

На правах рукописи
УДК 620.179.16

Кадикова Милица Борисовна

РАЗРАБОТКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ
ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР

Специальность 05.02.11 - Методы контроля и диагностика
в машиностроении

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2009

Работа выполнена в Петербургском государственном университете путей сообщения

Научный руководитель: д.т.н., проф. Дымкин Григорий Яковлевич

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. Щербинский Виктор Григорьевич
к.т.н. Григорьев Михаил Владимирович

Ведущее предприятие: Институт физики металлов Уральского отделения РАН

Защита состоится «_03_»____декабря____2009 года на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Автореферат разослан «_02_»____ноября____2009 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

д.т.н., доцент

Коновалов А.В.

Актуальность работы. К числу основных элементов конструкции железнодорожного подвижного состава, непосредственно влияющих на безопасность движения, относятся оси колесных пар подвижного состава. На сети российских железных дорог эксплуатируется более 4,5 млн. осей. Эксплуатационная надежность оси зависит, в частности, от структуры металла. Существующие требования к структуре определены ГОСТ 31334-2007, в котором указано, что «микроструктура осей должна быть однородной, величина зерна не крупнее номера 5».

Металлографические исследования позволяют контролировать структуру только выборочно, поэтому стандарт требует стопроцентного обязательного ультразвукового контроля структуры осей. Национальные и европейские нормы, а также документы ОАО «РЖД» регламентируют две методики ультразвукового контроля, которые обеспечивают обнаружение осей с весьма крупной или непостоянной по длине структурой, однако, не позволяют количественно оценивать зернистость металла и, таким образом, полно проверять соответствие осей требованиям ГОСТ. Несовершенство методик приводит с одной стороны к тому, что оси с неудовлетворительной структурой попадают в эксплуатацию, а с другой – к неоправданной отбраковке весьма значительного числа осей при ремонте подвижного состава в ремонтных предприятиях (в 2006 году изъято из эксплуатации более 70 тысяч вагонных осей, забракованных по структуре). При этом ежегодно имеются случаи изломов осей в пути следования.

Повышение гарантий качества металла новых осей и объективности оценки эксплуатационной надежности осей при их ремонте будет способствовать обеспечению безопасности движения на железнодорожном транспорте и исключению необоснованного сокращения сроков эксплуатации колесных пар подвижного состава. Изложенное обуславливает актуальность совершенствования методов неразрушающего контроля с целью количественной оценки структуры металла осей колесных пар.

Целью работы являлась разработка ультразвукового метода количественной оценки зернистости металла и технологии его применения для неразрушающего контроля структуры осей колесных пар.

Задачи исследования.

1. На основе анализа статистических описаний структуры металла осей колесных пар обосновать количественные критерии классификации металла по зернистости.

2. Создать неразрушающий ультразвуковой метод количественной оценки зернистости металла, основанный на сравнительных оценках коэффициентов затухания упругих волн на разных частотах, и обосновать количество рабочих частот.

3. Разработать и экспериментально проверить методику оценки зернистости металла осей колесных пар ультразвуковым методом.

4. Обосновать функциональные решения аппаратуры и технологию ультразвукового контроля структуры металла осей колесных пар.

Научная новизна.

1. Обоснована количественная классификация металла по зернистости, учитывающая логарифмически-нормальный закон распределения зерен по размерам и применимая для ультразвукового метода. Получены инженерные формулы для определения зернистости структуры; к разнотельным относятся структуры, среднеквадратичное отклонение распределения диаметров зерен которых больше 0,3.

2. Теоретическими исследованиями и с использованием эмпирических данных определены значения коэффициента упругой анизотропии поликристалла простой доэвтектидной стали для различного процентного соотношения структурных составляющих; для осевой стали марки Ос.В с содержанием перлита 57% коэффициент упругой анизотропии составляет $3,8 \cdot 10^{-3}$.

3. Впервые теоретически обоснован и экспериментально подтвержден ультразвуковой метод определения номера зерна и однородности структуры металла по отношениям амплитуд сигналов продольных волн на трех рабочих частотах, который расширяет прикладные возможности методов неразрушающего контроля на задачи количественной оценки структуры металла.

Практическая значимость.

Ультразвуковой трехчастотный метод количественной оценки зернистости металла осей колесных пар обеспечивает проверку выполнения требований национального стандарта и правил безопасности на железнодорожном транспорте на заводах-изготовителях осей и предприятиях по ремонту железнодорожного подвижного состава. Разработанные графическая номограмма и программное обеспечение для оценки зернистости простой доэвтектидной стали являются основой прикладной технологии применения трехчастотного метода.

Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе ПГУПС при подготовке инженеров по специальности 200102 «Приборы и методы контроля качества и диагностики».

Методы исследования.

Решение поставленных задач осуществлялось аналитическими и численными методами исследования физических моделей рассеяния упругих волн в поликристаллических средах с использованием аппарата математической статистики. Эксперименты проведены с использованием современного дефектоскопического и измерительного оборудования, а также специальных образцов.

