитель НИР,
д. ф.-м. н., проф.

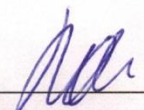
В.В. Поляков

подпись

Барнаул 2017


СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель,
д. ф.-м. н., проф.

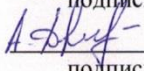

26.12.2017
подпись, дата

В.В. Поляков (введение, заключение,
разделы 1-5)

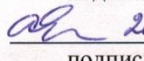
Исполнители темы:


26.12.2017
подпись, дата

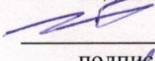
Я.И. Борцова (разделы 1, 2)


26.12.2017
подпись, дата

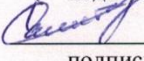
А.А. Дмитриев (раздел 5)


26.12.2017
подпись, дата

А.В. Егоров (разделы 1, 2, 3)


26.12.2017
подпись, дата

А.А. Лепендин (разделы 1, 3, 5)


26.12.2017
подпись, дата

Д.С. Салита (раздел 5)

РЕФЕРАТ

Отчет 64 с., 27 рис., 1 табл., 57 источников.

Цель работы: целью исследований первого этапа проекта (2017 год) являлось выявление наиболее информативных диагностических характеристик, формирующих векторы признаков для вихретоковой и акустико-эмиссионной диагностики; разработка математических методов использования этих признаков при многомерном анализе регистрируемых сигналов.

В процессе работы проведен выбор наиболее информативных векторов признаков, характеризующих регистрируемые при вихретоковых и акустико-эмиссионных измерениях сигналы, осуществлена разработка новых методов обработки информативных параметров с помощью математического аппарата многомерного анализа данных, проведена апробация этих методов для материалов с различными физико-механическими свойствами.

В результате работы создан и апробирован оригинальный метод многочастотных вихретоковых измерений, заключающийся в использовании сигнала специальной формы. Предложены и апробированы в качестве новых информативных параметров акустической эмиссии коэффициенты многомерных дискретных вейвлет-разложений регистрируемого сигнала, описывающие его низкочастотные компоненты. На основе метода главных компонент проведены обработка и анализ информативных параметров вихретоковых и акустико-эмиссионных сигналов, обеспечившие классификацию экспериментальных данных и расширение возможностей диагностики.

Результаты работы могут быть **применены** при неразрушающем вихретоковом контроле изделий из немагнитных металлических материалов и при акустико-эмиссионной диагностике процессов пластической деформации и разрушения в конструкциях, находящихся в условиях внешнего нагружения.

Ключевые слова: вихретоковой контроль, акустическая эмиссия, неразрушающая диагностика, метод главных компонент, вейвлет-преобразование, металлические материалы.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. МНОГОЧАСТОТНЫЕ ВИХРЕТОКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ НЕМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	11
1.1. Экспериментальная установка для вихретоковых измерений	11
1.2. Метод многочастотных вихретоковых измерений, основанный на применении сигналов специальной формы.....	13
1.3. Применение виртуальных приборов при обработке результатов испытаний	16
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ НЕМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	18
2.1. Экспериментальные годографы при использовании проходных параметрических датчиков.....	18
2.2. Экспериментальные годографы при использовании накладных параметрических датчиков.....	20
2.3. Влияние характеристик диагностируемых объектов на экспериментальные годографы.....	23
3. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЕКЦИОННЫХ МЕТОДОВ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ К ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВИХРЕТОКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	27
3.1. Методы главных компонент и проекций на латентные структуры в задачах диагностики	27
3.2. Диагностика физических и геометрических характеристик немагнитных материалов	29
4. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ.....	33
4.1. Экспериментальная установка для механических и акустико-эмиссионных испытаний	33
4.2. Акустическая эмиссия при пластической деформации и разрушении алюминий-магниевых сплавов.....	35
4.3. Акустическая эмиссия при пластической деформации и разрушении свинцовых сплавов.....	39

5. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЕКЦИОННЫХ МЕТОДОВ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ К ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	45
5.1. Использование коэффициентов вейвлет-разложений акустико-эмиссионных сигналов в качестве информативных параметров	45
5.2. Акустико-эмиссионная диагностика алюминий-магниевых сплавов	48
6. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ	51
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	59

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с планом работ по проекту первый этап (2017 год) был посвящен решению таких задач, как получение и исследование новых информативных характеристик, перспективных для применения при неразрушающем вихретоковом контроле и акустико-эмиссионной диагностике материалов с различными физико-механическими свойствами и разной структурой. Полученные экспериментально информативные характеристики рассматривались как векторы признаков, к которым применялся математический аппарат многомерного анализа данных. Обработка с помощью проекционных методов этого аппарата была призвана выявить и апробировать новые методы и алгоритмы, обеспечивающие существенное повышение эффективности и надежности вихретоковых и акустико-эмиссионных измерений. Расширение возможностей диагностики материалов и изделий, основанной на этих измерениях, обуславливало актуальность задач первого этапа проекта.

Важность развития методов неразрушающей диагностики, основанных на вихретоковых измерениях, связана с двумя обстоятельствами. С одной стороны, эта группа методов является одной из наиболее применяемых в силу распространенности изделий и конструкций, изготовленных из металлических материалов, в связи с широким спектром диагностируемых свойств и характеристик, а также в силу удобства использования в производственных условиях [1 - 5]. С другой стороны, традиционные модификации вихретоковых методов в значительной степени достигли предела своих возможностей, а реализующие их измерительные устройства – предела точности, дальнейшие усовершенствования принципиально не изменяли сложившейся ситуации [6-8]. Так, в случае многочастотных методов, дающих наименьшую погрешность измерений, принципиальным недостатком являлось влияние на получаемые годографы системы «контролируемый объект – вихретоковой датчик» большого числа совместно действующих факторов, включавших в себя физические свойства материала, геометрические параметры объекта контроля, условия измерений и т.д. [9-11]. Разделение влияния этих факторов и выделение контролируемой характеристики из мешающих воздействий весьма

затруднительно. Кроме того, построение с достаточной точностью годографов требовало последовательных измерений с большим набором различных частот, что связано со значительными временными затратами и в реальных производственных условиях не всегда реализуемо. В настоящем проекте для устранения этих проблем предложен новый подход. Этот подход заключается в использовании сигналов специальной формы, обеспечивающих получение годографов во всем значимом диапазоне частот за счет одного измерения [12-14]. Полученные годографы далее подвергаются цифровой обработке регистрируемых сигналов с помощью математического аппарата многомерного анализа данных [15-19].

Значимость диагностики материалов и изделий, основанной на методе акустической эмиссии, определяется высокой чувствительностью регистрируемых параметров акустико-эмиссионного излучения к процессам локальной перестройки структуры материалов при внешнем воздействии. Это позволяет применять метод для материалов, изделий и конструкций в напряженном состоянии на стадиях пластической деформации и предразрушения, обеспечивая контроль протекающих деформационных процессов на различных стадиях деформационного упрочнения [20-23]. В то же время возможности метода значительно ограничивают факторы, аналогичные случаю вихретоковых измерений. Именно, на регистрируемые параметры акустической эмиссии одновременно влияют различные конкурирующие факторы, обусловленные одновременным действием различных физических механизмов и источников излучения, а также геометрическими параметрами контролируемого объекта и условиями измерений [24-27]. Это делает весьма затруднительным анализ и интерпретацию регистрируемых при диагностике сигналов. В проекте предложен подход, позволяющий устранить указанные трудности и заключающийся в использовании новых информативных параметров акустической эмиссии, рассчитываемых путем обработки регистрируемых акустико-эмиссионных сигналов с помощью многоуровневого дискретного вейвлет-преобразования [28-31]. Получаемые информативные параметры – коэффициенты вейвлет-разложений регистрируемых сигналов –

подвергаются далее анализу и кластеризации на основе проекционных методов многомерного анализа данных [32-34].

Важной задачей первого этапа проекта являлась разработка конкретных модификаций математических методов, эффективных для цифровой обработки результатов вихретоковых и акустико-эмиссионных измерений, и реализующих эти методы алгоритмов обработки и анализа получаемых экспериментальных данных. Именно подход, обеспечивающий специальную математическую обработку регистрируемых сигналов, позволял достигнуть качественный рост возможностей физических методов диагностики, а также расширение областей их применения. В настоящем проекте для математической обработки измеряемых при диагностике сигналов были использованы проекционные методы многомерного анализа данных [35-40]. Прежде всего, для разделения и кластеризации факторов, влияющих на результаты измерений, был применен метод главных компонент. Этот метод позволил выявить скрытые закономерности и специфические особенности в больших массивах экспериментальных данных, получаемых при вихретоковых и акустико-эмиссионных измерениях, а также представить результаты диагностики в удобном для анализа наглядном виде.

Непосредственная апробация развитого нового подхода на первом этапе работы по проекту была проведена на материалах с различными физико-механическими свойствами. Именно, в случае вихретокового исследования испытания проводились на алюминиевых сплавах и металлах с разными электрофизическими характеристиками. Акустико-эмиссионные испытания при механическом нагружении осуществлялись для алюминиевых сплавов, высокодефектных сплавов со сварными соединениями и свинцовых сплавов.

В первом разделе отчета «Многочастотные вихретоковые измерения для немагнитных металлических материалов» приведены описания использованной для испытаний автоматизированной установки, схемы вихретоковых измерений и метода определения параметров вихретокового датчика. Рассмотрена предложенная авторами проекта модификация многочастотных измерений, заключающаяся в применении возбуждающего сигнала специальной формы, представляющего из себя суперпозицию гармонических сигналов со

специально подобранными фиксированными частотами. Описаны примененные для автоматизации измерений виртуальные приборы.

Во втором разделе отчета «Экспериментальные результаты для металлов и сплавов» рассмотрены экспериментальные годографы, полученные на основе разработанного метода измерений. В случае проходных параметрических датчиков проведено сопоставление этих годографов с результатами теоретических расчетов, полученных с помощью уравнений Максвелла. Подробно проанализированы годографы для практически наиболее важного случая накладных параметрических датчиков. Рассмотрено влияние на поведений линий годографов отдельных влияющих факторов, таких как удельная электропроводность материала, геометрические размеры образца, величина зазора между датчиком и контролируемым объектом.

В третьем разделе отчета «Применение проекционных методов многомерного анализа данных к обработке результатов вихретоковых измерений» описаны проекционные методы многомерного анализа данных, используемые при обработке результатов вихретоковых и акустико-эмиссионных измерений. Рассмотрен предлагаемый для характеристики многочастотных измерений вектор признаков. Представлены и проанализированы результаты апробации предложенного подхода для металлических материалов с различными физическими свойствами, образцов с разными геометрическими размерами, а также различных условий измерения, задаваемых величиной зазора.

В четвертом разделе отчета «Акустическая эмиссия при пластической деформации и разрушения материалов с различной структурой» описана автоматизированная экспериментальная установка для акустико-эмиссионных и механических испытаний, проводимых по «жесткой» схеме статического растяжения с постоянной скоростью деформирования. Приведены результаты измерений акустической эмиссии при нагружении алюминий-магниевых сплавов и проанализирована связь акустико-эмиссионных характеристик с параметрами и стадиями кривой деформационного упрочнения. Представлены новые данные по измерениям акустической эмиссии для материалов на основе свинца.

В пятом разделе отчета «Применение проекционных методов многомерного анализа данных к обработке результатов акустико-эмиссионных измерений» рассмотрено предложенное в проекте применение новых информативных параметров акустической эмиссии - коэффициентов дискретных многоуровневых вейвлет-разложений регистрируемых при нагружении акустико-эмиссионных сигналов. Описан алгоритм получения этих параметров и применения для их анализа метода главных компонент. Представлены результаты апробации развиваемого подхода на примере однородных алюминиевых сплавов и сплавов, содержащих сварные соединения.

В разделе «Результаты работы» приведен перечень публикаций по проекту, перечень сделанных на научных конференциях докладов, данные о созданном электронном ресурсе, а также перечень приобретенного по проекту оборудования.

В Заключении сформулированы основные результаты, полученные на первом этапе проекта, а также приведены исследования, планируемые для проведения на последующем этапе.

Список использованных источников содержит публикации, использовавшиеся при выполнении работы, а также полученные авторами проекта.

1. МНОГОЧАСТОТНЫЕ ВИХРЕТОКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ НЕМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

1.1. Экспериментальная установка для вихретоковых измерений

При проведении исследований использовалась схема измерений, обеспечивавшая возможность автоматизации испытаний и позволявшая одновременно определять параметры вихретокового датчика в широком диапазоне различных частот. Блок-схема разработанного авторами проекта измерительно-вычислительного устройства приведена на рисунке 1.1. С помощью управляющего устройства 1 формировался массив экспериментальных данных, содержащих мгновенные значения сигнала, возбуждавшего вихревые токи в образце. Этот массив подавался на вход формирователя сигнала 2, состоявшего из тактируемого цифро-аналогового преобразователя и фильтра низкой частоты на выходе. Синтезированный аналоговый сигнал $u_1(t)$ направлялся на вход измерительной цепи, состоявшей из последовательно включенного параметрического датчика 3 с индуктивностью L , активным сопротивлением r и образцового сопротивления R . Временные развертки входного сигнала $u_1(t)$ и выходного сигнала $u_2(t)$ регистрировались синхронно с помощью аналого-цифровых преобразователей 4 и 5 соответственно. В результате измерений получали массивы данных $\{u_n^{(1)}\}$ и $\{u_n^{(2)}\}$, описывавшие соответственно входной и выходной сигналы. Эти данные передавались для дальнейшей обработки управляющему устройству.

Для используемой схемы измерений связь между входным $u_1(t)$ и выходным $u_2(t)$ сигналами описывалась с помощью следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{du_2}{dt} + \frac{R+r}{L}u_2 = \frac{R}{L}u_1. \quad (1.1)$$

При анализе спектра частот регистрируемых сигналов к формуле (1.1) применялось преобразование Фурье, приводившее к следующей связи между фурье-образом \hat{U}_1 функции $u_1(t)$ и фурье-образом \hat{U}_2 функции $u_2(t)$ соответственно:

$$\hat{U}_2 = \frac{R}{R + r + j\omega L} \hat{U}_1 = \dot{K}(j\omega) \hat{U}_1, \quad (1.2)$$

где $\dot{K}(j\omega)$ – комплексный коэффициент передачи на частоте ω для измерительной цепи, $j = \sqrt{-1}$.

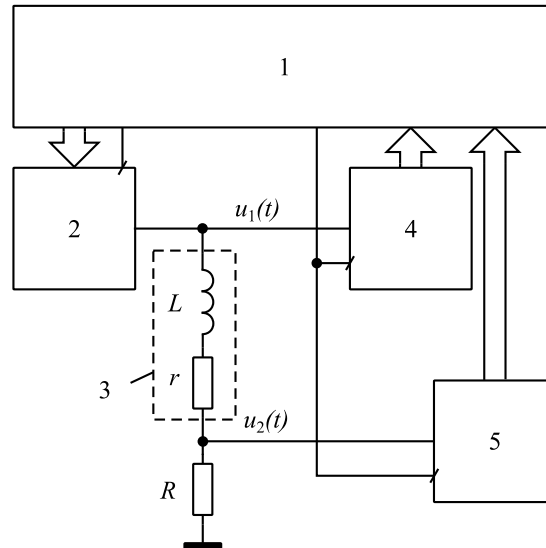


Рисунок 1.1. Структурная схема вихретоковых измерений.

1 - массив мгновенных значений возбуждающего вихревые токи сигнала, 2 - тактируемый цифро-аналоговый преобразователь и фильтр низких частот, 3 - параметрический вихретоковой датчик, 4 - аналого-цифровой преобразователь для входного сигнала, 5 - аналого-цифровой преобразователь для выходного сигнала.

Для уменьшения погрешности измерений комплексных амплитуд напряжения и тока была использована цифровая обработка регистрировавшихся сигналов, заключающаяся в том, что мгновенные значения этих сигналов аппроксимировались линейной комбинацией трех первых функций Уолша [41-42]:

$$y(x) = b_0 \text{wal}(0, x) + b_1 \text{wal}(1, x) + b_2 \text{wal}(2, x) \quad (1.3)$$

где $\text{wal}(0, x)$, $\text{wal}(1, x)$, $\text{wal}(2, x)$ – первая, вторая и третья функции Уолша соответственно, $x = t/T$ относительное время, T – период сигнала, коэффициенты b_0 , b_1 и b_2 определялись путем обработки экспериментальных данных согласно [8].

