

Казахский национальный технический университет имени К.И.Сатпаева

УДК 669.1.01; 662.2.01

На правах рукописи

АЛИМАНОВА МАДИНА УНГАРОВНА

**Разработка вибродемпфирующих сплавов на основе железа,
легированных никелем, ванадием и бором**

6D071000 – Материаловедение и технология новых материалов

Диссертация на соискание ученой степени
доктора философии (PhD)

Научные руководители
доктор технических наук,
профессор Утепов Е.Б.,
PhD, professor Kim Yong-II

Республика Казахстан
Алматы, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ БОРЬБЫ С ШУМОМ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ	9
1.1 Производственный шум и вибрация на промышленных предприятиях.....	9
1.2 Влияние шума и вибрации на организм человека.....	17
1.3 Борьба с шумом и вибрацией в источнике возникновения.....	20
1.4 Исследование демпфирующих и виброакустических свойств демпфирующих материалов.....	22
1.5 Методы исследования ударного шума.....	27
Выводы по первому разделу.....	39
2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕМПФИРУЮЩИХ, АКУСТИЧЕСКИХ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ	41
2.1 Влияние легирующих элементов на свойства стали.....	43
2.2 Методика исследования звукоизлучения и виброускорения вибродемпфирующих сплавов.....	49
2.3 Создание наноструктурного покрытия.....	55
2.4 Имитационное моделирование акустической модели образцов в COMSOL Multyphysics.....	60
Выводы по второму разделу.....	64
3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ПОИСКЕ ВИБРОДЕМПФИРУЮЩИХ СПЛАВОВ	66
3.1 Применение методов планирования эксперимента.....	66
3.2 Методы исследования демпфирования.....	67
3.3 Учет погрешности при выплавке стали.....	70
Выводы по третьему разделу.....	82
4 ДЕМПФИРУЮЩИЕ СПЛАВЫ, СНИЖАЮЩИЕ ШУМ И ВИБРАЦИЮ	83
4.1 Исследование вибрационных свойств легированных сталей.....	83
4.2 Исследование акустических свойств легированных сталей.....	90
4.3 Механизмы затухания колебаний в легированных сталях.....	97
4.4 Диссипативные и акустические свойства сталей.....	102
4.5 Влияние термообработки на демпфирующие и акустические свойства сталей.....	107
4.6 Расчет социально-экономического эффекта.....	113
Выводы по четвертому разделу.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	121
ПРИЛОЖЕНИЯ	131

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

КазНТУ – Казахский национальный технический университет;
МИСиС – Московский институт стали и сплавов;
АЗД – амплитуднозависимое демпфирование;
АЗДЗ – амплитуднозависимое демпфирование звукоизлучения;
УЗД – уровень звукового давления;
УЗ – уровень звука;
УВУ – уровень виброускорения;
ОУВУ – общий уровень виброускорения;
НСП – наноструктурное покрытие;
НС – наноструктура;
СЗЗ – скорость затухания звука;
СИЗ – средства индивидуальной защиты;
РЗМ – редкоземельный металл;
 Q^{-1} – внутреннее трение;
 ψ – относительное сужение площади поперечного сечения при разрыве, %;
 σ_B – предел прочности, МПа;
 δ – относительное удлинение, %;
КСУ – ударная вязкость, Дж/см²;
d – диаметр шара-ударника, мм;
 σ_T – предел текучести, МПа.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований. Одной из важнейших проблем промышленного производства является снижение производственного шума и вибрации. Это связано с применением высокоскоростных механизмов и машин. Среди разновидностей шума выделяется механический шум. Его уровни достигают 120-130 дБА. Разновидности механического шума – импульсные и ударные, характеризуются как наиболее вредные.

Шум соударений характерен для отраслей промышленности: металлообработка, черная металлургия, общее машиностроение, энергетика и др. Шум соударений очень вреден, а методы его снижения крайне затруднительны. Традиционные методы снижения шума (звукоизоляция, звукопоглощение, СИЗ, организационные и др.) недостаточно эффективны из-за загромождения рабочих площадей (звукоизоляция, звукопоглощение), маскирования предупреждающих сигналов (использование СИЗ органов слуха), неэффективностью, пожароопасностью, дополнительной запыленностью на рабочем месте (звукопоглощение).