Достоверность.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением фундаментальных положений акустики и металловедения, металлографическими исследованиями и большим объемом экспериментальных данных.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на III Российской научно-технической конференции «Разрушение, контроль и диагностика материалов и конструкций» (г.Екатеринбург, 2007г.), XIX и XX Петербургских конференциях «Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций» (Санкт-Петербург, 2007г. и 2009г.), Международной научно-практической технической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспортного комплекса России» (г.Новосибирск, 2007г.).

Диссертационная работа в целом рассмотрена в 2009 году на научных семинарах кафедры «Методы и приборы неразрушающего контроля» ПГУПС и кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им Н.Э.Баумана.

Публикации.

Материалы диссертации отражены в 9 печатных работах, из них по списку ВАК – 4.

Объем работы.

Диссертационная работа изложена на 159 страницах, иллюстрируется 69 рисунками, содержит 21 таблицу, состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы (106 наименований).

Содержание работы

В первой главе содержатся обзорные сведения об основных этапах и факторах, влияющих на формирование структуры металлов (сплавов), и методах изготовления осей колесных пар. Выполнен анализ существующих экспериментальных методик оценки зернистости металла ультразвуковым методом и математических моделей расчета затухания ультразвука в поликристаллических средах. Осуществлена постановка задач исследований.

Основными этапами формирования структуры металлов и их сплавов являются первичная кристаллизация, деформация и термическая обработка. Механические свойства железоуглеродистых сплавов зависят от микроструктуры, которая определяется химическим составом, способом деформации и режимами термообработки. По химическому составу металл осей колесных пар соответствует простой, доэвтектоидной стали. Структура феррито-перлитная с содержанием углерода 0,4-0,5%. Для изготовления заготовок вагонных осей используется горячая обработка давлением несколькими способами: свободной ковкой, радиально-ковочной обработкой и поперечно-винтовой прокаткой. В качестве термообработки при всех способах изготовления применяется нормализация, которая вызывает полную фазовую перекристаллизацию, позволяет измельчить зерно и устранить остаточные напряжения.

ГОСТ 31334-2007 определяет критерии оценки качества структуры осей: «...микроструктура термообработанных осей должна быть однородная, величина зерна не крупнее номера 5». Для обеспечения сплошного контроля структуры металла осей в качестве обязательного регламентирован ультразвуковой контроль, который проводят при изготовлении осей на заводах, освидетельствовании в ремонтных депо, формировании и переформировании колесных пар. Зарубежными стандартами и документами, действующими на Российских железных дорогах, нормированы две методики, основанные на прозвучивании оси на частоте 2,5 МГц с торца и с цилиндрической поверхности. Одна из них дает лишь качественную интегральную оценку структуры, а вторая позволяет выявить неоднородность структуры вдоль оси. Их общий недостаток – невозможность количественной оценки зернистости контролируемого металла.

Разработанный в пятидесятые годы в НИИХИММАШ относительный метод ультразвукового структурного анализа металлов – так называемый способ структурных коэффициентов, стандартизован

получил широкое применение в заводской практике. По этому методу для определения среднего по прозвучиваемому сечению диаметра зерен акустические характеристики объекта на разных частотах сравнивают с характеристиками эталонных образцов с известной структурой, форма и размеры которых соответствуют контролируемому изделию. При этом одну из частот (опорную) выбирают заведомо низкой, такой, чтобы затухание ультразвука слабо зависело от структурных составляющих, другие – соответствующими области максимального коэффициента рассеяния. Отношения амплитуд сигналов на рабочей и опорной частоте – структурные коэффициенты, полученные на изделии и на эталонных образцах, сравнивают между собой. Для практической реализации данного метода необходимо иметь эталонные образцы для каждой марки стали и номера зерна, имеющие те же размеры и чистоту поверхности, что и изделие. Важно отметить, что поскольку структурные коэффициенты определяются на частотах, чувствительных к распределению зерен, эталонные образцы уникальны, что «привязывает» результат контроля к конкретному образцу и не обеспечивает воспроизводимость измерений.

В числе последних работ – предложенная С.К. Павросом с соавторами методика определения среднего размера зерна, основанная на использовании зависимости коэффициента затухания ультразвука в поликристаллическом материале от размеров зерна. Поскольку для разнородного поликристалла средние размеры (диаметр, площадь зерна) не являются достаточными характеристиками зернистости, методика применима лишь для однородной структуры. Кроме того, ее практическое применение для решаемой в диссертации задачи ограничивается волновыми размерами зерен в области рэлеевского рассеяния.

Таким образом, использование ультразвука для оценки структуры поликристаллов основано на связи коэффициента затухания упругих волн с величиной зерна исследуемого материала, однако существующие ультразвуковые методики не позволяют выполнить количественную оценку зернистости металла в соответствии с требованиями действующего государственного стандарта.