1.2. Метод многочастотных вихретоковых измерений, основанный на применении сигналов специальной формы

Основной задачей при проведении многочастотного вихретокового контроля является повышение точности определения параметров датчика в широком диапазоне частот. Достижимая точность должна обеспечить разделение влияния различных факторов. При построении годографов, как правило, используется последовательный перебор частот. Значительное число отдельных измерений требует больших затрат времени и сопровождается дополнительными искажениями из-за действия случайных факторов.

В настоящей работе развит новый метод получения экспериментальных годографов, позволяющий построить их с нужной точностью при одном измерении. Этот метод основан на возбуждении вихретокового датчика специально формируемым сигналом, который содержит необходимый набор фиксированных частот. Содержание предложенного метода заключалось в следующем.

Для измерения параметров датчика на вход измерительной цепи подавался сигнал $u_1(t)$, формируемый путем суперпозиции M гармонических сигналов с частотами $\omega_1, \dots, \omega_M$:

$$u_1(t) = u_0 \sum_{m=1}^M \sin(\omega_m t), \quad (1.4)$$

где u_0 – коэффициент, ограничивающий максимальное значение сигнала $u_1(t)$. Фурье-образ выходного сигнала записывался в виде выражения, следующего из уравнений (1.2) и (1.3):

$$\hat{U}_2 = \sum_{m=1}^M \dot{K}(j\omega_m) \hat{U}_{1m}, \quad (1.5)$$

где \hat{U}_{1m} – фурье-образ функции $u_0 \sin(\omega_m t)$. Выражение (1.5) показывало, что выходной сигнал имел вид линейчатого спектра, содержащего информацию о параметрах датчика на соответствующих частотах. Для нахождения характеристик датчика использовались экспериментальные массивы данных $\{u_n^{(1)}\}$ и $\{u_n^{(2)}\}$, которые определялись с частотой дискретизации ω_a и содержали N элементов. Спектр сигналов анализировался с помощью дискретного

преобразования Фурье. Комплексные амплитуды дискретных фурье-преобразований $\dot{U}_k^{(1)}$ и $\dot{U}_k^{(2)}$ соответственно для входного и выходного сигналов имели следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_k^{(1)} = \sum_{n=0}^{N-1} u_n^{(1)} e^{-j\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)} \\ \dot{U}_k^{(2)} = \sum_{n=0}^{N-1} u_n^{(2)} e^{-j\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)} \end{cases} \quad (1.6)$$

Эти амплитуды соответствовали частоте

$$\omega_k = \frac{\omega_a}{N} k, \quad (1.7)$$

где $k=0, 1, \dots, N-1$.

Дискретный спектр сигнала, используемого при измерениях, приведен на рисунке 1.2 для двух различных случаев (по оси абсцисс отложены частоты $f = \omega/2\pi$ в логарифмическом масштабе, по оси ординат – амплитуды A в децибелах). В первом случае применялся набор частот, соответствовавший условию (1.7), во втором - частоты условию (1.7) не удовлетворяли. Из рисунка 1.2а следовало, что в первом случае значения амплитуд практически не изменялись, а во втором случае имел место существенный разброс амплитуд (рисунок 1.2b), что вызвано несовпадением частот ω_m и ω_k .

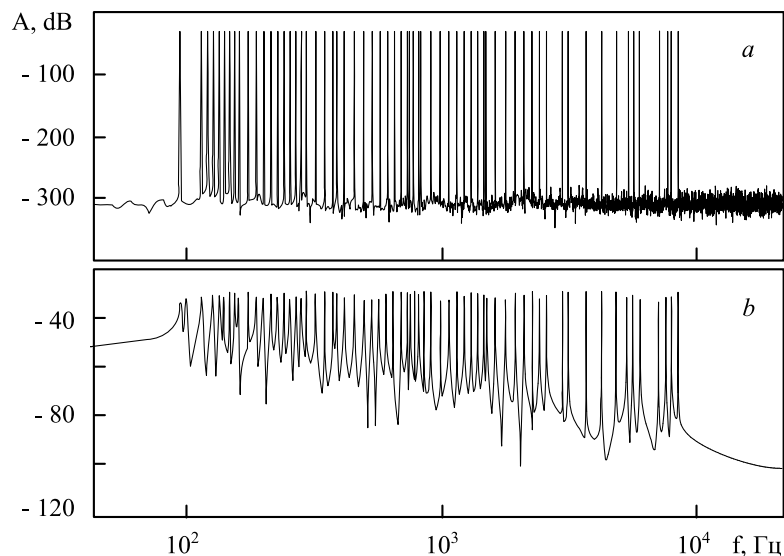


Рисунок 1.2. Дискретный спектр сигнала.

a – частоты соответствуют условию (6), b – произвольный набор частот

Для расчета параметров датчика использовалось соотношение между

комплексными амплитудами входного и выходного сигналов, получаемое из соотношений (1.2) и (1.6) и имевшее вид

$$\dot{U}_k^{(2)} = \frac{R}{R+r+j\omega_k L} \dot{U}_k^{(1)} \quad (1.8)$$

При вычислениях в массивах амплитуд $\dot{U}_k^{(1)}$ и $\dot{U}_k^{(2)}$ учитывались значения с индексами $k(m)$, отвечающими частотам $\omega_1, \dots, \omega_M$, формирующим сигнал (1.4). Искомые параметры вихретокового датчика X и r для фиксированных частот ω_m определялись по формулам, следовавшим из выражения (1.8):

$$X(\omega_m) = \omega_m L(\omega_m) = R \frac{U_{k(m)}^{(1)}}{U_{k(m)}^{(2)}} \sin(\varphi_{k(m)}^{(1)} - \varphi_{k(m)}^{(2)}) \quad (1.9)$$

$$r(\omega_m) = R \left[\frac{U_{k(m)}^{(1)}}{U_{k(m)}^{(2)}} \cos(\varphi_{k(m)}^{(1)} - \varphi_{k(m)}^{(2)}) - 1 \right] \quad (1.9)$$

Здесь $U_{k(m)}^{(1)}$ и $U_{k(m)}^{(2)}$, $\varphi_{k(m)}^{(1)}$ и $\varphi_{k(m)}^{(2)}$ — соответственно амплитуды и начальные фазы, полученные из соотношений (1.6).

1.3. Применение виртуальных приборов при обработке результатов испытаний

В настоящем проекте для автоматизации проводимых измерений использовалась технология, основанная на применении виртуальных приборов. Это обеспечивало дополнительную гибкость измерительно-вычислительной системы при изменении условий испытаний [43]. Построение экспериментальных годографов системы «вихретоковой датчик – контролируемый образец» проводилось по алгоритму, описанному в разделе 1.2. Непосредственная обработка регистрируемых сигналов и последующий расчет годографов проводились в среде графического программирования LabView компании National Instruments. Блок-схема разработанного виртуального прибора приведена на рисунке 1.3. Этот виртуальный прибор обеспечивал обработку массива экспериментальных данных с помощью дискретного преобразования Фурье и расчет комплексных амплитуд для входного и выходного сигналов. Использование интервала частот, описанного в разделе 1.2, осуществлялся с помощью виртуального подприбора, блок-схема которого представлена на рисунке 1.4. Выборка результатов осуществлялась на этапе их обработки, для вывода данных применялся формат txt. Используемые виртуальные приборы позволяли за время измерений проводить параллельные вычисления необходимых параметров, расчет и графическое представление экспериментальных годографов.

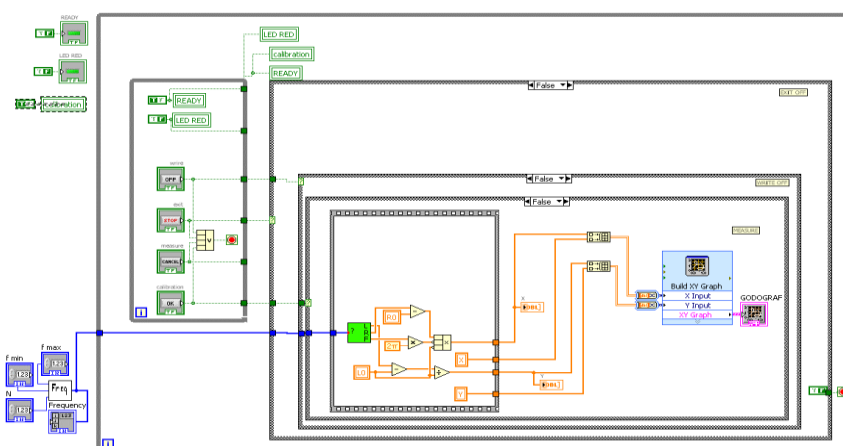


Рисунок 1.3. Блок-схема виртуального прибора для расета годографов.

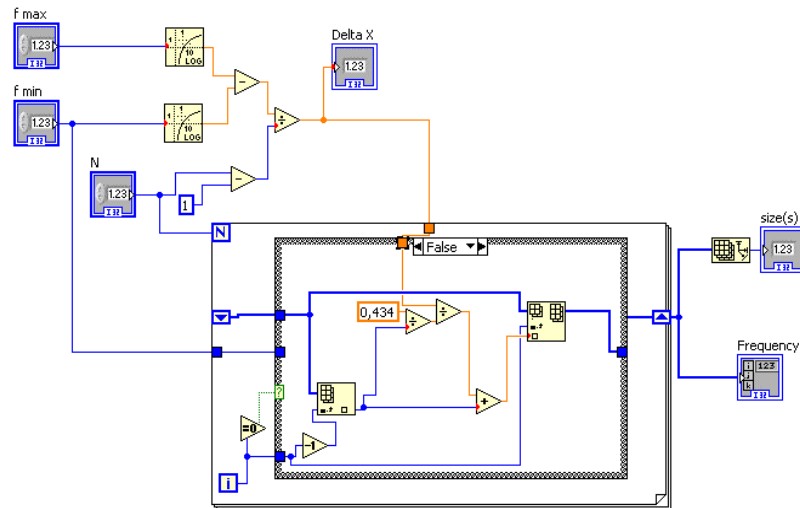


Рисунок 1.4. Виртуальный подприбор расчета частот.

При осуществлении вихретоковых испытаний измерения проводились в двух вариантах - без контролируемого образца и с образцом. На каждой фиксированной частоте ω_m рассчитывались изменения реактивного сопротивления $\Delta X(\omega_m) = X(\omega_m) - X_0(\omega_m)$ и активного сопротивления $\Delta r(\omega_m) = r(\omega_m) - r_0(\omega_m)$, здесь $X(\omega_m)$ и $r(\omega_m)$ – параметры датчика с образцом на частоте ω_m ; $X_0(\omega_m)$ и $r_0(\omega_m)$ – параметры датчика без образца на этой же частоте. Далее строились годографы, которые для анализа результатов измерений графически представлялись в координатах « $\Delta X/X_0 - \Delta r/X_0$ ».

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛЯ НЕМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

2.1. Экспериментальные годографы при использовании проходных параметрических датчиков

Изложенная в разделе 1 модификация метода многочастотных вихретоковых измерений была апробирована путем проведения испытаний с помощью проходного параметрического датчика. Для случая проходного датчика известна теоретическая зависимость магнитного потока, возникающего в образце, от частоты возбуждающего тока. Это позволяет рассчитать теоретический годограф системы «проходной датчик – контролируемый образец» и сопоставить его с годографом, полученным в эксперименте.

Расчет теоретических годографов проводился следующим образом. Комплексная амплитуда магнитного потока $\dot{\Phi}$ в длинном цилиндрическом образце, помещенном внутрь соленоида, находилась из уравнений Максвелла. Согласно [1] эта величина может быть описана выражением

$$\dot{\Phi} = 2\mu\eta \frac{1}{\sqrt{jy}} \frac{I_1(\sqrt{jy})}{I_0(\sqrt{jy})} \dot{\Phi}_0, \quad (1.10)$$

где $\dot{\Phi}_0$ – комплексная амплитуда магнитного потока при отсутствии образца в соленоиде, $I_0(\sqrt{jy})$ и $I_1(\sqrt{jy})$ – модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно, $y = 0,5d\sqrt{\mu_0\mu\sigma\omega}$ – обобщенный вихретоковый параметр, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ – относительная магнитная проницаемость материала образца (для немагнитных материалов $\mu = 1$), σ – удельная электрическая проводимость материала образца; ω – частота возбуждающего синусоидального тока; η – коэффициент заполнения датчика образцом. С другой стороны, комплексная амплитуда магнитного потока в образце может быть выражена через изменения реактивного сопротивления $\Delta X/X_0$ и активного сопротивления $\Delta r/X_0$ следующей формулой:

$$\dot{\Phi} = \left(\frac{\Delta X}{X_0} + \eta - j \frac{\Delta r}{X_0} \right) \dot{\Phi}_0. \quad (1.11)$$

Из формул (1.11) и (1.10) следует, что координаты годографа $\Delta X/X_0$ и $\Delta r/X_0$

связаны с относительной величиной магнитного потока $\dot{\Phi}/\dot{\Phi}_0$ соотношениями

$$\begin{cases} \frac{\Delta X}{X_0} = \operatorname{Re}(\dot{\Phi}/\dot{\Phi}_0) - \eta \\ \frac{\Delta r}{X_0} = -\operatorname{Im}(\dot{\Phi}/\dot{\Phi}_0) \end{cases} \quad (1.12)$$

Полученные формулы были использованы для расчета теоретических годографов для различных значений коэффициента заполнения датчика образцом η . Этот коэффициент задается формулой

$$\eta = d^2/D^2, \quad (1.13)$$

где d – диаметр образца, D – диаметр датчика. На рисунке 2.1 теоретические годографы приведены для значений коэффициента заполнения $\eta = 0,5$ (кривая a), $\eta = 0,63$ (кривая b), $\eta = 0,7$ (кривая c). Верхняя часть годографа описывает низкие частоты ω , при росте частоты точки годографа смещаются вниз. Влияние коэффициента заполнения проявляется в расхождении центральных и нижних участков годографа при росте значений η вследствие увеличения влияния образца на проходной датчик.

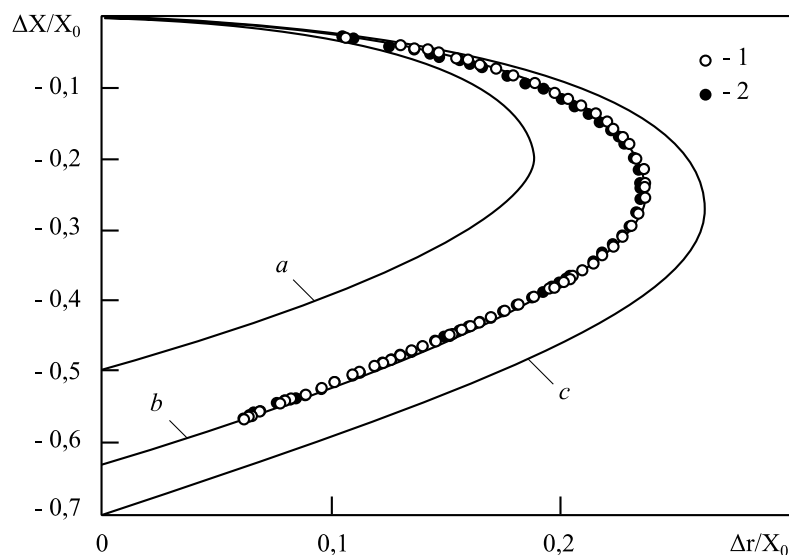


Рисунок 2.1. Годографы для проходного параметрического датчика.

Коэффициент заполнения, a : $\eta = 0,5$; b : $\eta = 0,63$; c : $\eta = 0,7$;

1 – измерения для сигнала с набором частот согласно условию (1.6);

2 – измерения для сигнала с произвольным набором частот.