Снижение шума в источнике возникновения – замена ударных процессов на безударные, замена зубчатых передач на клиноременные, использование неметаллических материалов вместо металлических и др., являются эффективными способами гашения производственного шума. Однако по технологическим критериям зачастую эти способы нерациональны.

Для снижения шума в источнике возникновения эффективным является применение металлических материалов с повышенными диссипативными свойствами. Но в настоящее время, конструкторы и технологи имеют недостаточные сведения о диссипативных характеристиках используемых сталей и сплавов. Известная сталь 20ХНР, легированная никелем, хромом и бором, после определенной термической обработки имеет не только различные физико-механические свойства, но и измененные акустические и демпфирующие характеристики. Этот факт при проектировании машин и механизмов зачастую не учитывается.

Анализ литературы показал, что ученые разных стран мира (США, Япония, Венгрия, Россия, Казахстан и др.) ведут поиски в создании новых демпфирующих металлических материалов (Такахара Х., Хидео Н., Хекл М., Писаренко Г.С., Заборов В.И., Фавстов Ю.К., Головин С.А., Сулеев Д.К. и др.), однако в этих работах отсутствуют исследования, посвященные созданию демпфирующих высокопрочных сталей, легированных никелем, ванадием и бором, используемых для ответственных деталей машиностроения (детали из стали 20ХНР, 30ХН2МФА и 38ХН3МФА).

Исследование демпфирующих, акустических и физико-механических свойств широко используемых сталей и сплавов и создание новых сталей с повышенными демпфирующими свойствами является актуальной проблемой в современном материаловедении.

Целью работы является разработка вибродемпфирующих сплавов, на

основе железа, легированных никелем, ванадием и бором для изготовления деталей машин, работающих в режиме соударений и обладающих повышенными демпфирующими свойствами.

К задачам исследования относятся:

- анализ современного состояния борьбы с шумом на промышленных предприятиях;

- исследование акустических, демпфирующих, физико-механических свойств известных легированных сталей;

- разработка новых сталей, легированные никелем, ванадием и бором, с улучшенными характеристиками демпфирования, звукоизлучения и механических свойств (термообработка, нанесение наноструктурного покрытия) для замены известных марок сталей;

- применение метода математического планирования экспериментов для поиска оптимальных значений химического состава вибродемпфирующих, легированных сплавов;

- опытно-промышленные испытания и внедрение полученных новых сплавов с высокими вибродемпфирующими свойствами.

Предметом исследования являются металлические материалы, используемые для деталей машин и механизмов, работающих в режиме соударений.

Объектом исследования являются отрасли промышленности (металлообработка, черная металлургия, энергетика и др.), использующие металлические материалы на основе железа для деталей, работающих в режиме соударений.

Метод исследования. В диссертации использована методика исследований, включая аналитический обзор литературы, патентный поиск, обобщение результатов опыта ученых Казахстана, России, США и др. в создании демпфирующих сплавов в технике борьбы с шумом; физическое моделирование, экспериментальное исследование, применение методов математического планирования экспериментов (МПЭ).

Основные научные положения и результаты выносимые на защиту:

- разработана сталь 3М, легированная никелем (3,5%), ванадием (0,25%) и бором (0,005%) при содержании углерода (0,4%), обладающая повышенными демпфирующими свойствами ($\delta=0,0146$; $\psi=0,0291$; $Q^{-1}=0,0458$), пониженным звукоизлучением при соударении ($L_A=54$ дБА) и достаточными физико-механическими свойствами ($\sigma_B \geq 990$ МПа; $\sigma_T \geq 825$ МПа; $\delta_3 \geq 13\%$; $\psi \geq 45\%$; $KCU \geq 55$ Дж/см², $HV \geq 270$ МПа); термическая обработка стали 3М (закалка при температуре 890°C с охлаждением в масле и высокий отпуск при температуре 650°C) создает тростобейнитную структуру, которая обеспечивает оптимальные прочностные свойства и повышение уровня диссипации (рост внутреннего трения с $4,58 \times 10^{-2}$ до $8,64 \times 10^{-2}$);

- послыжное нанесение наноструктурного покрытия (Ti-Al-N) вакуумно-дуговым методом по 30 нм на поверхность стали 3М (общая толщина покрытия – 3×10^{-6} м), обеспечивает дополнительное снижение шума механического