Основные соображения о роли размеров кристаллитов, анизотропии их упругих свойств и частоты ультразвуковых колебаний были впервые сформулированы Д.С. Шрайбером (1940г.), позднее С.Я. Соколов (1948г.) сделал выводы о возможности применения ультразвука для изучения структуры металлов. Теоретические модели расчета затухания предложили И.М. Лифшиц и Г.Д. Пархомовский, У. Мэзон и Г. Мак-Скимин

(W. Mason, H. McSkimin), а наиболее важные исследования затухания ультразвука в поликристаллических средах выполнили Л.Г. Меркулов, В.М. Меркулова, Е.Р. Papadakis, Л.Л. Рохлин, W. Roth, Б.С. Крыгов, Н.А. Кеслер, Л.И. Шрайфельд, А.В. Bhatia, R.A. Moore, И.Н. Ермолов, В.Н. Данилов.

Коэффициент рассеяния в поликристаллических средах рассчитывают, используя уравнение движения с динамическими упругими модулями, определяющими распространение ультразвуковой волны в кристаллах, с усреднением решения по всевозможным направлениям ориентации кристаллов в предположении слабой анизотропии.

Применительно к рассматриваемому в диссертационной работе классу материалов весьма важным результатом, полученным исследованиями ряда авторов, является то, что функция распределения размеров зерен в поликристаллических материалах удовлетворительно аппроксимируется логарифмически-нормальным законом, учет которого существенно влияет на величину коэффициента затухания, а также на его частотную зависимость. Для дальнейших исследований использована расчетная модель В.Н. Данилова, наиболее полно учитывающая статистику распределения зерен по размерам и анизотропию поликристалла, а также удовлетворительно подтвержденная экспериментами, выполненными в диссертационной работе.

Во второй главе выполнена количественная классификация металла по зернистости применительно к ультразвуковому методу, то есть на основании критериев оценки зернистости металла при металлографических исследованиях и анализа логарифмически-нормального закона распределения зерен по размерам математически обоснованы значения средних диаметров и среднеквадратичных отклонений для разделения мелкозернистой, крупнозернистой, однородной и разнотернистой структур. Определен коэффициент упругой анизотропии простой доэвтектоидной стали в зависимости от процентного соотношения структурных составляющих феррита и перлита.

При проведении металлографических исследований получают видимое, увеличенное под микроскопом изображение структуры исследуемого металла, при этом количественные критерии оценки зернистости металла сформулированы в ГОСТ 5639-82. В ультразвуковом методе для оценки зернистости металла служит косвенная характеристика – связь коэффициента затухания с диаметром зерен в контролируемом сечении. На основании данных ГОСТ 5639-82 выполнен расчет интервалов

$(x_1; x_2)$ диаметров зерен в пределах каждого номера с 1 по 10. С использованием логарифмически-нормального закона и “правила трех сигм” получены выражения для расчета параметров распределения зерен через границы интервалов:

$$M_e(X) = a = \sqrt{x_1 x_2};$$

$$\sigma = \ln \sqrt[6]{x_2 / x_1},$$
(1)

где $M_e(X)$ – медиана, σ – среднеквадратичное отклонение.

В результате расчета по (1) выявлено, что интервалам диаметров зерен, заданным ГОСТ, соответствует значение среднеквадратичного отклонения $\sigma \approx 0,06$. Чем меньше σ , тем ближе друг к другу значения моды, медианы и математического ожидания (среднего значения), а кривая распределения ближе к симметрии. При постоянном значении математического ожидания и увеличении среднеквадратичного отклонения мода и медиана смещаются в сторону с меньшим значением (рис. 1).