Экспериментальные измерения проводились для датчика, представлявшего собой длинный соленоид, по оси которого помещался исследуемый образец в виде цилиндра из исследуемого материала. Эффективный диаметр датчика составлял $D=29$ мм, длина катушки равнялась 240 мм. Цилиндрический образец был изготовлен из алюминиевого сплава Д16 с магнитной проницаемостью $\mu=1$ и удельной электрической проводимостью $\sigma=22\pm 1$ МСм/м. Диаметр цилиндра составлял $d=23$ мм, что соответствовало $\eta=0,63$, длина образца равнялась 410 мм. При формировании входного сигнала использовались $M=64$ значения частоты из диапазона от 90Гц до 9 кГц. Для оценки влияния эффекта, связанного с несовпадением частот возбуждающего сигнала ω_m с частотами ω_k из формулы (1.7), применяли два варианта измерений. В первом варианте (рисунок 1.2а) использовались частоты, отвечающие условию (1.7), при этом значение ω_a определялось частотой дискретизации аналого-цифровых преобразователей ($f_a = 44100$ Гц) и равнялось $\omega_a = 2\pi f_a$. Во втором варианте (рисунок 1.2б) использовался произвольный набор частот из указанного диапазона. Результаты измерений в виде экспериментальных годографов приведены на рисунке 2.1 в виде точек (точки 1 описывали первый вариант, точки 2 – второй вариант).

Из рисунка 2.1 следует, что экспериментальные точки укладываются на теоретическую кривую b , соответствующую эмпирическому значению коэффициента заполнения $\eta=0,63$. Рисунок 2.1 свидетельствует также, что точки 1 и 2 для обоих вариантов измерений ложатся на одну линию годографа. Это показывает, что выбор частот возбуждающего сигнала практически не сказывается на результатах построения годографа.

2.2. Экспериментальные годографы при использовании накладных параметрических датчиков

При контроле изделий в реальных условиях применяются, как правило, накладные датчики. Случай накладных датчиков значительно более сложный для теоретического описания и не допускает проведения теоретических расчетов, подобных проведенным в разделе 2.1.. Это связано с тем, что сигнал, снимаемый с накладного датчика, зависит от существенно разных факторов,

среди которых электрические и магнитные характеристики материала, геометрические параметры образца, условий измерения. Результаты раздела 2.1 с апробацией предложенного метода вихретоковых измерений для проходного датчика свидетельствуют об эффективности и высокой точности метода, они служат основанием для проведения экспериментальных исследований с накладным датчиком.

Измерения проводились с параметрическим датчиком, представлявшим собой катушку индуктивности, помещенную в полуброневого ферритовый сердечник, диаметр датчика составлял 20 мм. При испытаниях использовался произвольный набор частот ω_m в диапазоне от 100 Гц до 8 кГц из рабочего диапазона датчика. Внешний вид датчика и измерительного блока устройства приведен на фотографии (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2. Внешний вид измерительного блока вихретокового устройства с накладным параметрическим датчиком.

Было экспериментально изучено влияние на годографы системы «накладной датчик – контролируемый образец» следующих величин, отражавших основные группы существенных для диагностики факторов: удельной электропроводности материала, геометрических размеров образца (именно, его толщины), величины зазора между датчиком и проводящей

поверхностью. В качестве исследуемых объектов использовались образцы из меди и алюминиевого сплава Д16Т. Удельные электропроводности этих материалов составляли соответственно $\sigma = 57 \pm 5$ МСм/м и $\sigma = 17 \pm 1$ МСм/м, магнитная проницаемость $\mu=1$. Образцы изготовлялись из пластин с толщинами $d = 2$ мм и $d = 20$ мм. Их размеры составляли 100x100 мм, что исключало влияние краевых эффектов. Испытания проводились при различных условиях: непосредственном контакте датчика с поверхностью образца (величина зазора $h=0$) и при зазоре $h=0,5$ мм, задаваемом с помощью диэлектрической прокладки известной толщины.

Полученные экспериментальные данные в виде годографов приведены на рисунке 2.3. Как видно из рисунка 2.3, точки, описывавшие материалы с разной удельной электропроводностью σ при одинаковых значениях зазора h и толщины образца d , ложатся на одну кривую. Это связано с тем обстоятельством, что влияние электропроводности определяется величиной обобщенного вихретокового параметра $y \sim \sqrt{\omega\sigma}$, что проявляется в сдвиге экспериментальных точек при росте значений ω из верхней ветви линии годографа в его нижнюю часть. Изменение величины зазора h проявляется в расхождении нижних ветвей линий годографа, что связано с уменьшением влияния вихревых токов на параметры датчика при его удалении от металлической поверхности.

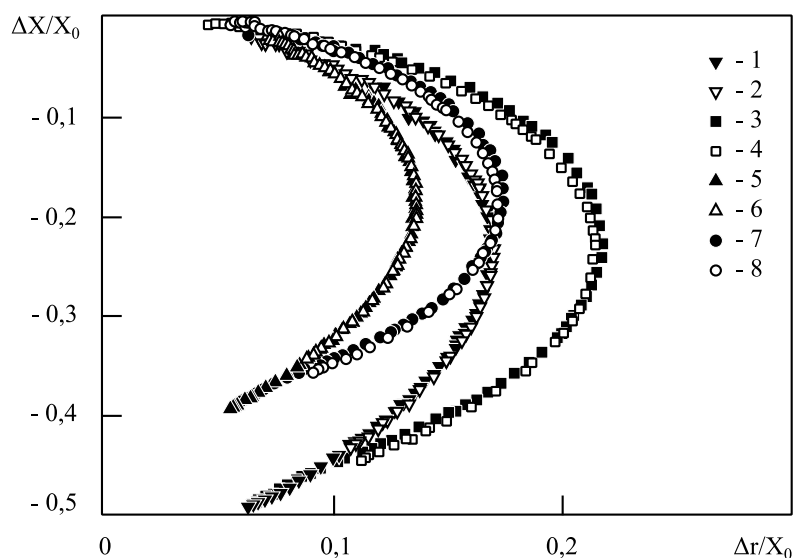


Рисунок 2.3. Влияние различных факторов на экспериментальные годографы для накладного параметрического датчика.

Величина зазора $h=0$: 1 – медная пластина ($d=20$ мм), 2 – дюралюминиевый пластина ($d=20$ мм), 3 – медная пластина ($d=2$ мм); 4 – дюралюминиевая пластина ($d=2$ мм);

Величина зазора $h=0,5$ мм: 5 - медная пластина ($d=20$ мм); 6 – дюралюминиевая пластина ($d=20$ мм); 7 – медная пластина ($d=2$ мм); 8 – дюралюминиевая пластина ($d=2$ мм).

2.3. Влияние характеристик диагностируемых объектов на экспериментальные годографы

Для круга задач вихретоковой диагностики, связанных с толщинометрией, влияние толщины образцов на вид годографов представляет самостоятельный интерес. Это влияние связано прежде всего с тем физическим обстоятельством, что на величину активных потерь в системе «накладной датчик – контролируемый образец» влияет глубина скин-слоя в материале.

В качестве материалов для испытаний были использованы плоские пластины различной толщины d , вырезанные из листов меди и алюминиевого сплава. Измерения проводились для различных значений величины зазора, задававшегося диэлектрическими прокладками. Толщины образцов d при измерениях задавались в случае меди в интервале от 1,8 мм до 22 мм, в случае

алюминия - в интервале от 1 мм до 11 мм. Величина толщин образцов была выбрана таким образом, чтобы явно проявилось влияние скин-слоя. Глубина скин-слоя составляет в меди ~ 7 мм при частоте 100 Гц и ~ 2 мм при частоте 1 кГц, в алюминии ~ 8.3 мм при частоте 100 Гц и ~ 2.6 мм при частоте 1 кГц. Величина зазора h изменялась в диапазоне от 0,2 мм до 0,6 мм.

Экспериментальные годографы, полученные при измерениях с медными образцами, приведены на рисунке 2.4 для двух различных значений зазора и четырех разных толщин пластины. Как видно из рисунка 2.4, влияние величины h на положение линий годографа при фиксированном значении d проявляется в расхождении этих линий по оси реактивных сопротивлений $\Delta X/X_0$. Данное расхождение наблюдается прежде всего для нижних ветвей годографов, описывающих высокие частоты. Это связано с зависимостью скин-слоя от частоты, именно, глубина скин-слоя пропорциональна $\omega^{-1/2}$ и при высоких частотах ω уменьшается. В связи с этим при высоких частотах влияние зазора на параметры датчика увеличивается. Из рисунка 2.4 также видно, что влияние толщины образца d при фиксированном значении h проявляется в изменении формы годографа. Выявленное изменение наиболее заметно при малых толщинах, с ростом d линии годографов сближаются и далее накладываются друг на друга. Такое поведение годографов связано с тем, что для толщин, сопоставимых с глубиной скин-слоя, влияние величины d оказывается существенным, в случае же толщин, значительно превышающих эту глубину, различия в значениях h проявляется слабее. Данное обстоятельство накладывает физическое ограничение на возможности вихретокового контроля толщины металлических образцов.

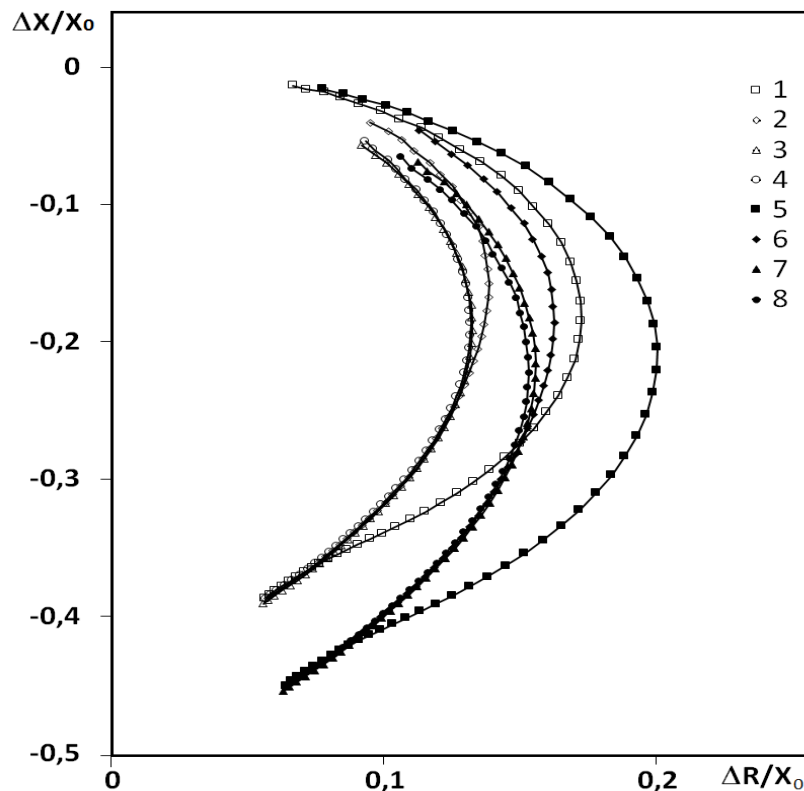


Рисунок 2.4. Экспериментальные годографы для медных образцов.

Толщина образца d : при $h = 0,6$ мм: 1 – 1,87 мм, 2 – 5,59 мм, 3 – 19,5 мм, 4 – 21,3 мм; при $h = 0,2$ мм: 5 – 1,87 мм, 6 – 5,59 мм, 7 – 19,5 мм, 8 – 21,3 мм.

Экспериментальные годографы, полученные при измерениях с алюминиевым сплавом, приведены на рисунке 2.5 на примере двух различных значений зазора и трех разных толщин пластины. Как видно из рисунка 2.5, годографы имеют вид, влияние исследуемых факторов на поведение линий годографа совершенно аналогично случаю медных образцов (рисунок 2.4). Это свидетельствует о достаточно общем характере описанных закономерностей.

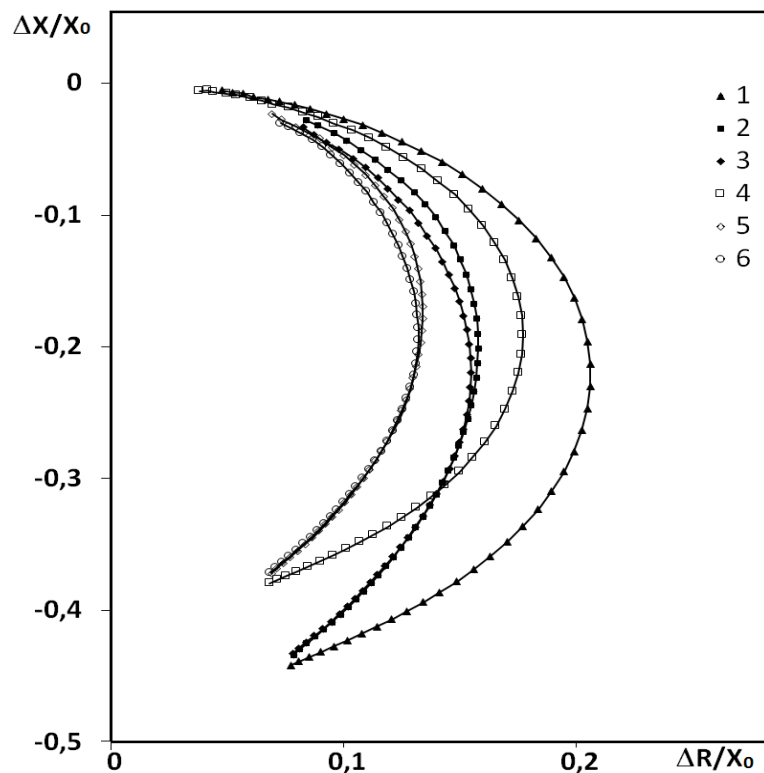


Рисунок 2.5. Экспериментальные годографы для алюминиевых образцов с диэлектрическим покрытием.

Величина зазора $h = 0.6$ мм, толщина образца d : 1 – 1.43 мм, 2 – 5.72 мм, 3 – 8.61 мм; величина зазора $h = 0.2$ мм, толщина образца d : 4 – 1.43 мм, 5 – 5.72 мм, 6 – 8.61 мм.

3. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЕКЦИОННЫХ МЕТОДОВ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ К ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВИХРЕТОКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Методы главных компонент и проекций на латентные структуры в задачах диагностики

В настоящем проекте предложен и апробирован подход к математической обработке получаемых при диагностике экспериментальных характеристик с помощью проекционных методов многомерного анализа данных. В случае вихретокового контроля такая обработка призвана обеспечить разделение факторов, влияющих на результаты многочастотных вихретоковых испытаний [44].

Для обработки получаемых массивов экспериментальных вихретоковых данных были использованы метод главных компонент, позволяющий проводить кластеризацию экспериментальных данных, то есть разделять эти данные на отдельные группы с близкими свойствами, и метод проекции на латентные структуры, обеспечивающий возможность количественного определения контролируемых характеристик по специально определенной калибровочной базе данных.

В проекционных методах многомерного анализа данных подвергаемый обработке массив экспериментальных характеристик, описывающих объект исследований или контроля, формируется в виде матрицы X . Размерность этой матрицы может быть записана как $n \times p$, где n – число экспериментальных значений измеряемых характеристик, p – число этих характеристик. В многомерном пространстве, образуемом массивом данных X , выделяются вектора, направленные вдоль наибольших изменений этих данных – так называемые главные компоненты. Первая главная компонента направлена вдоль максимальной вариации исходных данных, вторая главная компонента – вдоль следующей по величине вариации и т.д. Основная вариация данных описывается числом главных компонент, значительно меньшим, чем число исходных переменных. В результате вместо исходных данных рассматриваются их геометрические проекции на соответствующие координатные плоскости,

образованные главными осями.

Применяемое преобразование в случае метода главных компонент может быть записано в следующем виде [35]:

$$X = T \cdot P^* + E, \quad (3.1)$$

где матрица X – массив исходных данных, характеризующих исследуемые свойства, матрица «остатков» E – массив данных, непосредственно с исследуемым свойством не связанных, то есть образующих «шум», матрицы так называемых счетов T и нагрузок P (символ* означает транспонирование матрицы) определяют пространство главных компонент.