происхождения на 2-3 дБА при достаточной прочности самого покрытия;

- применение метода математического планирования экспериментов (метод Бокса-Уилсона) позволило резко сократить объем экспериментальной работы и построить логическую схему проведения эксперимента по выплавке демпфирующих сплавов, а также получить уравнение регрессии, с помощью коэффициентов которой оценены семь переменных факторов (содержание углерода, никеля, бора, ванадия, церия; величина наноструктурного покрытия, вида термообработки), влияющих на уровень звука при соударении: $y=62,30X_0-2,02X_1-0,841X_2+0,755X_3+0,451X_4+0,321X_5+0,888X_6+1,112X_7$. При этом, максимальное влияние на уровень звука оказывает содержание углерода (-2,02), вид термообработки (1,112), наноструктурное покрытие (0,888), содержание никеля (-0,841);

- осуществлена опытно-промышленная проверка на предприятиях «КВООиТ» и ТОО «КазТоргПромCompanу» стали 3М (0,4% С, 3,5% Ni, 0,25% V, 0,005% В, остальное железо). Были изготовлены правильная плита для рихтовки в слесарно-сварочном цехе и втулка в направляющей трубе токарного автомата. Снижение шума составило 4-12 дБА по сравнению со сталью 40. Ожидаемый годовой экономический эффект составил 2237000 тенге.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- установлено оптимальное содержание легирующих элементов легированной стали (0,4% С; 3,5% Ni; 0,005% В; 0,25% V; остальное - железо), обеспечивающее снижение шума соударений;

- установлено влияние закалки, (890°C, масло), высокого отпуска (650°C) на повышение диссипативных свойств легированной стали, что снижает уровень шума на 6-19 дБА;

- установлено снижение шума механического происхождения после нанесения нанопокрyтия послойно по 30 нм, общей толщиной 3×10^{-6} м.

Реализация результатов работы: составы разработанных легированных сталей рекомендованы для изготовления деталей машин и механизмов и получены акты внедрения с ожидаемым экономическим эффектом на сумму 2 237 000 тенге в год.

Личный вклад автора. Исследованы характеристики звукоизлучения, внутреннего трения легированных сталей; выплавлены, механически обработаны и исследованы по характеристикам шумоизлучения, демпфирования легированные стали 1М, 2М, 3М, 3М(НС); исследовано влияние термообработки на эффект снижения шума легированной стали.

Обоснованность и достоверность научных положений обеспечивается:

- научными положениями, выводами и рекомендациями, изложенных в диссертации;

- использованием теоретических предпосылок, базирующихся на законах акустики, металловедения, физики, химии, теории демпфирования, колебаний и волн;

- корректностью постановки теоретических задач, принятыми допущениями, достаточным объемом исходных данных и инструментальных исследований;

- совокупностью и удовлетворительной сходимостью результатов аналитических, лабораторных, промышленных исследований характеристик звукоизлучения и виброускорения.

Практическая значимость работы состоит в создании новых легированных сталей с повышенными демпфирующими свойствами и с наноструктурным покрытием, оценке акустических и демпфирующих свойств известных сталей, разработке рекомендаций по снижению производственного шума.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты исследования докладывались и обсуждались на международных конференциях, в том числе: XII международная научно-техническая конференция «Новое в безопасности жизнедеятельности» (КазНТУ имени К.И. Сатпаева, Алматы, 2012); XIV и XV международные научно-технические конференции «Безопасность техносферы» (НИТУ МИСиС, Москва, 2012-2013 гг.); Международная научно-практическая конференция «Современные направления теоретических прикладных исследований-2013» (Одесса, 2013), International Conference «Modern Challenges and Decisions of Globalization» (ICET, New York, 2013). Работа была обсуждена на научном семинаре кафедры «Станкостроение, материаловедение и технология машиностроительного производства» в Казахском национальном техническом университете имени К.И. Сатпаева (2013г.), а также в «Department of Nano-optical Engineering» Корейского политехнического университета, г. Сихыннг (2012г.).