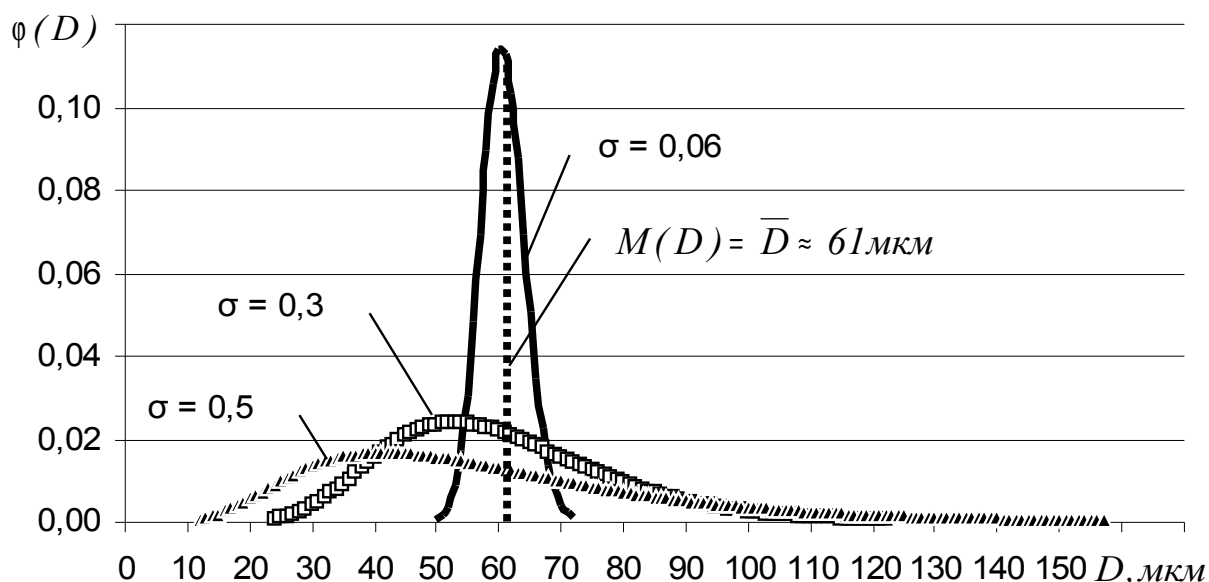


Рис. 1. Изменение плотности вероятности логарифмически-нормального распределения

Предложены математические выражения позволяющие выполнить количественную классификацию металла по зернистости для ультразвукового метода по требованиям ГОСТ 5639-82 и ГОСТ 31334-2007:

$$S_1 = \left(1 - \frac{\sum_{i=D_{\min(n-1)}}^{i=D_{\max(n+1)}} P_i S_i}{\sum_{i=D_{\min}}^{i=D_{\max}} P_i S_i}\right) * 100\%;$$

$$S_2 = \frac{\sum_{i=D_{\min(n)}}^{i=D_{\max(n)}} P_i S_i}{\sum_{i=D_{\min}}^{i=D_{\max}} P_i S_i} * 100\%,$$
((2))

где S_1 – процент площади, занимаемой структурой, отличающейся от основного более чем на 1 номер;

S_2 – процент площади, занимаемой определенным номером зерна;

$$P_i = \int_{D_i}^{D_{i+1}} \frac{1}{D \sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln D - \ln a)^2}{2\sigma^2}\right] dD$$

– вероятность появления i -го зерна;

S_i – площадь i -го зерна; D – диаметр зерна; n – рассматриваемый номер зерна.

В результате расчета по (2) получены критерии зернистости:

1) структура разнотельная: если для зерен с номерами 7 – 10 $\sigma \geq 0,3$; для зерен с номерами 1 – 6 $\sigma > 0,3$.

2) структура крупотельная, если: $\bar{D} \geq 61$ мкм, $\sigma > 0,3$; $\bar{D} \geq 65$ мкм, $\sigma > 0,2$; $\bar{D} \geq 69$ мкм, $\sigma > 0,1$; $\bar{D} \geq 70$ мкм.

В соответствии с выбранной для расчета моделью, затухание упругих волн в поликристаллических средах обусловлено рассеянием на совокупности элементов, среднее относительное расстояние между которыми выражается через коэффициент упругой анизотропии поликристалла F_a .

Для характеристики упругой анизотропии кристаллической решетки Мэзоном и Мак-Скиминном предложены величины, представляющие собой средние относительные квадратичные отклонения модулей упругости от средних значений, выраженные через модули упругости кристаллита среды, имеющего кубическую кристаллическую решетку.

На основе анализа модели Мэзона и Мак-Скимина и структуры поликристалла простой доэвтектонидной стали обоснована возможность применения статистического осреднения и получено математическое выражение для определения коэффициента анизотропии поликристалла простой доэвтектонидной стали в зависимости от процентного соотношения структурных составляющих. В случае достижения равновесного состояния

при очень медленном охлаждении коэффициент анизотропии выражен через процентное содержание углерода.

Сложная структура зерен перлита не позволяет выполнить теоретический расчет его коэффициента анизотропии, поскольку он зависит от размеров, анизотропии, относительной плотности областей внутренней структуры, плотности и скорости звука структурных составляющих.

Показано, что экспериментальные данные на образце из стали Ос.В с содержанием перлита – 57% и расчетные совпадают при $F_a = 3,8 * 10^{-3}$. Известно, что коэффициент анизотропии феррита $F_a = 6,64 * 10^{-3}$. На основании этих данных выполнен расчет коэффициента анизотропии поликристалла перлита $F_a = 1,66 * 10^{-3}$, а так же доэвтектоидных сталей с различным соотношением структурных составляющих. Правильность расчета подтверждена экспериментально на образце с содержанием перлита – 23%.

В результате на основе логарифмически-нормального закона распределения зерен по размерам и требований ГОСТ 5639-82 математически обоснована количественная классификация металла по зернистости для ультразвукового метода.

На основе теоретических исследований и эмпирических данных определены значения коэффициента упругой анизотропии поликристалла простой доэвтектоидной стали для различного процентного соотношения структурных составляющих.

В третьей главе разработан новый ультразвуковой метод оценки зернистости металла, выполнены теоретические и экспериментальные исследования влияния мешающих факторов, рассмотрены вопросы метрологического обеспечения.