Метод главных компонент допускает наглядное представление в виде проекций точек, характеризующих исследуемые объекты, на плоскость выбранных главных компонент. В качестве точки многомерного пространства выступает совокупность характеристик, описывающих свойства объекта. Близкое расположение точек на графике проекций означает, что свойства исследуемых объектов имеют схожие характеристики. Графически такие объекты выглядят на проекциях как кластеры из близко расположенных точек.

Метод проекций на латентные (скрытые) структуры применяется в тех случаях, когда известны и могут быть использованы данные, описывающие предсказываемые характеристики. Эти характеристики формируют матрицу откликов Y размерностью $n \times k$, где n – число экспериментальных значений измеряемых характеристик, как и в методе главных компонент, а k – число принадлежностей тому или иному объекту. Применяемые преобразования в случае метода проекций на латентные структуры могут быть описаны следующими выражениями [36]:

$$X = T \cdot P^* + E, \quad (3.2)$$

$$Y = U \cdot Q^* + F. \quad (3.3)$$

Здесь матрицы U и Q соответствуют счетам и нагрузкам для пространства откликов Y , F описывает матрицу остатков для откликов Y . При использовании метода проекций на латентные структуры предварительно получают матрицу калибровочных зависимостей между X и Y . Эти зависимости находятся экспериментально до проведения исследований или диагностики и выступают в качестве обучающей выборки. Далее на основе калибровочной выборки с

помощью известных соотношений между X и Y проводится определение неизвестных значений исследуемых характеристик.

3.2. Диагностика физических и геометрических характеристик немагнитных материалов

Обработка результатов вихретоковых измерений с помощью метода главных компонент, изложенного в разделе 3.1, проводилась на примере образцов, изготовленных из листовой меди и алюминия. Контролируемыми характеристиками являлись толщина металлической пластины d и величина зазора h , задававшаяся диэлектрическими прокладками. Соответствующие экспериментальные годографы были описаны в разделе 2. Как следует из рисунков 2.4 и 2.5, изображающие годографы кривые перекрываются. Как следствие, одновременно контролировать несколько величин весьма затруднительно. Это свидетельствует о необходимости разработки новых математических методов обработки информативных сигналов, которые смогли бы обеспечить разделение контролируемых характеристик.

В случае вихретоковой диагностики информативными параметрами, формирующими вектор признаков, являются результаты измерений изменения активного и реактивного сопротивлений датчика. Эти две величины – $\Delta X/X_0$ и $\Delta r/X_0$ – выступали в качестве координат точек многомерного пространства. Каждый образец, характеризуемый конкретными значениями удельной электропроводности, величины зазора и геометрическими размерами (толщиной) образца, описывался одной точкой в $2n$ -мерном пространстве, где n – число частот использованного набора частот. Полученные с помощью описанной процедуры данные представлялись в виде проекций на плоскости двух первых главных компонент. На этих проекциях точки, описывавшие образцы с близкими характеристиками, располагались вблизи друг от друга, образуя кластеры. Тем самым обеспечивалось выделение скрытых закономерностей и кластеризация результатов многочастотных вихретоковых измерений.

Расчеты по методу главных компонент в случае меди проводились на примере трех разных значений зазора и пяти различных толщин металлической

пластины. Результаты расчетов в виде проекций на плоскость первых двух главных компонент приведены на рисунке 3.1. Как видно из рисунка 3.1, образцы с одинаковыми значениями d и h образовывали кластеры близко расположенных точек. Кластеры, которые характеризовали образцы разной толщины с одним и тем же значением зазора, разбились на обособленные группы. Эти группы располагались вдоль линий, разнесенных на плоскости первых главных компонент вдоль оси PC1. Это означало, что главная ось PC1 описывала разделение образцов по величине зазора. Кластеры, которые отражали измерения с разными значениями толщины при одном и том же зазоре, с ростом толщины медной пластины сближались и при больших толщинах перекрывались. Это связано со спецификой влияния скин-слоя, приводящей к низкой различимости толщин, существенно превышавших его глубину. Расположение точек на рисунке 3.1 показывало, что главная ось PC2 отвечала за толщину металлической пластины.

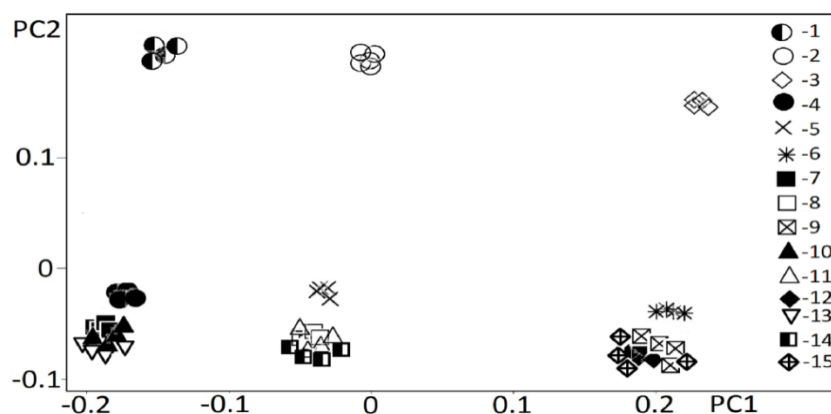


Рисунок 3.1. Проекция экспериментальных данных на плоскость первых главных компонент для медных пластин.

Значения d при $h = 0$: 1 – 1,87 мм, 4 – 5,59 мм, 7 – 7 мм, 10 – 19,5 мм,
13 – 21,3 мм;

при $h = 0,2$ мм: h : 2 – 1,87 мм, 5 – 5,59 мм, 8 – 7,52 мм, 11 – 19,5 мм,
14 – 21,3 мм;

при $h = 0,6$ мм: 3 – 1,87 мм, 6 – 5,59 мм, 9 – 7,52 мм, 12 – 19,5 мм,
15 – 21,3 мм.

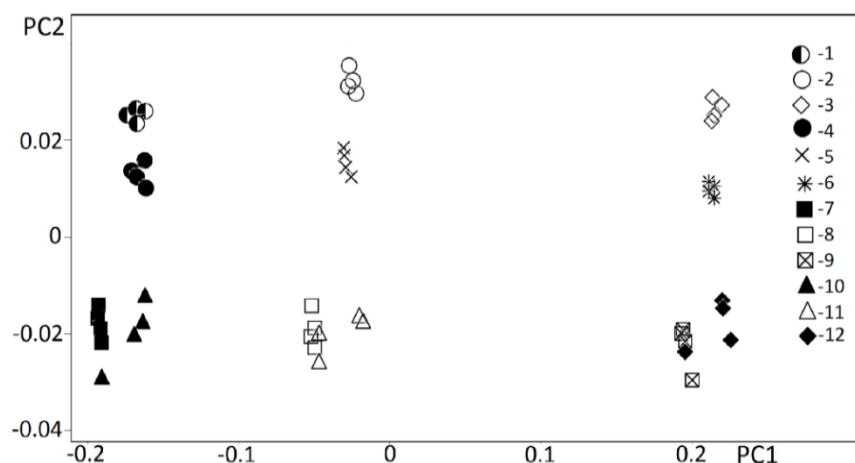


Рисунок 3.2. Проекция экспериментальных данных на плоскость первых главных компонент для медных пластин с близкими толщинами.

Значения d при $h = 0$: 1 – 5,59 мм, 4 – 7,52 мм, 7 – 19,5 мм, 10 – 21,3 мм;
 при $h = 0,2$ мм: 2 – 5,59 мм, 5 – 7,52 мм, 8 – 19,5 мм, 11 – 21,3 мм;
 при $h = 0,6$ мм: 3 – 5,59 мм, 6 – 7,52 мм, 9 – 19,5 мм, , 12 – 21,3 мм.

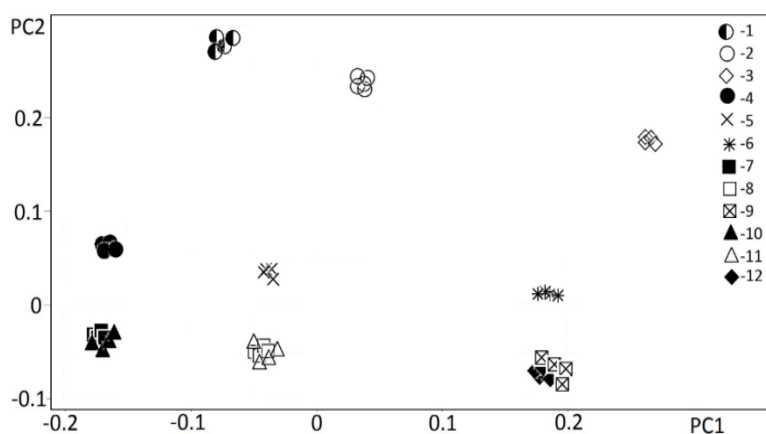


Рисунок 3.3. Проекция экспериментальных данных на плоскость первых главных компонент для алюминиевых пластин.

Толщина покрытия $s = 0$, толщина образца h : 1 – 1.43 мм, 4 – 2.85, 7 – 5.72 мм, 10 – 8.61 мм; $s = 0.2$ мм, h : 2 – 1.43 мм, 5 – 2.85 мм, 8 – 5.72 мм, 11 – 8.61 мм, 14 – 21.3 мм; $s = 0.6$ мм, h : 3 – 1.43 мм, 6 – 2.85 мм, 9 – 5.72 мм, 12 – 8.61 мм.

Уменьшение интервала значений толщин позволяет повысить точность контроля. В качестве примера на рисунке 3.2 приведены результаты расчетов для интервала толщин от 5 мм до 21 мм. Видно, что группы точек, формировавшие общие кластеры на рисунке 3.1, разбились на отдельные кластеры.

Результаты расчетов для алюминия представлены на рисунке 3.3 для трех различных значений толщин металлической пластины и трех значений зазора. Как видно из рисунка 3.3, образцы с одинаковыми значениями d и h образовывали кластеры из близко расположенных точек. Кластеры, характеризовавшие образцы разной толщины при одном и том же зазоре, разбились на обособленные группы. Эти группы располагались по линиям, разнесенным на плоскости первых главных компонент вдоль оси PC1. Кластеры, соответствовавшие измерениям с разными значениями толщин, с ростом d сближались и при больших значениях h перекрывались. В целом интерпретация результатов для алюминия совершенно аналогична случаю медных образцов. Таким образом, рисунки 3.1, 3.2 и 3.3 показывают, что применение метода главных компонент позволило разделить контролируемые факторы и представить это разделение в наглядном виде и удобном для анализа виде.

4. АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ С РАЗЛИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ

4.1. Экспериментальная установка для механических и акустико-эмиссионных испытаний

Исследование деформационного поведения и акустико-эмиссионных свойств материалов проводилось на автоматизированной установке механических испытаний в условиях статического растяжения. Структурная схема установки приведена на рисунке 4.1. Деформация образца 1 проводилась на испытательной машине 2, запись сигналов в файл проводили в ЭВМ 6 совместно с данными, полученными от датчиков силы 7 и деформации 8. Одновременно с механическими характеристиками регистрировались сигналы акустической эмиссии. Это осуществлялось с помощью пьезоэлектрического преобразователя 3, сигнал с которого усиливался усилителем 4 и оцифровывали платой сбора данных 5. Для ввода аналоговых сигналов в управляющую ЭВМ использовалась плата сбора данных PCI-1714, представлявшая собой 4-канальную плату аналогового ввода, предназначенную для применения в исследовательских лабораториях на автоматизированном испытательном оборудовании.

Нагружение проводилось по «жесткой» схеме с постоянной скоростью растяжения. Образцы для испытаний имели стандартную плоскую форму с размерами рабочей части 5x15x50 мм. В процессе нагружения регистрировались приложенная нагрузка F и абсолютная деформация Δl в интервале деформаций вплоть до разрушения. По значениям F и Δl рассчитывались истинное напряжение σ и истинная (логарифмическая) деформация ε и далее строились кривые деформационного упрочнения в условных и истинных координатах. Для выделения стадий деформационного упрочнения материала рассчитывался коэффициент деформационного упрочнения K :

$$K = d\sigma/d\varepsilon \quad (4.1)$$

Стадии упрочнения определялись по виду зависимости $K(\varepsilon)$ [45].

Одновременно с механическими характеристиками по методике [46]

измерялись сигналы акустической эмиссии. Акустико-эмиссионные сигналы представлялись в виде зависимостей среднеквадратичных значений напряжения U_e записанных с частотой дискретизации 2,5 МГц, от деформации ϵ . Для удобства анализа использовалось отношение U_e / U_n , где U_n - значение шума в ненагруженном состоянии. Интервал частот измерений составлял 50 Гц ... 700 кГц.

В качестве параметров, характеризующих акустические сигналы, одновременно со среднеквадратичными значениями напряжения рассчитывалась также скорость счета акустической эмиссии \dot{N} . Эта величина монотонно связана с интенсивностью потока актов акустической эмиссии. Скорость счета акустической эмиссии с помощью теоретических моделей может быть связана с коэффициентами интенсивности напряжений и параметрами трещинообразования, что делает \dot{N} удобной величиной при физической интерпретации получаемых результатов.

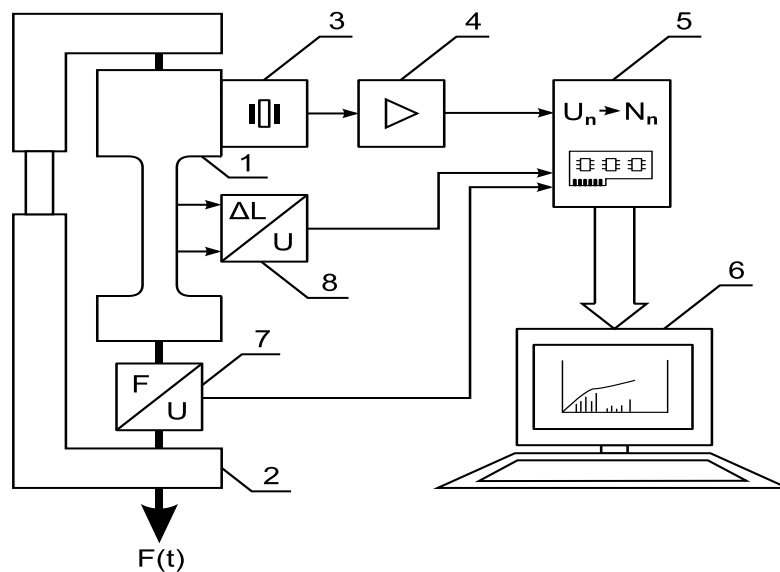


Рисунок 4.1. Блок-схема установки для регистрации параметров механических испытаний и сигналов акустической эмиссии при статическом растяжении. 1 – образец, 2 - испытательная машина, 3- пьезоэлектрический преобразователь, 4 – усилитель сигнала, 5 – плата сбора данных, 6 – ЭВМ, 7 – датчик силы, 8 – датчик деформации.

4.2. Акустическая эмиссия при пластической деформации и разрушении алюминий-магниевого сплава

В качестве материала для механических и акустико-эмиссионных испытаний использовались образцы алюминиевого сплава АМг5м в отожженном состоянии. Как отмечалось во введении, эти материалы являются удобными объектами для апробации новых методов диагностики деформационного поведения.

Результаты проведенных механических испытаний представлены на рисунке 4.2 в виде деформационных кривых $\sigma(\epsilon)$ и зависимостей $K(\epsilon)$. Как видно из рисунка 4.2, по виду кривых для коэффициента деформационного упрочнения $K(\epsilon)$ отчетливо выделяются четыре стадии: стадия линейного упрочнения I; стадии параболического упрочнения II и III, которые различаются по поведению коэффициента деформационного упрочнения; стадия предразрушения IV. Первые две стадии связаны с равномерной пластической деформацией сплава. На третьей стадии возникает неустойчивость пластического течения, которое проявляется в виде явления прерывистой текучести и сопровождается локализацией деформации в полосах Портевена – Ле Шателье [47-49]. На кривой деформационного упрочнения явление прерывистой текучести проявляется в виде скачков напряжения (рисунок 4.2).