Связь диссертации с планами НИР. Работа выполнялась в соответствии с планом научно-исследовательских работ Казахского национального технического университета имени К.И. Сатпаева. Результаты работы были использованы при выполнении:

- по научно-исследовательской работе № 5.852.11 от 01.09.2011 "Разработка мероприятий по решению вопросов охраны труда, промышленной безопасности", ТОО "Научно-производственная фирма "Мунайгаз инжиниринг ЛТД", сумма 3 336 000 тг.

- гранта МОиН РК по теме №747 МОН. ГФ.12.15 - «Разработка порошковых демпфирующих металлических материалов с регулируемой плотностью» (срок от 02.03.2012 г. до 31.12.2012 г., объем финансирования – 7 000 000 тенге), № гос.рег.:0112РК01996;

- гранта НАН РК по теме №218 МОН. ГФ.12.15 - «Создание демпфирующих многослойных металлических материалов с наноструктурным покрытием», (срок от 04.02.2013 г. до 31.12.2013 г., объем финансирования 7 500 000 тенге).

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 17 статей, из которых 6 статей опубликованы в рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК изданиях четырех различных наименований, 1 статья опубликована в издании, входящем в базу данных Scopus, 10 статей опубликованы в сборниках Международных научно-технических и научно-практических конференциях (Казахстан, Россия,

Украина и США).

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 130 страницах текста компьютерного набора и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, который состоит из 148 наименований, в том числе 17 на иностранном языке. Работа содержит 31 таблицу, 56 рисунка и 6 приложений.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ БОРЬБЫ С ШУМОМ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

1.1 Производственный шум и вибрация на промышленных предприятиях

Современное промышленное оборудование характеризуется применением высокопроизводительной техники, машин и оборудования, работа которых сопровождается выделением вредных и опасных производственных факторов. И в связи с этим, в настоящее время практически нет ни одной отрасли экономики, где шум и вибрация не были бы в числе ведущих неблагоприятных факторов производственной среды.

С бурным развитием техники, сопровождающимся постоянным увеличением мощности и производительности машин, скорости их рабочих органов, шумность на рабочих местах промышленных предприятий постоянно возрастает на 1-3 дБ в год и во многих случаях превышает допустимые уровни. Поэтому борьба с шумом на производстве является важной научной проблемой, с которой приходится сталкиваться инженерам буквально всех специальностей, особенно в машиностроении, металлургической промышленности, в горной промышленности, в строительстве, энергетике. Шум соударений выделяется среди видов механического шума высокой интенсивностью и особой вредностью.

Приведены процессы шумообразования поездов, показаны основные источники шума. Показаны зависимости шума поездов различных типов от скорости. Исследованы процессы уменьшения шума в зависимости от рельефа местности и вида искусственных сооружений. Выполнено сравнение эффективности средств защиты от шума поездов [1].

Железнодорожный транспорт – один из основных источников шума в жилой застройке. Так, например, шум от поездов на расстоянии 25 м в железнодорожных узлах городов Москвы составляет 71-82 дБА (превышение 16-27 дБА); Санкт-Петербурга – 71-76 дБА (превышение 16-21 дБА).

Основной источник шума – ударный процесс взаимодействия колеса с рельсом на микронеровностях последнего. Данные о характере шумообразования сведены в таблице 1.

Таблица 1 - Характер шумообразования поезда [1, с. 25-29]

Источники шума	Ориентировочный вклад и процессы шумообразования, %	Основной частотный диапазон излучения звука, Гц
Колесо	Менее 30	1000-4000
Рельс	Менее 70	500-2000
Шпалы	1-2	до 400
Корпус подвижного состава, тормозные колодки	3-5	до 400

Для разработки и выбора эффективных мер защиты от шума поездов был выполнен комплекс исследований: уточнение механизмов шумообразования; исследования распространения шума от поездов в окружающей среде при различиях в рельефе местности; исследования средств шумозащиты и их сравнительный анализ [2-10].

Скорость – основной параметр, влияющий на шум поезда. На скоростях до 50 км/ч, как правило, превалирует шум двигателей и вспомогательных установок, в диапазоне свыше 50 и до 200 км/ч – основной вклад приходится на шум от взаимодействия колеса с рельсом, а при скоростях свыше 200 км/ч начинает проявляться вклад аэродинамического шума.

Дополнительными источниками шума поездов являются тормозные колодки, стыки рельсов, пантограф, сцепка и др.