Анализ влияния закона распределения зерен на рассеяние ультразвука в поликристаллах показал, что возможно пересечение кривых зависимостей коэффициента затухания от частоты (рис.2) которое приводит к неоднозначности определения номера зерна.

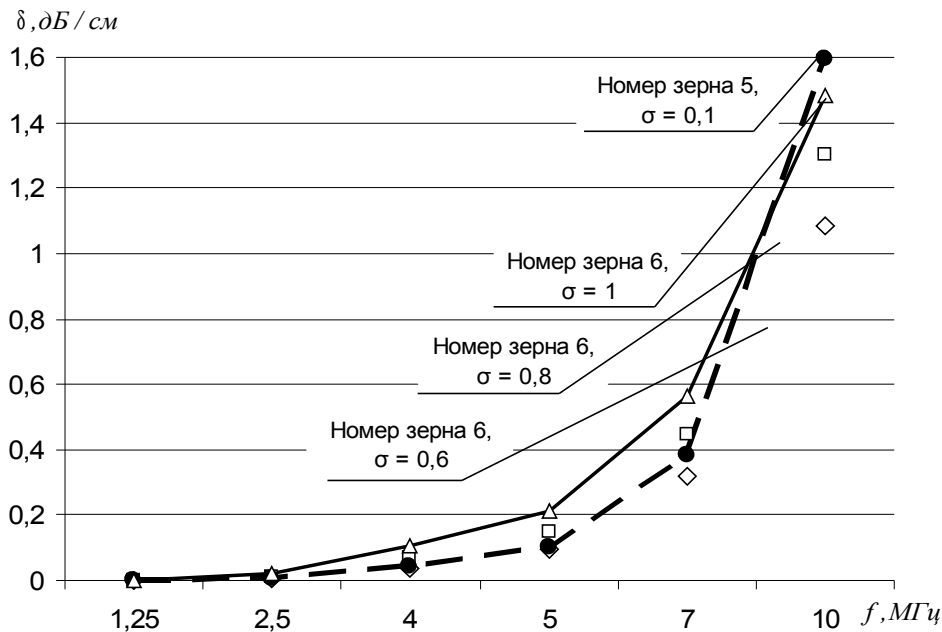


Рис. 2. Зависимость коэффициента затухания от частоты

Разные распределения зерен металла могут оказывать одинаковое влияние на частотную зависимость коэффициента затухания в определенном диапазоне частот, причем для разных распределений этот частотный диапазон отличается. Таким образом, для оценки зернистости металла необходимо измерение коэффициента затухания минимум на трех частотах.

Как известно, при оценке затухания по ослаблению многократных отражений импульсов существенные погрешности связаны с необходимостью учета дифракционного ослабления и частичным переходом энергии в пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП) при многократных отражениях. Существующие способы точного измерения коэффициента затухания довольно трудоемки, при этом хорошей считается погрешность измерения 10%. Поэтому для оценки зернистости металла предлагается измерять разницу коэффициентов затухания ультразвука на трех частотах, предварительно сравнив чувствительности используемых при этом ПЭП на настроечном образце, коэффициент затухания в котором на всех используемых частотах пренебрежимо мал. На основании уравнений акустического тракта, выбранной для расчета коэффициента затухания математической модели и с учетом влияния шероховатости поверхности контролируемого объекта получены математические выражения (3) и построена номограмма для оценки зернистости металла.

$$\frac{B_1 - B_2 + G_{21}}{2r} = Z 20 \lg e \{ \bar{D}^3 \exp(3\sigma^2) (k_2^4 \Phi[x_2] - k_1^4 \Phi[x_1]) + \bar{D} (k_2^2 - k_1^2 - k_2^2 \Phi[y_2] + k_1^2 \Phi[y_1]) \}, \text{дБ / м},$$

$$\frac{B_1 - B_3 + G_{31}}{2r} = Z 20 \lg e \{ \bar{D}^3 \exp(3\sigma^2) (k_3^4 \Phi[x_3] - k_1^4 \Phi[x_1]) + \bar{D} (k_3^2 - k_1^2 - k_3^2 \Phi[y_3] + k_1^2 \Phi[y_1]) \}, \text{дБ / м.}$$

где $\Phi(x_n) = \Phi \left[\frac{\ln(D_{p(n)}/\bar{D}) - 2,5\sigma^2}{\sigma} \right]$, $\Phi(y_n) = \Phi \left[\frac{\ln(D_{p(n)}/\bar{D}) - 0,5\sigma^2}{\sigma} \right]$ –

нормальная функция распределения; $D_p = 1/k_l = \lambda_l / 2\pi$; \bar{D} – средний диаметр зерна, $Z = \frac{7}{40\pi^2} (1 + \frac{3C_l^5}{2C_t^5}) d_0^3$; $B_{1,2,3}$ – нормированные к образцу амплитуды на соответствующей частоте f_n , $n = 1, 2, 3$; G_{21} и G_{31} – коэффициенты, учитывающие относительное влияние шероховатости поверхности ввода; r – высота объекта контроля; σ – среднеквадратичное отклонение нормального распределения величин $\ln D$.