Одновременно с механическими характеристиками по методике [15] регистрировались сигналы акустической эмиссии, результаты измерений приведены на рисунке 4.3. Рисунок 4.3 свидетельствует о существенном изменении вида сигналов при переходе от одной стадии к другой. Именно, пластическое течение на стадии I сопровождалось формированием пика акустической эмиссии. Этот пик может быть связан с выходом на границы раздела дислокационных потоков в условиях монотонного накопления деформации. На стадии II возникали высокоамплитудные осцилляции. Участок осциллирующей акустической эмиссии может быть связан с началом формирования полос локализованной деформации [50]. В области прерывистой текучести на стадии III проявлялись всплески сигналов различной амплитуды, которые отражали скачки упругого напряжения, обусловленные

формированием и развитием полос локализованной деформации [47]. Особенности акустической эмиссии на стадии предразрушения IV могут быть связаны с дополнительным вкладом от зарождения микротрещин, приводящим к трещинообразованию и последующему разрушению образца [10, 18].

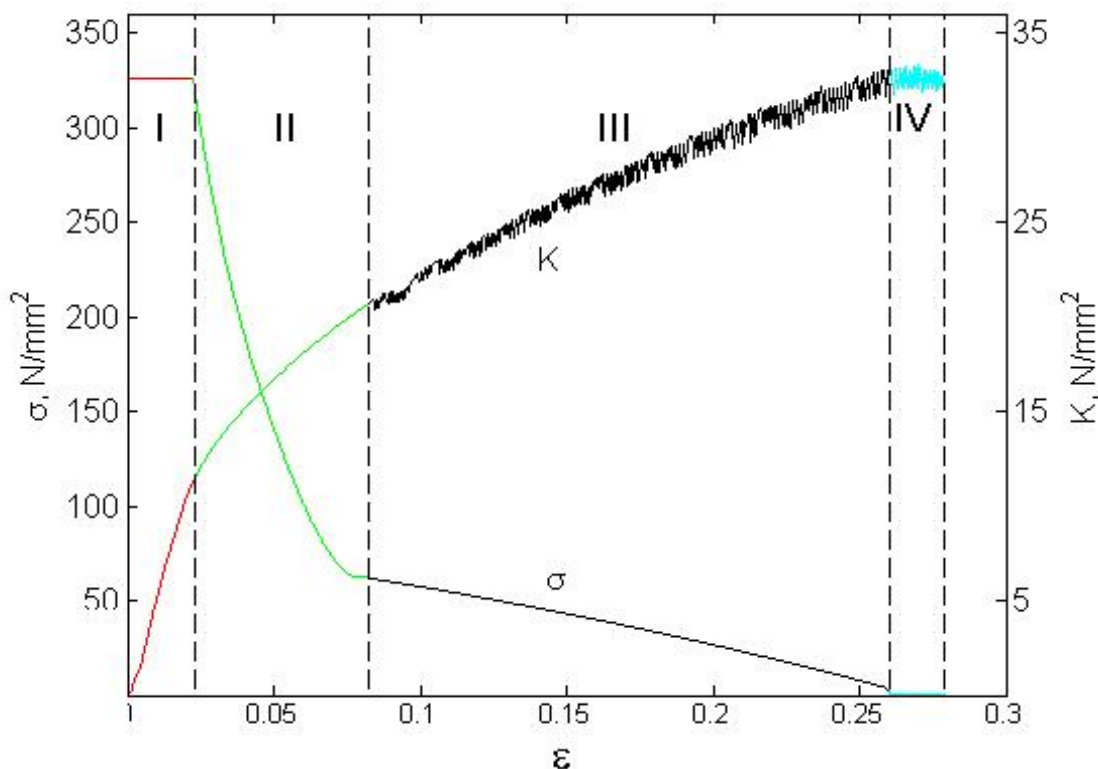


Рисунок 4.2. Деформационное упрочнение для алюминий-магниевого сплава.

I, II, III, IV - стадии пластической деформации.

Особый интерес вызывает исследование образцов алюминий-магневых сплавов, содержавших сварные соединения. Такие образцы выступали в качестве удобных модельных объектов материала с локализованной высокодефектной областью. Область сварного шва, согласно металлографическим данным, содержала различные дефекты мезоскопического масштаба, прежде всего микропоры. При нагружении возле этих дефектов в области сварного соединения возникали значительные градиенты упругих напряжений, релаксация которых приводила к преждевременному трещинообразованию.

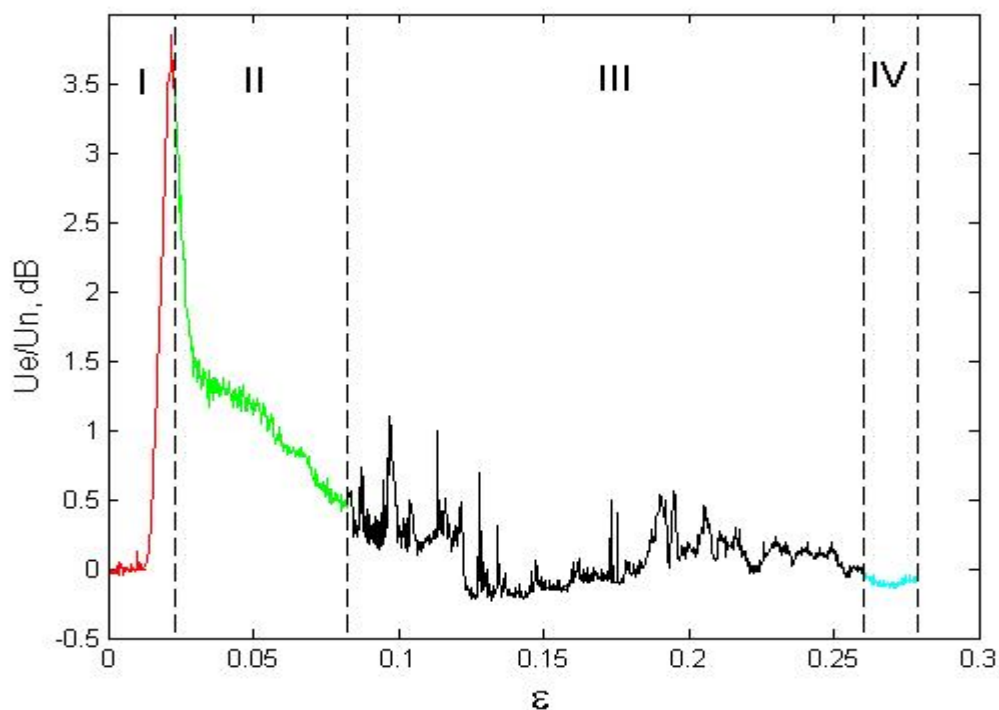


Рисунок 4.3. Акустическая эмиссия для алюминий-магниевого сплава.

I, II, III, IV - стадии пластической деформации.

Образцы, содержавшие сварное соединение, имели точно такой же вид, как образцы однородного сплава, сварной шов располагался по центру рабочей части перпендикулярно оси растяжения. Кривые деформационного упрочнения $\sigma - \epsilon$ для сварных образцов приведены на рисунке 4.4. Видно, что влияние сварного шва проявлялось прежде всего в уменьшении предельных значений напряжения и деформации. Очевидно, что это связано с отмеченным выше формированием в зоне соединения мезоскопических дефектов. Для удобства дальнейшего анализа экспериментальная кривая нагружения условно была разделена на две области. Первая из них (область *A* на рисунке 4.4) содержала стадии, соответствовавшие равномерной пластической деформации. Вторая область (обозначенная как *B* на рисунке 4.4) включала в себя стадии с неустойчивым пластическим течением и его локализацией, а также стадию с процессами предразрушения, проявлявшимися в образовании и развитии в зоне сварного шва системы микротрещин.

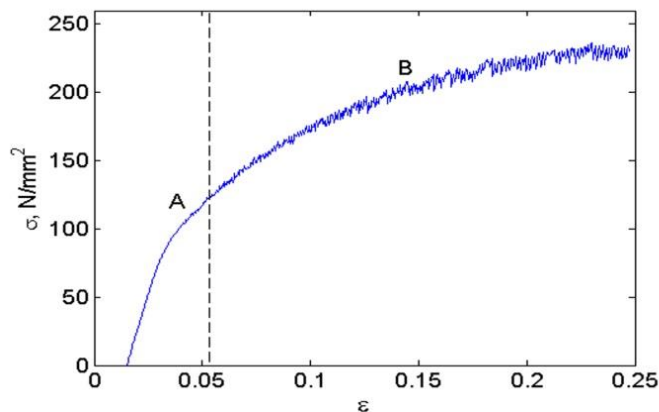


Рисунок 4.4. Деформационное упрочнение алюминиевых сплавов со сварным соединением.

Сопоставление акустической эмиссии для однородных образцов и образцов со сварным соединением приведено на рисунках 4.5 и 4.6 на примере скоростей счета акустической эмиссии (рисунок 4.5 – сплав с однородной структурой, рисунок 4.6 – со сварным соединением). Из рисунков 4.5 и 4.6 следует, что кривые $\dot{N} - \epsilon$ имеют вид с максимумом, который располагается на участке предела текучести. Наблюдается существенное различие в поведении скоростей счета при нагружении образцов с разной структурой. Именно, для сварных образцов, значения \dot{N} значительно больше по величине, что обусловлено определяющим вкладом в сигналы акустической эмиссии структуры сварного соединения. На спадающей ветви кривой акустической эмиссии в случае сварных образцов видны локальные всплески значительной амплитуды, по-видимому, связанные с формированием акустических сигналов на границах сварного шва.

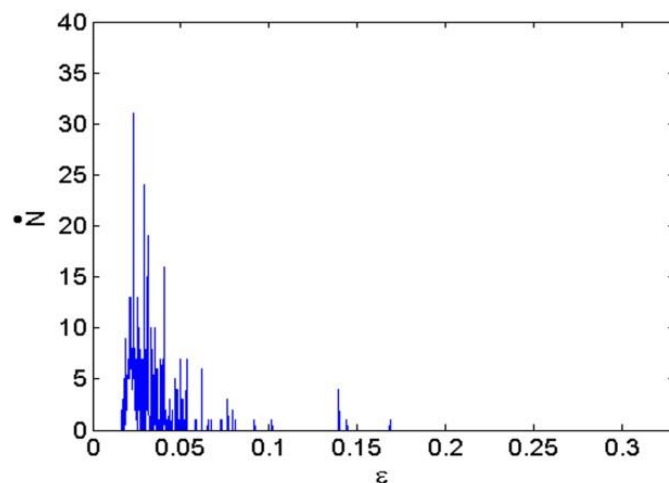


Рисунок 4.5. Скорость счета акустической эмиссии в алюминиевых сплавах с однородной структурой.

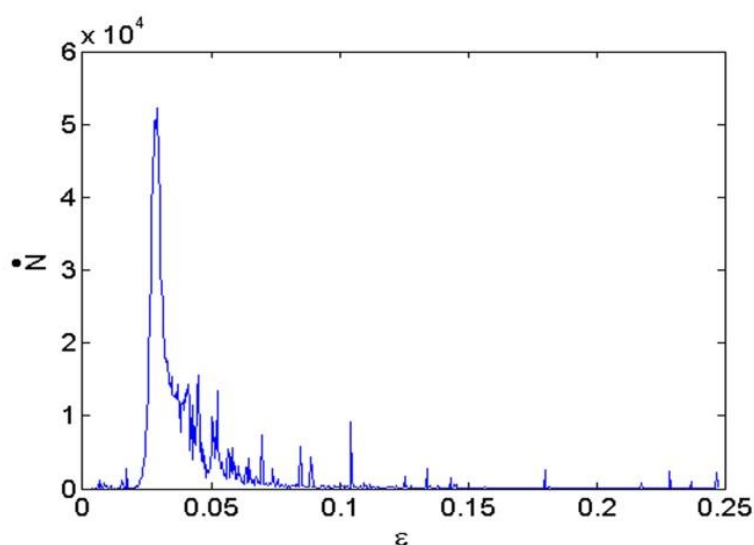


Рисунок 4.6. Скорость счета акустической эмиссии в алюминиевых сплавах со сварным соединением.

4.3. Акустическая эмиссия при пластической деформации и разрушении свинцовых сплавов

Исследование акустической эмиссии в сплавах на основе свинца представляет интерес в связи с тем, что в этих материалах при комнатной температуре развиваются деформационные процессы, характерные для большинства других металлов и сплавов при высоких температурах. В то же время в силу специфических сложностей, возникающих при нагружении свинцовых сплавов, закономерности и особенности акустической эмиссии в этом материале практически не исследованы.

В настоящем проекте в качестве материалов для испытаний применялись

образцы, полученные путем рекристаллизации из расплава при различных температурных режимах. Эти режимы приводили к формированию различной дендритной структуры в поверхностных слоях материала и разной зеренной структуры в объеме образцов [51-52]. Существенное различие в структуре между поверхностными и внутренними областями приводило к усложнению деформационного поведения и дополнительным трудностям при анализе доминирующих механизмов пластической деформации и разрушения, а также при интерпретации данных акустико-эмиссионных измерений. Химический состав свинцового сплава контролировался с помощью рентгено-флюоресцентной спектрометрии и приведен в таблице. Высокое содержание легирующих добавок обеспечивало увеличение механических свойств сплава. Испытания проводились для двух групп образцов с разными средними размерами кристаллитов R : с относительно малыми значениями $R \sim 0,1 \dots 1$ мм и с большими зернами с $R \sim 5 \dots 10$ мм.

Таблица. 4.1. Химический состав свинцового сплава

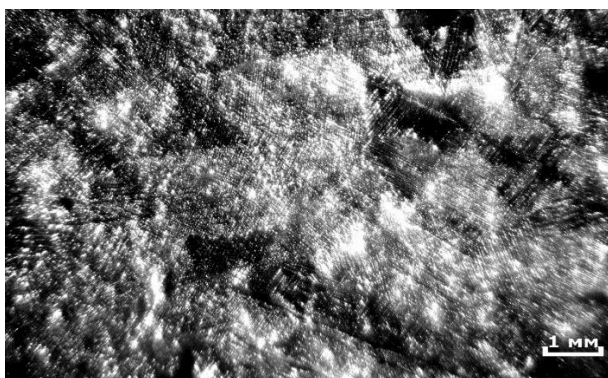
Элемент	Концентрация
Pb	89,1%
Sb	5,1%
Cd	3,2%
Ga	3,2%
Cu	0,3%
Fe	0,3%

Параметры микроструктуры контролировались с помощью оптической микроскопии. Типичные микрофотографии для полученных образцов приведены на рисунке 4.7. Кроме того, для выяснения особенностей разрушения на поверхность образцов свинцовых сплавов процарапыванием наносилась сетка с шагом ~ 1 мм. Образование магистральных трещин, распространение которых вызывало быстрое разрушение, иллюстрируется рисунком 4.8. Из рисунка 4.8 следует, что имело место движение отдельных зерен друг относительно друга как целого, то есть зернограничное

проскальзывание [53]. Трещина распространялась по сложной поверхности, проходившей в основном по границам раздела, но на отдельных участках захватывавшей объем кристаллита.



а)



б)

Рисунок 4.7. Структура свинцового сплава.

а - крупнозернистый материал, б-мелкозернистый материал

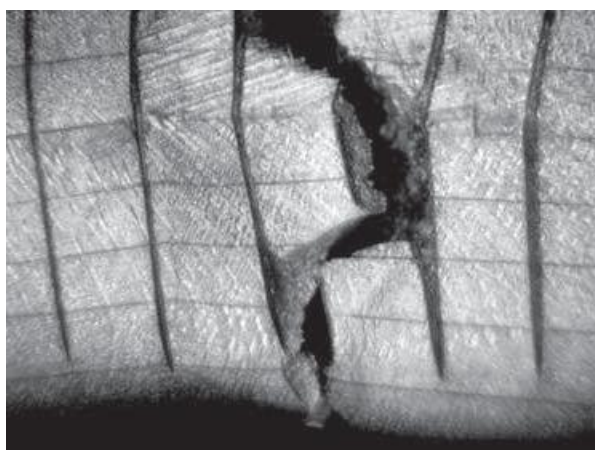


Рисунок 4.8. Разрушение свинцового сплава.