Введем обозначения: $\Delta_{12} = \frac{B_1 - B_2 + G_{21}}{2r}$; $\Delta_{13} = \frac{B_1 - B_3 + G_{31}}{2r}$.

В качестве примера на рис. 3 представлена номограмма оценки зернистости стали Ос.В для рабочих частот $f_1 = 2,5$ МГц, $f_2 = 5$ МГц, $f_3 = 10$ МГц.

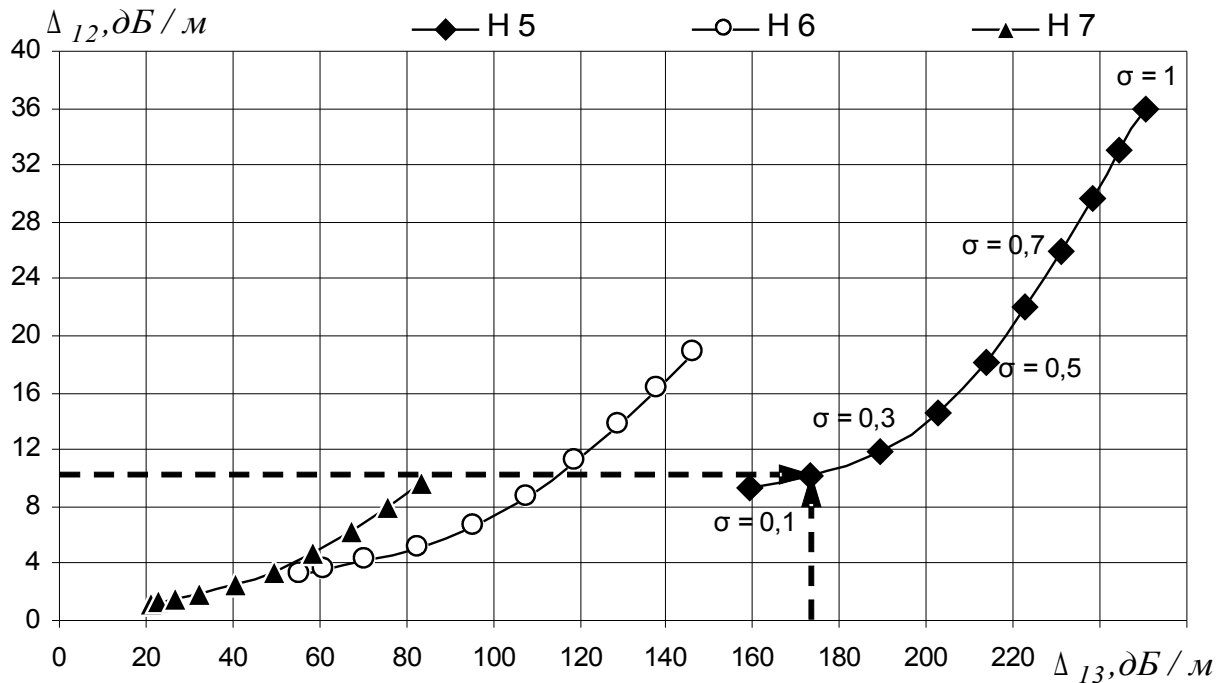


Рис. 3. Номограмма оценки зернистости стали Ос.В

Кривые (рис. 3) рассчитаны по значениям \bar{D} номеров зерен 5, 6 и 7 равным 62, 44 и 31 мкм соответственно. В нижних точках значение $\sigma = 0,1$, в каждой следующей снизу вверх σ увеличивается на 0,1. Например, получив $\Delta_{12} = 10$ дБ/м, $\Delta_{13} = 173$ дБ/м находим точку пересечения (смотри рис. 3) по которой определяем $\bar{D} = 62$ мкм, $\sigma = 0,2$, то есть, структура однородная с номером зерна 5. Любой точке пространства между кривыми соответствуют определенные значения \bar{D} и σ .

Проведен количественный анализ факторов, влияющих на результаты оценки зернистости металла по предложенному методу. Нестабильность акустического контакта, определяемая в большей степени толщиной слоя контактной жидкости, шероховатостью поверхности и материалом протектора преобразователя и в меньшей степени акустическими свойствами контактной жидкости, рабочей частотой преобразователя и ее отклонением от номинальной проанализирована в соответствии с моделью Л.М. Бреховских. Показано, что смена протектора с твердого на более мягкий приводит к существенной стабилизации зависимости коэффициента прозрачности от толщины контактного слоя.

Отклонение частот от номинальных значений вносит значительную погрешность при определении координаты точки пересечения значений Δ_{12} и Δ_{13} на номограмме, что приводит к необходимости использования в дефектоскопе частотного фильтра.