Механические свойства свинцового сплава иллюстрируют рисунки 4.9 и 4.10, на которых для сплавов с разной структурой приведены кривые нагружения в виде зависимостей приложенной нагрузки F от времени растяжения t . Отметим, что легирование привело сплава к существенному возрастанию прочностных характеристик - предела прочности и предельной деформации – по сравнению с чистым свинцом.

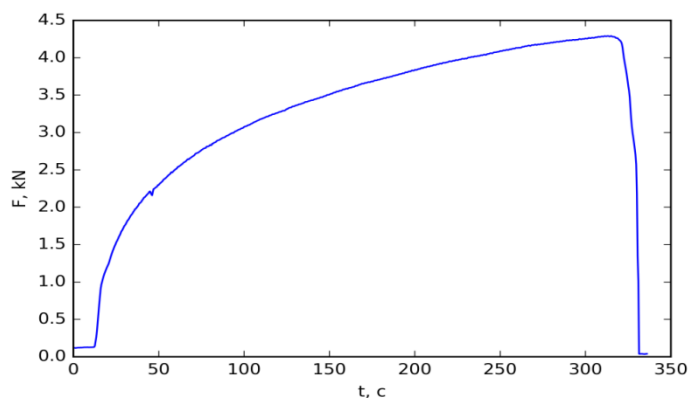


Рисунок 4.9. Кривая нагружения в крупнозернистом свинцовом сплаве.

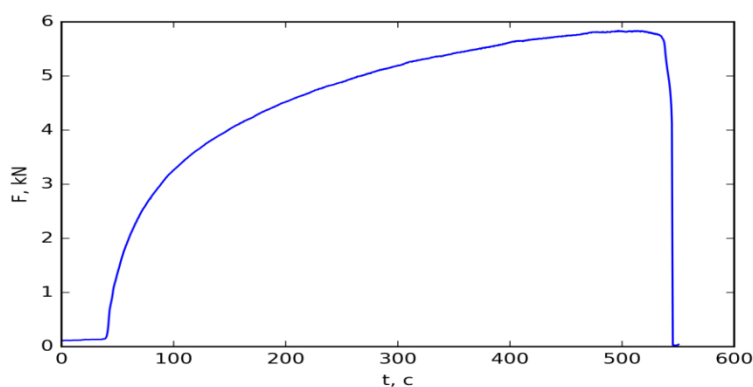


Рисунок 4.10. Кривая нагружения в мелкозернистом свинцовом сплаве.

Особый интерес представляет выявление влияния на акустическую эмиссию структуры свинцовых сплавов. На рисунках 4.11 и 4.12 приведены зависимости среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии U от времени t нагружения для образцов с крупнозернистой ($R \sim 5...10$ мм) и мелкозернистой ($R \sim 0,1...1$ мм) структурами соответственно. Из рисунков 4.11 и 4.12 следует, что на участках акустико-эмиссионных кривых, соответствующих пределу текучести, проявляются отчетливые максимумы. После прохождения этих участков кривые монотонно спадают. Сопоставление

рисунков 4.11 и 4.12 показывает, что структура свинцового сплава оказывает существенное влияние на вид акустико-эмиссионного излучения. Переходу от одной стадии деформационного упрочнения к другой в случае крупнозернистого сплава отвечает группа мощных максимумов, медленно спадающих с ростом степени деформации. В случае мелкозернистого сплава эти максимумы выражены слабо, при росте деформации они быстро исчезают. Выявленное различие, по-видимому, может быть связано с разным вкладом зернограничного проскальзывания в деформацию свинцового сплава. Этот вклад, согласно [54], является доминирующим на начальной стадии пластического течения и постепенно уменьшается с ростом деформации. Зернограничное проскальзывание может проявляться в виде акустической эмиссии при выходе на границы раздела зернограничных дислокаций. В случае сплава с мелкими зернами плотность тройных стыков между зернами велика, а поскольку эти стыки являются барьерами при движении зернограничных дислокаций, то это движение затруднено. Как следствие, максимумы акустической эмиссии проявляются относительно слабо. Для случая крупных зерен плотность тройных стыков мала, величина зернограничного проскальзывания выше, потоки зернограничных дислокаций более мощные и их выход на границы раздела сопровождается более выраженными максимумами акустической эмиссии. С этих позиций наблюдаемый спад акустической эмиссии при дальнейшем увеличении пластической деформации может быть связан с ростом вклада в пластическую деформацию внутризеренных процессов, не вызывающих мощное акустическое излучение.

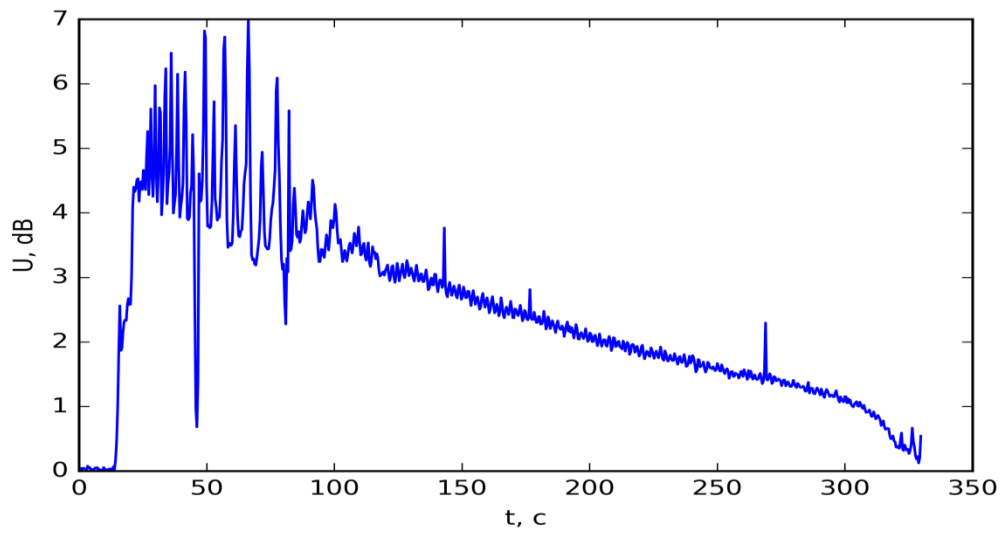


Рисунок 4.11. Акустическая эмиссия в крупнозернистом свинцовом сплаве.

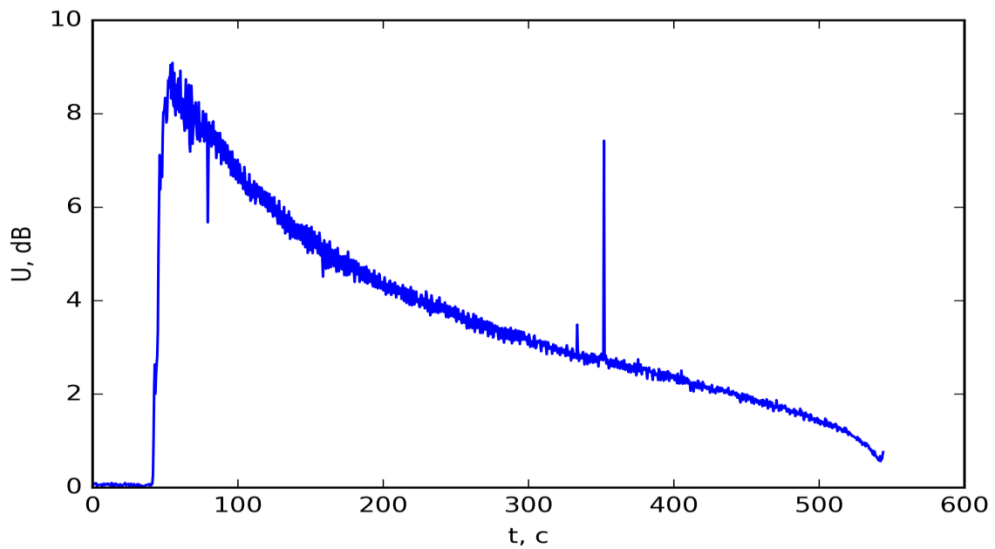


Рисунок 4.12. Акустическая эмиссия в мелкозернистом свинцовом сплаве.

5. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЕКЦИОННЫХ МЕТОДОВ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ К ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

5.1. Использование коэффициентов вейвлет-разложений акустико-эмиссионных сигналов в качестве информативных параметров

Экспериментальные результаты, приведенные в разделах 4.2 и 4.3, показывают, что вид сигналов акустической эмиссии отражает особенности протекавших в материале деформационных процессов. Однако при контроле изделий, находящихся под воздействием внешних нагрузок, обычно приходится регистрировать сигналы малой длительности, описывающие текущее состояние материала. Применять такие сигналы для диагностики стадий деформационного упрочнения и задействованных на этих стадиях процессов достаточно затруднительно. В настоящем проекте для преодоления возникающих трудностей применена математическая обработка измеряемых сигналов с помощью вейвлет-преобразования. Такое преобразование позволяет характеризовать форму акустико-эмиссионных сигналов для выделяемого временного интервала, соответствующего конкретному участку кривой деформационного упрочнения. Получаемые новые информативные параметры акустической эмиссии, то есть коэффициенты вейвлет-преобразований, далее могут быть обработаны с помощью проекционных методов многомерного анализа данных аналогично тому, как это осуществлялось в разделе 3 для вихретоковых измерений.

При проведении акустико-эмиссионных испытаний весь регистрировавшийся сигнал разбивался на временные блоки с длительностью 10^7 отсчетов, при этом общее число отсчетов за весь период измерения составляло $\sim 10^9$. Отдельный блок описывал поведение нагруженного материала на соответствующем участке кривой деформационного упрочнения $\sigma(\varepsilon)$. Далее к каждому временному блоку применялось многоуровневое дискретное вейвлет-преобразование [32].

В основе вейвлет-преобразования лежит одновременная фильтрация регистрируемого сигнала низкочастотным и высокочастотным фильтрами. Эти

фильтры строились на основе заданных вейвлет-функций, имевших следующий вид:

$$y_l[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X[k]g[2n - k], \quad (5.1)$$

$$y_h[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X[k]h[2n - k], \quad (5.2)$$

где y_l и y_h – соответственно коэффициенты вейвлет-разложения для низкочастотного и высокочастотного фильтров, g и h – значения коэффициентов для этих фильтров, X – обрабатываемый дискретный сигнал, индекс k определяет дискретное значение сигнала. Непосредственно при обработке акустико-эмиссионных сигналов применялось 9-уровневое вейвлет-разложение по базису вейвлет-функций Добеши [28]. Использованный уровень разложения был определен по минимальной величине погрешности, возникавшей при расчетах.

Полученные коэффициенты вейвлет-разложения обрабатывались далее с помощью преобразования Гильберта [55, 56]. Согласно этому преобразованию для коэффициентов $y_l[n]$ строились значения $y_g[n]$ с той же амплитудой и смещенной на $\pi/2$ фазой. В качестве информативных параметров акустической эмиссии использовались коэффициенты $E[n]$, которые находились по значениям мгновенной амплитуды:

$$E[n] = \sqrt{y_l[n]^2 + y_g[n]^2}. \quad (5.3)$$

Смысл использования этих коэффициентов заключался в том, что они описывали огибающую для низкочастотных компонент исходных сигналов в конкретном временном блоке с одновременной фильтрацией шумов в этих блоке. Полученные коэффициенты $E[n]$ формировали вектор признаков, описывавших акустическую эмиссию.

Для дальнейшей обработки применялся метод главных компонент, описанный в разделе 3.1 и апробированный для вихретоковых измерений. Согласно этому методу коэффициенты $E[n]$, рассчитанные для отдельных интервалов кривой нагружения, рассматривались как точки многомерного пространства. Выявление латентных закономерностей, которым подчинялись

эти коэффициенты, осуществлялось за счет перехода к новой системе координат, обеспечивавшей снижение размерности исходного многомерного пространства. Результаты расчетов представлялись согласно разделу 3.1 в виде проекций многомерных данных на плоскости двух первых главных компонент. Каждая из точек этой проекции описывала акустико-эмиссионный сигнал на конкретном временном блоке и отвечавшему этому блоку интервале кривой нагружения. Точки, соответствовавшие близким по виду акустико-эмиссионным сигналам, объединялись на плоскости РС1 – РС2 в кластеры.

Описанный алгоритм обработки результатов акустико-эмиссионных измерений может быть представлен в виде последовательности этапов, которая приведена на рисунке 5.1. Эта последовательность включает в себя следующие этапы:

- 1) регистрация акустико-эмиссионного сигнала;
- 2) выделение временных блоков для кривой деформационного упрочнения;
- 3) расчет коэффициентов многоуровневых дискретных вейвлет-преобразований;
- 4) построение с помощью преобразований Гильберта низкочастотной огибающей исходного сигнала;
- 5) расчет векторов признаков для аппарата многомерного анализа данных;
- 6) применение метода главных компонент для анализа акустической эмиссии.

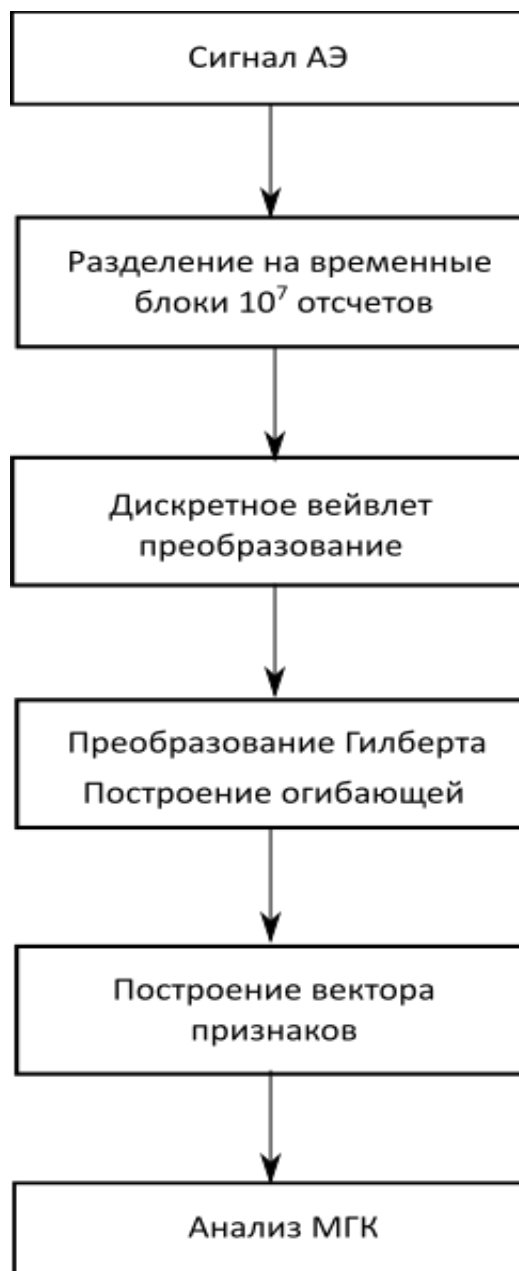


Рисунок 5.1. Алгоритм обработки акустико-эмиссионного сигнала на основе расчета коэффициентов вейвлет-разложений.

5.2. Акустико-эмиссионная диагностика алюминий-магниевых сплавов

Описанный в разделе 5.1 алгоритм был применен для обработки экспериментальных данных, полученных для сплавов на основе алюминия [57] и представленных в разделе 4.2. Результаты расчетов по методу главных компонент, описывавшие все стадии нагружения от начала растяжения до разделения образца на две части, приведены на рисунке 5.2 на плоскости двух первых главных компонент PC1 и PC2. Точки I, II, III, IV на рисунке 5.2

соответствуют стадиям пластической деформации I, II, III, IV (рисунок 4.2).