Экспериментальные и металлографические исследования структуры металла стандартных образцов СО-2 для оценки возможности их использования в качестве настроечных показали неудовлетворительные результаты. Зернистость этих образцов оказывает существенное влияние на амплитуды сигналов при работе на частотах 5 МГц и выше, что не позволило использовать СО-2 для реализации предлагаемого метода и привело к необходимости изготовления специального образца.

Для проверки разработанного ультразвукового метода оценки зернистости металла было проведено сопоставление экспериментальных и металлографических данных на нескольких образцах с различной структурой. Количественный анализ микроструктуры металла выполнялся методом измерения длин хорд. Общее количество пересеченных зерен для каждого образца не менее 1000, что соответствует достоверности 95%. В результате строилась экспериментальная кривая функции распределения номеров зерен (рис. 4), а к ней подбиралась теоретическая с

определенными значениями среднего диаметра и среднеквадратичного отклонения. Логарифмически-нормальный закон распределения зерен по размерам на всех образцах подтвержден с коэффициентом корреляции $r = 0,99$.

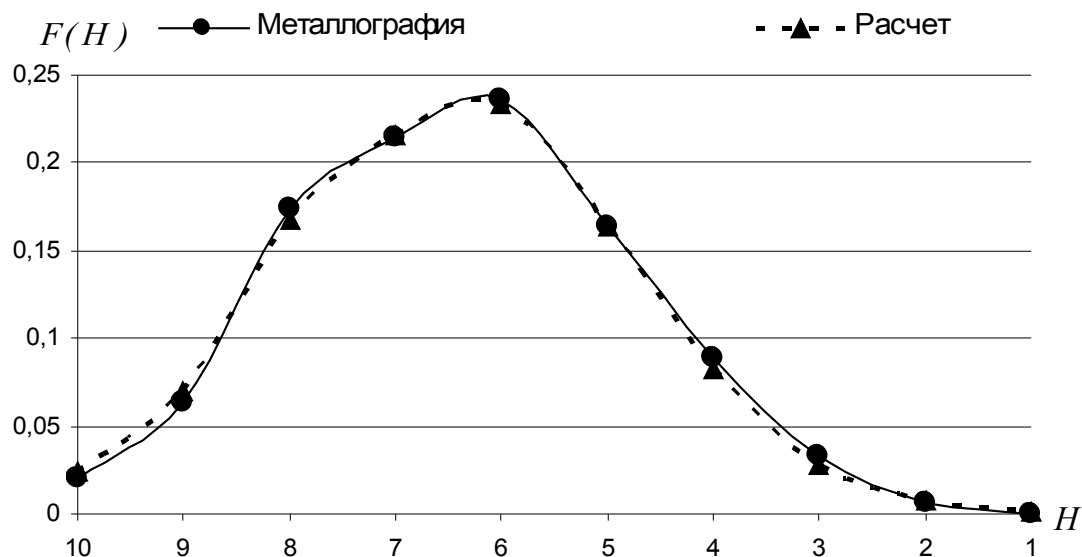


Рис. 4. Функция распределения номеров зерен
 $M(D) = 43$ мкм, $\sigma = 0,6$

Во всех случаях отмечено хорошее согласие расположения экспериментальных точек на номограмме оценки зернистости и результатов количественной металлографии (расхождение расчетных и экспериментальных значений не более 0,5 дБ).

В четвертой главе на основе анализа макро- и микроструктуры металла и конструктивных особенностей разработана и экспериментально проверена методика оценки зернистости металла осей колесных пар.

Анализ макро- и микроструктуры металла вагонных осей производства ПО «Уралвагонзавод», Люблинского литейно-механического завода и Улан – Удэнского локомотивовагоноремонтного завода показал, что преимущественная ориентация отсутствует, то есть поликристалл является изотропным в среднем, а форма зерен близка к сферической, что позволяет использовать выбранную модель расчета коэффициента затухания. Величина зерен в металле осей колеблется в диапазоне номеров 1-8, причем все номера могут присутствовать в одном радиальном сечении оси, что говорит о расположении возможной значительной неоднородности металла. Содержание перлита в металле осей колеблется в

пределах $57 \pm 3\%$, что незначительно изменяет коэффициент анизотропии в диапазоне $3,65 * 10^{-3} \leq F_a \leq 3,95 * 10^{-3}$.

Обоснована схема прозвучивания оси с цилиндрической поверхности для оценки зернистости металла и количественно определены поправочные коэффициенты, учитывающие влияние цилиндрических поверхностей ввода и отражения ультразвука.

С учетом конструктивных особенностей разработана методика оценки зернистости металла осей с применением частот 2,5; 5 и 10 МГц, позволяющая одновременно определять номер зерна в диапазоне с 5 по 9 номер и однородность структуры металла с номером зерен 5 и 6.