Как следует из рисунка 5.2, точки I-IV отчетливо разделились на несколько частично перекрывававшихся кластеров. Это разделение обеспечивалось первой главной компонентой PC1, которая характеризует форму низкочастотных огибающих регистрировавшихся сигналов. Другими словами, разделение вдоль компоненты PC1 отражает зависимость от времени энергии акустико-эмиссионного сигнала внутри конкретного временного блока. Таким образом, проведенная с помощью метода главных компонент обработка позволила провести кластеризацию акустико-эмиссионных сигналов по особенностям их изменений со временем. Эта кластеризация устанавливает связь между видом регистрируемых сигналов и соответствующей этим сигналам стадией деформационного упрочнения.

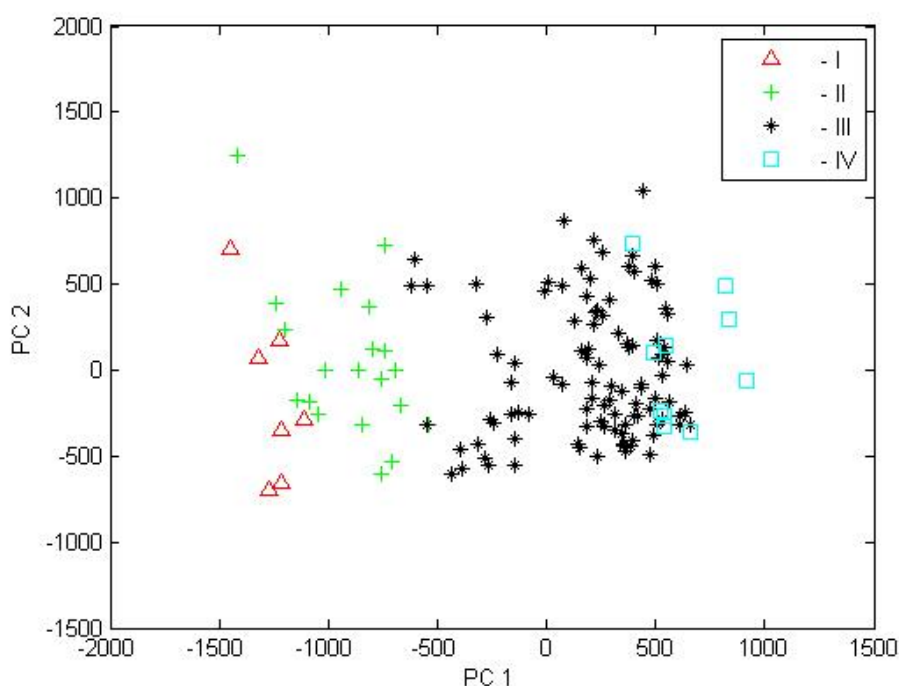


Рисунок 5.2. Проекция характеристик сигналов акустической эмиссии на плоскость первых главных компонент для алюминий-магниевого сплава. Точки I, II, III, IV соответствуют стадиям I, II, III, IV пластической деформации.

В случае алюминий-магниевых сплавов со сварными соединениями проведенные измерения показали, что различия в поведении механических и акустико-эмиссионных характеристик образцов с однородной структурой и со сварным швом на начальных стадиях пластической деформации (область А на

рисунке 4.4) относительно малы. В задачах диагностики наибольшее значение имеет выявление тех процессов, которые предвещают разрушение, то есть происходят на более поздних стадиях с неустойчивой пластической деформацией и предразрушением (область В). В силу этого изложенный в разделе 5.1 подход был применен к обработке той части акустико-эмиссионного сигнала, которая регистрировалась на стадиях области В.

Результаты проведенных расчетов представлены на рисунке 5.3 (точки 1 описывают однородные образцы, точки 2 – образцы со сварными соединениями). Как следует из рисунка 5.3, на плоскости первых главных компонент все точки разделились на два линейно разделившихся кластера. Первый из этих кластеров описывал образцы сплавов с однородной структурой, второй – образцы сплавов, содержавшие сварные швы. Таким образом, примененный метод обеспечил эффективное разделение акустико-эмиссионных сигналов, регистрировавшихся при нагружении материалов с различной структурой.

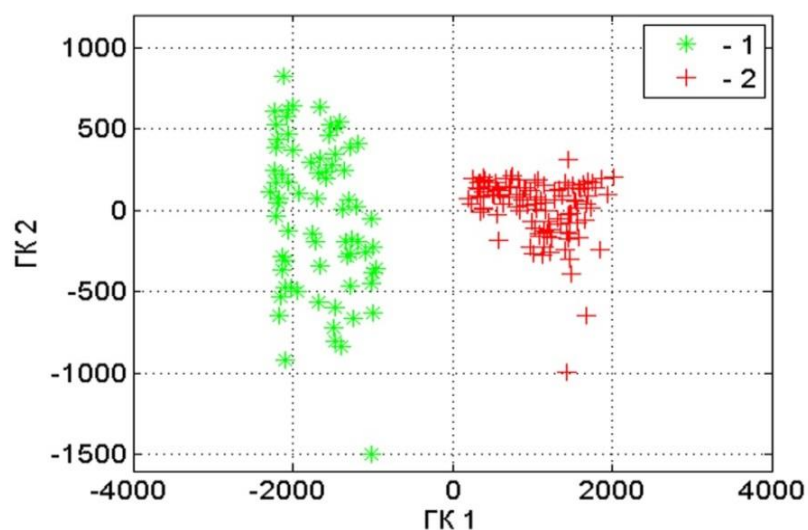


Рисунок 5.3. Проекция характеристик сигнала акустической эмиссии на плоскость первых главных компонент для алюминий-магниевого сплава со сварными соединениями.

1 – образцы с однородной структурой, 2 – образцы со сварным швом.

6. ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Перечень публикаций по результатам работы за отчетный период:

1. Егоров А.В., Поляков В.В., Лепендин А.А., Грачева Я.И. Применение сигналов специальной формы в многочастотных вихретоковых измерениях. *Автометрия*. 2017. Т. 53. №3. С. 28-35. DOI: 10.15372/AUT20170304
2. Egorov A.V., Polyakov V.V., Lependin A.A., Gracheva Ya.I. Using Signals of Special Form in Multi-Frequency Eddy Current Testing. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2017. Vol. 53. No. 3. pp. 223-229. DOI: 10.3103/S8756699017030049
3. Polyakov V.V., Gracheva Ya.J., Egorov A.V., and A.A. Lependin. Application of Special Waveform Signals for Eddy Current Testing of Materials. *AIP Conference Proceedings*. 2017. Volume 1909. Issue 1. pp. 020177-1–020177-4. doi.org/10.1063/1.5013858
4. Дмитриев А.А., Поляков В.В., Колубаев А.А. Диагностика алюминиевых сплавов со сварными соединениями на основе анализа сигналов акустической эмиссии. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2017. Т.14. №4. С. 458-463.
5. Egorov A.V., Kucheryavskiy S.V., Polyakov V.V. Resolution of effects in multi-frequency eddy current data for reliable diagnostics of conductive materials. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2017. Vol. 160. Pp. 8-12. DOI: 10.1016/j.chemolab.2016.11.00
6. Салита Д.С., Поляков В.В. Влияние структуры свинцового сплава на акустическую эмиссию при пластической деформации и разрушении. *Известия АГУ*. 2017. №1. С. 53-57.
7. Грачева Я.И., Егоров А.В., Поляков В.В., Дмитриев А.А. Автоматизированный вычислительно-измерительный комплекс для многочастотной вихретоковой диагностики металлических материалов. *Известия АГУ*. 2017. №4. С. 22-26.
8. Егоров А.В., Поляков В.В., Грачева Я.И., Кучерявский С.В. Применение метода главных компонент при вихретоковом контроле металлических материалов с диэлектрическим покрытием. *Известия АГУ*. 2017. №4. С. 33-38.
9. Грачева Я.И., Егоров А.В., Поляков В.В. Разработка виртуального

прибора для построения годографа при многочастотных вихретоковых измерениях. Сборник научных статей «Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов». Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2017. С. 196-203. ISSN 2313-6111

10. Поляков В.В., Егоров А.В., Лепендин А.А., Кучерявский С.В. Модифицированный метод многочастотных вихретоковых измерений для неразрушающего контроля немагнитных металлических материалов. Актуальные проблемы прочности: сборник тезисов LVIII Международной конференции, 16-19 мая 2017 г., г. Пермь, 2017. С. 169. Пермь: ИМСС УрО РАН, 2017. ISBN 978-5-9908245-6-0

11. Поляков В.В., Лепендин А.А., Дмитриев А.А. Диагностика качества сварных соединений с помощью многомерного анализа вейвлет-разложений сигналов акустической эмиссии. Актуальные проблемы прочности: сборник тезисов LVIII Международной конференции, 16-19 мая 2017 г., г. Пермь, 2017. С. 170. Пермь: ИМСС УрО РАН, 2017. ISBN 978-5-9908245-6-0

12. Грачева Я.И., Лепендин А.А., Поляков В.В. Применение метода главных компонент при вихретоковом исследовании дефектной структуры металлических материалов. Сборник материалов LIX Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 5-8 сентября 2017 г., VIII Международной школы «Физическое материаловедение», 3-12 сентября 2017 г., г. Тольятти. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. 334 с. - С. 185. ISBN 978-5-8259-1179-3

13. Поляков В.В., Салита Д.С., Демьянов Б.Ф. Акустическая эмиссия при пластической деформации и разрушении свинцовых сплавов. Сборник материалов VII Международной конференции "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов", 7-10 ноября 2017 г., г. Москва.– М: ИМЕТ РАН, 2017. 951с. - С. 203-204. ISBN 978-5-4465-1624-7

14. Егоров А.В., Поляков В.В., Лепендин А.А., Грачева Я.И. Вихретоковая диагностика материалов с помощью сигналов специальной формы. Тезисы докладов Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», 9-13 октября 2017 г., г. Томск. Томск: ИФПМ СО РАН, 2017. - 607 с. С. 487-488.

15. Дмитриев А.А., Поляков В.В., Салита Д.С. Исследование физических механизмов пластической деформации с помощью вейвлет-разложений сигналов акустической эмиссии. Тезисы докладов Международной конференции «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», 9 -13 октября 2017 г., г. Томск. Томск, ИФПМ СО РАН, 2017. - 607 с. С. 485-487.
16. Салита Д.С., Поляков В.В. Акустическая эмиссия при статическом растяжении свинца. Сборник научных статей «Новые материалы и технологии». Выпуск V / Барнаул, Изд-во Алт. ун-та, 2017. С. 108-111. ISBN 978-5-7904-2249-2
17. Дмитриев А.А. Особенности обработки сигналов акустической эмиссии при диагностики алюминиевых сплавов со сварными соединениями. Сборник научных статей «Новые материалы и технологии». Выпуск V / Барнаул, Изд-во Алт. ун-та, 2017. С. 63-68. ISBN 978-5-7904-2249-2
18. Борцова Я.И. Применение метода главных компонент при вихретоковом контроле толщины медных образцов. Сборник научных статей «Новые материалы и технологии». Выпуск V / Барнаул, Изд-во Алт. ун-та, 2017. С. 112-116. ISBN 978-5-7904-2249-2
19. Головин Д.С., Салита Д.С. Разработка селективного металлодетектора на базе микроконтроллера atxmega. Сборник научных статей «Проблемы правовой и технической защиты информации». Выпуск V / Сборник научных статей / Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2017. С. 13-16. ISBN 978-5-7904-2226-3

У исполнителя проекта Грачевой Я.И. сменилась фамилия: на основании свидетельства о заключении брака от 15 сентября 2017 г., выданного отделом ЗАГС администрации г. Барнаула управления ЗАГС Министерства юстиции Алтайского края, Грачевой Яне Игоревне присвоена фамилия Борцова. В связи с этим в отчете по проекту в списке исполнителей указана Борцова Я.И, в списке публикаций часть публикаций, вышедших в 2017 г., указана с авторством Борцовой Я.И. Копия свидетельства о заключении брака, подтверждающая смену фамилии, прилагается отдельным файлом.

По результатам выполнения проекта были **приняты к опубликованию** следующие статьи:

1. Дмитриев А.А., Поляков В.В., Лепендин А.А. Исследование пластической деформации алюминиевых сплавов с использованием вейвлет-преобразований сигналов акустической эмиссии. Письма о материалах. 2018. Том 8. Вып. 1.
2. Поляков В.В., Дмитриев А.А., Рудер Д.Д. Применение метода главных компонент к исследованию сигналов акустической эмиссии в алюминиевых сплавах. Известия АГУ. 2018. №1.

По результатам выполненных по проекту исследований была подготовлена и направлена в печать совместная статья с Ольборгским университетом, Эсбьерг, Дания (Aalborg University, Esbjerg, Denmark):

1. Kucheryavskiy S.V., Egorov A.V., Polyakov V.V., Gracheva Y.I. Multivariate data analysis of eddy-current measurements. Journal of Nondestructive Evaluation. (ред. JONE-D-17-00184).

Была подготовлена и направлена в печать статья:

2. Егоров А.В., Поляков В.В. Вихретоковой контроль металлических материалов с помощью проекционных методов многомерного анализа данных. Дефектоскопия. 2018. (ред. №517).

Перечень докладов участников коллектива на Международных и Всероссийских конференциях за отчетный период:

1. Поляков В.В., Егоров А.В., Лепендин А.А., Кучерявский С.В. LVIII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», 16-19 мая 2017 г., г. Пермь. Устный доклад
2. Поляков В.В., Лепендин А.А., Дмитриев А.А. LVIII Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», 16-19 мая 2017 г., г. Пермь. Устный доклад
3. Поляков В.В., Салита Д.С., Демьянов Б.Ф.. VII Международная конференция "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов", 7-10 ноября 2017 г., г. Москва. Стендовый доклад

4. Грачева Я.И., Егоров А.В., Поляков В.В. VII Международная научно-практическая конференция «Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов», 10-11 марта 2017 г., г. Барнаул. Приглашенный доклад
 5. Егоров А.В., Поляков В.В., Лепендин А.А., Грачева Я.И. Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», 9 -13 октября 2017 г., г. Томск. Устный доклад
 6. Дмитриев А.А., Поляков В.В., Салита Д.С. Международная конференция «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», 9 -13 октября 2017 г., г. Томск. Приглашенный доклад
 7. Грачева Я.И., Лепендин А.А., Поляков В.В. LIX Международная конференция «Актуальные проблемы прочности», 5-8 сентября 2017 г., г. Тольятти. Стендовый доклад
 8. Грачева Я.И., Лепендин А.А., Поляков В.В. VIII Международная школа «Физическое материаловедение», 3-12 сентября 2017 г., г. Тольятти. Стендовый доклад
 9. Салита Д.С., Поляков В.В. V Российско-Казахстанская молодежная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии», 13-15 декабря 2017 г., г. Барнаул. Устный доклад
 10. Дмитриев А.А. V Российско-Казахстанская молодежная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии», 13-15 декабря 2017 г. г., Барнаул. Устный доклад
 11. Борцова Я.И. V Российско-Казахстанская молодежная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии», 13-15 декабря 2017 г., г. Барнаул. Стендовый доклад
 12. Головин Д.С., Салита Д.С. V Всероссийская молодежная научная конференция «ПТЗИ – 2017», 24 мая 2017 г., г. Барнаул. Устный доклад
- Непосредственно за счет средств проекта было профинансировано в размере 33160 руб. личное участие в LVIII Международной конференции «Актуальные проблемы прочности», 16-19 мая 2017 г., г. Пермь; личное участие в других

конференциях по тематике проекта осуществлялось за счет привлеченных средств.

По проекту создан **электронный ресурс** с информацией об исполнителях, вышедших публикациях, участии в конференциях и полученных результатах. Адрес ресурса: <http://phys.asu.ru/rbrf-17-08-00914-a/>

Необходимое оборудование и комплектующие были приобретены за счет средств проекта на сумму 46964 рубля (в том числе: преобразователь акустической эмиссии GT301 – 21948 руб., усилитель напряжения сигналов преобразователей акустической эмиссии - 22066 руб, упаковка и пересылка 2950 руб., поставщик ООО «ГлобалТест», Нижегородская обл., г. Саров, счет-фактура №764 от 10.07.2017, копия документов прилагается отдельным файлом). С их использованием проводились акустико-эмиссионные измерения раздела 4. За счет привлеченных средств приобретались материалы для подготовки образцов. Кроме того, за счет дополнительных средств, привлеченных при победе в III Всероссийском конкурсе студенческих научных обществ и конструкторских бюро, была приобретена плата расширения MSI Nvidia GeForce 1080Ti для ускорения обработки регистрируемых сигналов и последующих расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении первого этапа проекта (2017 год) были получены следующие основные результаты.

1. Развита и апробирована предложенная авторами проекта оригинальная методика многочастотных вихретоковых измерений, заключающаяся в использовании сигнала специальной формы и обеспечивающей построение годографа системы «датчик – образец» в заданном диапазоне частот путем одного измерения. Получены и проанализированы новые результаты многочастотных вихретоковых измерений для опытных партий немагнитных металлических материалов с различными физико-механическими свойствами и при различных условиях испытаний.

2. Проведены измерения акустической эмиссии при статическом растяжении для опытной партии металлов и сплавов с различной структурой. Установлена связь характеристик акустико-эмиссионного излучения с процессами пластической деформации и разрушения на различных стадиях деформационного упрочнения.

3. Определены информативные параметры и построены экспериментальные векторы признаков при расчетах по проекционным методам многомерного анализа данных для вихретоковых и акустико-эмиссионных измерений. Предложено и апробировано использование в качестве новых информативных признаков акустической эмиссии коэффициентов многомерных дискретных вейвлет-разложений регистрируемого сигнала, описывающих его низкочастотные компоненты.

4. Получены новые результаты, обеспечившие выявление особенностей применения развиваемых в проекте методов многомерного анализа сигналов, регистрируемых при вихретоковом контроле и акустико-эмиссионной диагностике, для металлических материалов с различными физическими и прочностными свойствами.

5. Полученные результаты оформлены в виде научных статей и апробированы в докладах на научных конференциях. При плановых показателях на 2017 год: опубликование 6 научных статей, в том числе 3 статей в журналах, входящих в Перечень ВАК, 2 статей в изданиях, входящих в базы

данных Web of Science и Scopus, представление 6 докладов на научных конференциях Международного и Российского уровня, - было опубликовано в 2017 году 13 научных статей, в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 3 статьи в изданиях, входящих в базы данных Web of Science и Scopus; представлено 12 докладов на научных конференциях Международного и Российского уровня.

Таким образом, при работе по первому этапу проекта были выявлены наиболее информативные характеристики, используемые при многомерном анализе результатов вихретоковых и акустико-эмиссионных измерений. Разработаны и апробированы для материалов с различными свойствами и структурой математические методы и алгоритмы, обеспечивающие обработку и анализ регистрируемых характеристик при измерениях и диагностике.

В целом план первого года работы по проекту полностью **выполнен**.

Полученные результаты создают основу для безусловного выполнения плана работ второго этапа проекта (2018 год), по которому согласно общему плану работ на весь срок выполнения проекта были запланированы следующие исследования: Выявление зависимостей между регистрируемыми сигналами и диагностируемыми свойствами на основе развитого математического аппарата многомерного анализа данных. Анализ выявленных зависимостей для вихретоковых измерений, проводимых для металлических материалов, и для акустико-эмиссионных испытаний с композиционными материалами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Неразрушающий контроль. Справочник. В 7 т. Под общей редакцией Ключева В.В. Т.2. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с. И
2. Garcia-Martin J., Gomez-Gil J., and Vazquez-Sanchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing // *Sensors (Basel)*, 2011, Vol. 11(3), pp. 2525–2565.
3. Бакунов А.С. Мужичкий В.Ф., Шубочкин С.Е. Современное решение задач вихретоковой структуроскопии. – *Дефектоскопия*, 2004, №5. С.79-84.
4. Sasi B., Rao B.P.C., Jayakumar T., and Raj Baldev. Development of Eddy Current Test Procedure for Non-destructive Detection of Fatigue Cracks and Corrosion in Rivets of Air-intake Structures // *Defence Science Journal*, 2009, Vol. 59, No. 2, pp. 106-112.
5. Song Z., Yamada T., Shitara H., Takemura Y. Detection of Damage and Crack in Railhead by Using Eddy Current Testing // *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2011, No. 3, pp. 546-550.
6. Егоров А.В., Лепендин А.А., Поляков В.В. Методы обработки экспериментальных данных при акустической и электромагнитной диагностике: монография // Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2012. – 86 с.
7. Sikora R., Chady T., Gratkowski S., Komorowski M., and Stawicki K. Eddy current testing of thick aluminum plates with hidden cracks // *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*, Vol. 22. AIP Conference Proceedings, 2003, Vol. 657, pp. 427-434.
8. Egorov A.V., Polyakov V.V., Salita D.S. and etc.. Inspection of aluminum alloys by a multi-frequency eddy current method // *Defence Technology*, 2015, Vol. 11, pp. 99-103
9. Yang H.C., Tai C.C. Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate // *Measurement Science and Technology*, 2002, Vol. 13, pp. 1259-1265.
10. Liu Z., Tsukada K., Hanasaki K., Kurisu M. Two-Dimensional Eddy Current Signal Enhancement via Multifrequency Data Fusion // *Res. Nondestruct. Eval.*, 1999, No. 11, pp. 165–177. doi:10.1007/PL00003919.
11. Egorov A.V., Kucheryavskiy S.V., Polyakov V.V. Resolution of effects in

- multi-frequency eddy current data for reliable diagnostics of conductive materials. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2017. Vol. 160. Pp. 8-12.
12. Егоров А.В., Поляков В.В., Лепендин А.А., Грачева Я.И. Применение сигналов специальной формы в многочастотных вихретоковых измерениях. *Автометрия*. 2017. Т. 53. №3. С. 28-35. DOI: 10.15372/AUT20170304
 13. Egorov A.V., Polyakov V.V., Lependin A.A., Gracheva Ya.I. Using Signals of Special Form in Multi-Frequency Eddy Current Testing. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2017. Vol. 53. No. 3. pp. 223-229. DOI: 10.3103/S8756699017030049
 14. Polyakov V.V., Gracheva Ya.J., Egorov A.V., and A.A. Lependin. Application of Special Waveform Signals for Eddy Current Testing of Materials. *AIP Conference Proceedings*. 2017. Volume 1909. Issue 1. doi.org/10.1063/1.5013858
 15. Egorov A.V., Polyakov V.V. The Application of Principal-Component Analysis during Eddy-Current Testing of Aluminum Alloys. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015. Vol. 51. No. 10. Pp. 633-638.
 16. Shokralla S., Morelli J.E., Krause T.W. Principal Components Analysis of Multifrequency Eddy Current Data Used to Measure Pressure Tube to Calandria Tube Gap. - *IEEE Sensors J*. 2016 Vol. 16 №9 pp. 3147–3154.
 17. Кучерявский С.В., Поляков В.В. Применение методов анализа многомерных данных к исследованию структуры материалов. *Заводская лаборатория*. 2007. №8. С. 32-36.
 18. Sophian G.Y., Tian,D., Taylor. J.R. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed Eddy current ND // *NDT E International*, 2003, No. 36, pp. 37–41. doi:10.1016/S0963-8695(02)00069-5.
 19. BinFeng Y., FeiLu L., Dan H. Research on edge identification of a defect using pulsed eddy current based on principal component analysis // *NDT E International*, 2007, No. 40, pp. 294–299. doi:10.1016/j.ndteint.2006.12.005.
 20. Polyakov V.V., Egorov A.V., Svistun I.N. A Study of Acoustic Emission under Plastic Strain and Disintegrating Porous Material. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2001. Vol. 37. No. 9. P. 656-659.
 21. Егоров А.В., Поляков В.В. Применение метода акустической эмиссии к исследованию деформационного поведения структурно-неоднородных

материалов: монография. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2008. 120 с.

22. Lependin A.A., Polyakov V.V. Scaling of the Acoustic Emission Characteristics during Plastic Deformation and Fracture. *Technical Physics*. 2014. Vol. 59. № 7. Pp. 1041–1045.

23. Андрейкив А.Е., Лысак Н.В. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения. Киев: Наукова думка, 1989. 176 с.

24. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминиево-магниевого сплава. // *Физика металлов и металловедение*. 1996. Т. 81. Вып. 1. С. 156-162.

25. Shahri M.N., Jalal Yousefi J., Fotouhi M., Najfabadi M.A. Damage evaluation of composite materials using acoustic emission features and Hilbert transform // *Journal of Composite Materials*. 2015. Vol. 50, Iss. 14. P. 1897-1907.

26. Senthilkumar S.N., Narayanan S.D., Ashok S. Acoustic emission-based monitoring approach for friction ding of aluminum alloy AA6063-T6 with different tool pin profiles // *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2013, No. 227(3), pp. 407–416.

27. Буйло С.И. Физико-механические и статистические аспекты повышения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля и диагностики : Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2008.

28. Mallat S. *Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, 2009. 795 p.

29. Marec A., Thomas J.-H., Guerjouna R. Damage characterization of polymer-based composite materials: multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2008. Vol. 22, Iss. 6. P. 1441-1464.

30. Yang L., Zhou Y.C., Mao W.G., Lu C. Real-time acoustic emission testing based on wavelet transform for the failure process of thermal barrier coatings // *Applied Physics Letters*. 2008. Vol. 93, Iss. 23. P. 2319061-2319063.

31. Ferreira D.B.B., Da Silva R.R., Rebello J.M.A., Siqueira M.H.S. Failure mechanism characterisation in composite materials using spectral analysis and the wavelet transform of acoustic emission signals // *Insight*. 2004. Vol. 46, Iss. 5. P. 282–289.

32. Дмитриев А.А., Поляков В.В., Колубаев А.А. Диагностика алюминиевых сплавов со сварными соединениями на основе анализа сигналов акустической эмиссии. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2017. Т.14. №4. С. 458-463.
33. Дмитриев А.А., Поляков В.В., Салита Д.С. Исследование физических механизмов пластической деформации с помощью вейвлет-разложений сигналов акустической эмиссии. Тез. докл. Междунар. конф. «Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций», 9 -13 октября 2017 г., г. Томск. Томск, ИФПМ СО РАН, 2017. - 607 с. С. 485-487.
34. Поляков В.В., Лепендин А.А., Дмитриев А.А. Диагностика качества сварных соединений с помощью многомерного анализа вейвлет-разложений сигналов акустической эмиссии. *Актуальные проблемы прочности: сборник тезисов LVIII Междунар. конф.*, 16-19 мая 2017 г., г. Пермь, 2017. С. 170. Пермь: ИМСС УрО РАН, 2017. ISBN 978-5-9908245-6-0
35. Эсбенсен К. Анализ многомерных данных. Избранные главы. / Пер. с англ. С.В. Кучерявского.- Черноголовка: Изд-во ИПХФ РАН, 2005. – 157 с.
36. Esbensen KH, Geladi P. Principal Component Analysis: Concept, Geometrical Interpretation, Mathematical Background, Algorithms, History, Practice. In: Brown E-CSD, Tauler R, and Beata Walczak, editors. *Compr. Chemom.*, Oxford: Elsevier; 2009, p. 211–26. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/B978-044452701-1.00043-0>.
37. Kucheryavskiy S. R package for Multivariate Data Analysis, 2016 // doi:10.5281/zenodo.59547.
38. Polyakov V.V., Egorov A.V., Pirogov A.A., and Kolubaev E.A. Application of Projection Methods of Multivariate Data Analysis in Eddy Current Testing of Materials. *AIP Conference Proceedings*. AIP Conference Proceedings. 2015. Vol. 1683. Pp. 0201851-0201854. Doi:10.1063/1.4932875.
39. Comon P. Independent component analysis, A new concept? *Signal Processing* 1994;36:287–314. doi:10.1016/0165-1684(94)90029-9.
40. Wold S, Sjöström M, Eriksson L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. *Chemometrics Intelligent Laboratory Systems...* 2001:vol 58 p109–130.

41. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. М.: Наука, 1989. – 496 с.
42. Якимов Е.В., Уразбеков Е.И., Гольдштейн А.Е., Булгаков В.Ф. Вычислительное преобразование сигналов измерительной информации системы вихретоковой дефектоскопии. – Дефектоскопия, 2013, № 11. С. 59-66.
43. Грачева Я.И., Егоров А.В., Поляков В.В., Дмитриев А.А. Автоматизированный вычислительно-измерительный комплекс для многочастотной вихретоковой диагностики металлических материалов. Известия АГУ. 2017. №4. С. 22-26.
44. Егоров А.В., Поляков В.В., Грачева Я.И., Кучерявский С.В. Применение метода главных компонент при вихретоковом контроле металлических материалов с диэлектрическим покрытием. Известия АГУ. 2017. №4. С. 33-38.
45. Баранникова С.А., Данилов В.И., Зуев Л.Б. Локализация пластической деформации в моно- и поликристаллах сплава Fe – 3% Si при растяжении. Журнал технической физики, 2004, том 74, вып. 10. С. 52-56.
46. Egorov A.V., Polyakov V.V., Gumirov E.A., Lependin A.A. Recording Acoustic Emission Signals by the Modified Oscillation Method. Instruments and Experimental Techniques. 2005. Vol. 48. No. 5. P. 667-670.
47. Шибков А.А., Золотов А.Е. Нелинейная динамика пространственно-временных структур макролокализованной деформации. Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. Вып. 5. С. 412-417.
48. Криштал М.М. Неустойчивость и мезоскопическая неоднородность пластической деформации (аналитический обзор). Часть II. Теоретические представления о механизмах неустойчивости пластической деформации // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7, № 5. –С. 31–45.
49. Макаров С.В., Плотников В.А., Колубаев Е.А. Закономерности акустической эмиссии в условиях пластической деформации алюминиево-магниевого сплава при неизотермическом нагружении // Известия АлтГУ. – 2014. – № 1. –С. 252–256.
50. Трусков П.В., Чечулина Е.А. Прерывистая текучесть: Физические механизмы, экспериментальные данные, макрофеноменологические модели. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического

- университета. Механика. – 2014. - №3. – С.186-232. DOI 10.15593/perm.mech/2014.3.10
51. Салита Д.С., Поляков В.В. Влияние структуры свинцового сплава на акустическую эмиссию при пластической деформации и разрушении. Известия АГУ. 2017. №1. С. 53-57.
52. Поляков В.В., Салита Д.С., Демьянов Б.Ф. Акустическая эмиссия при пластической деформации и разрушении свинцовых сплавов. Сб. матер. VII Междунар. конф. "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов", 7-10 ноября 2017 г., г. Москва.– М: ИМЕТ РАН, 2017, 951с. - С. 203-204. ISBN 978-5-4465-1624-7
53. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Елсукова Т.Ф. Физическая мезомеханика зернограничного скольжения в деформируемом поликристалл. // Физическая мезомеханика. 2011. - Т.14. С.15-22..
54. Елсукова Т.Ф., Новоселова Е.М., Караваева В.В., Ангелова Г.В. Стадии высокотемпературной ползучести поликристаллов свинца как эволюция структурных уровней пластической деформации // Физическая мезомеханика. 2000. - Т.3. С.91-99.
55. Hamdi E., Le Duff A., Laurent S. Acoustic emission pattern recognition approach based on Hilbert–Huang transform for structural health monitoring in polymercomposite materials // Applied Acoustics. 2013. Vol. 74. P. 746–757.
56. Shahri M.N., Jalal Yousefi J., Fotouhi M., Najfabadi M.A. Damage evaluation of composite materials using acoustic emission features and Hilbert transform // Journal of Composite Materials. 2015. Vol. 50, Iss. 14. P. 1897-1907.
57. Дмитриев А.А. Особенности обработки сигналов акустической эмиссии при диагностики алюминиевых сплавов со сварными соединениями. Сб. научных статей «Новые материалы и технологии». Барнаул, Изд-во Алт. ун-та, 2017. С. с. 63-68. ISBN 978-5-7904-2249-2