Для проверки разработанной методики оценки зернистости металла осей было проведено сопоставление экспериментальных и металлографических данных более чем на 50 шлифах с различной зернистостью металла. Все экспериментально полученные данные показывают хорошее согласие с результатами металлографии. Во всех случаях отмечено хорошее согласие расположения экспериментальных точек на номограмме оценки зернистости и результатов количественной металлографии.

На основании теоретических и экспериментальных исследований определены количественные браковочные критерии для ультразвукового метода оценки зернистости вагонных осей, соответствующие требованиям к зернистости металла осей при металлографических исследованиях установленным ГОСТ 31334-2007.

В пятой главе выполнено обоснование функциональных решений аппаратуры реализующей метод и технологии контроля.

Основные результаты и выводы.

1. Впервые обоснованы количественные критерии классификации металла по зернистости для ультразвукового метода, базирующиеся на логарифмически-нормальном законе распределения и критериях, установленных ГОСТ 5639-82.

Полученные аналитические выражения, связывающие видимое изображение металлографического шлифа с числовыми характеристиками логарифмически-нормального распределения зерен металла, позволяют количественно классифицировать металл на однородный, разнородный, мелкозернистый и крупнозернистый.

2. Получено аналитическое выражение для расчета коэффициента упругой анизотропии поликристалла простой доэвтектоидной стали; установлены значения коэффициентов анизотропии для различного процентного соотношения структур феррита и перлита.

В случае достижения равновесного состояния при очень медленном охлаждении коэффициент анизотропии выражается через процентное содержание углерода.

3. Показано, что по отношениям коэффициентов затухания продольных волн на нескольких частотах, возможно, определять средний диаметр зерна (номер зерна по ГОСТ 5639-82) и среднеквадратичное отклонение зерен по размерам в контролируемом сечении (однородность структуры).

Предложенный и разработанный ультразвуковой метод позволяет количественно оценивать структуру металла по амплитудам донных эхосигналов на трех частотах.

4. Разработанная и верифицированная методами макро- и микроструктурного анализа методика оценки зернистости металла осей колесных пар, использующая ультразвуковые колебания частотами 2,5-10 МГц, обеспечивает оценку номер зерна в диапазоне с 5-го по 9-ый номер, а также распределение зерен по размерам, то есть неоднородность структур с номером зерен 5 и 6. Методика прошла проверку при контроле продукции (осей колесных пар) различных заводов-производителей.

5. Обоснованы исходные технические требования, функциональные решения и разработано прикладное программное обеспечение для аппаратуры ультразвукового контроля зернистости структуры металла.

Практическая технология оценки зернистости структуры металла осей колесных пар железнодорожного подвижного состава базируется на разработанных графической номограмме и программном обеспечении, позволяющих оценивать зернистость простой доэвтектоидной стали в зависимости от соотношения структурных составляющих и по результатам измерений ультразвуковым трехчастотным методом.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО
В РАБОТАХ

1. Муравьев В.В., Коробейникова О.В., Кадикова М.Б. Анализ факторов, влияющих на результаты контроля зеркально-теневым методом // Дефектоскопия. 2007. № 9. С. 44-53.
2. Муравьев В.В., Коробейникова О.В., Кадикова М.Б. К вопросу о прозвучиваемости осей колесных пар вагонов // Тез. докл. IX Петерб. конф. УЗДМ-2007. Санкт-Петербург. 2007. С. 80-81.
3. Кадикова М.Б., Гателюк О.В. О влиянии статистики распределения размеров зерен на оценку структуры металла ультразвуковым методом // Омский научный вестник. 2007. №3(60). С. 32-34.
4. Кадикова М.Б. Исследования затухания ультразвука и структуры металла, стандартных образцов СО-2 // Тез. докл. Межд. науч.-практ. техн. конф. Новосибирск. 2007. С. 158-159.
5. Муравьев В.В., Коробейникова О.В., Кадикова М.Б. Анализ факторов, влияющих на прозвучиваемость осей колесных пар вагонов зеркально-теневым методом // Тез. докл. III Росс. науч.-техн. конф. Екатеринбург. 2007. С. 151.
6. Кадикова М.Б., Клюка В.П. Исследование методик экспериментальной оценки структуры металла осей колесных пар ультразвуковым методом // Межвузовский сборник трудов молодых ученых, аспирантов и студентов. 2008. Вып. 5. Ч1. С. 127-131.
7. Дымкин Г.Я., Кадикова М.Б. Ультразвуковой метод количественной оценки структуры металла осей колесных пар // Дефектоскопия. 2009. № 7. С. 27-37.
8. Дымкин Г.Я., Кадикова М.Б. Ультразвуковой метод определения зернистости простой доэвтектоидной стали // Тез. докл. XX Петерб. конф. УЗДМ-2009. Санкт-Петербург. 2009. С. 36.
9. Кадикова М.Б., Гателюк О.В. Количественная классификация металла по зернистости для оценки структуры ультразвуковым методом // Омский научный вестник. 2009. №2(80). С. 72-75.