По полученным данным можно подвести следующие выводы [1, с. 25-29]:

1. Проведен анализ источников внешнего шума и звуковой вибрации различных типов поездов: электропоезда, пассажирские, скоростные, грузовые с различными скоростями движения. Установлено, что для всех типов поездов на всех скоростях движения основным источником шума является пара "колесо-рельс"; не обнаружено вклада сцепки и пантографов в процессы шумообразования. Это означает, что основные меры защиты окружающей среды должны быть направлены на борьбу с высокочастотными источниками. Тем самым обосновано, что применение акустических экранов (они тем эффективнее, чем ниже расположен источник шума для средне-, высокочастотного шума) целесообразно.

2. Установлена связь процессов образования шума со скоростью движения для электропоездов, пассажирских и скоростных поездов. (Отметим, что для грузовых поездов эта связь носит более сложный характер, так как параметры шума зависят не только от скорости движения, но и от загруженности подвижного состава).

3. Экспериментальные исследования снижения шума поездов на плоском участке показали:

– снижение шума с расстоянием определяется геометрическим расширением фронта звуковой волны от протяженного источника (поезд) – характер звуковой волны в зависимости от расстояния может быть цилиндрический или сферический, звукопоглощением растительности на плоской поверхности, молекулярным затуханием звука в воздухе (на больших расстояниях и на высоких частотах);

– характер снижения шума зависит от типа поезда, это объясняется тем, что на снижение шума за счет геометрического расширения влияет длина поезда (разницы УЗД составляют от 3 до 5 дБ);

– снижение шума с расстоянием (по указанным причинам) имеет частотнозависимый характер (разница по частотам составляет до 10 дБ).

4. При прохождении поезда в выемке шум резко снижается из-за создания звуковой тени склоном выемки; край выемки является вторичным излучателем звука. Снижение УЗД и УЗ зависит от глубины выемки: дополнительное

снижение УЗ составляет для разных типов поездов до 3 дБА на каждый дополнительный метр выемки. Снижение УЗ глубокой выемкой достигает 20 дБА (по сравнению с плоским участком).

5. При прохождении поездов по насыпи, кроме геометрического расширения фронта звуковой волны, действуют два противоположных механизма: создание верхней плоскостью выемки экранирующего эффекта и тем самым образование звуковой тени вблизи насыпи, а также прямое излучение звука без звукопоглощения от источника в точку наблюдения (прямой звук). Это приводит к тому, что суммарное снижение (по сравнению с плоским участком) оказывается меньше на 2-3 дБА.

6. Многие из полученных эффектов в методической литературе не отображены и должны учитываться при расчетах шума поездов в окружающей среде. Современные методики расчета шума поездов не обеспечивают требуемой точности.

Рассмотрена методика выбора рациональных параметров листовых материалов, предназначенных для изготовления звукоподавляющих панелей.

Эта методика позволяет обеспечить минимальную поверхностную плотность звукоподавляющих панелей при условии сохранения на должном уровне их звукоизоляции и коэффициента звукопоглощения [11].

Как видно, из результатов этого исследования авторами совершенно не учитываются демпфирующие свойства металлических деталей поезда и их термообработка (колеса, рельсы и др.). А ведь термообработка существенно влияет на эффект диссипации в структуре сталей.

Имеются результаты исследования вибрационных характеристик газотурбинных установок, а также рассмотрены способы снижения виброактивности турбомашин [12].

Надежность работы энергоблоков в значительной мере определяется их вибрационным состоянием. Непосредственным источником вибрации турбоагрегатов является валопровод, передающий при вращении через масляную пленку динамическую неуравновешенность на корпуса опорных подшипников, которые оказывают вибровоздействие на оболочки цилиндров и фундаменты установки.

Вибрация турбоблока может происходить в трех взаимно перпендикулярных направлениях – вертикальном, горизонтально-осевом и горизонтально-поперечном, параметры которых регистрируются в подшипниках с помощью датчиков.

Негативные последствия даже умеренных вибраций имеют свойство накапливаться и проявляться в различной форме. Это может найти выражение в появлении усталостных трещин в роторе, штоках регулирующих клапанов, чугунных опорах; опасности повреждения уплотнений турбины, водородных уплотнений генератора и системы охлаждения; полусухого трения в подшипниках; в ухудшении работы системы регулирования.

Необходимо учитывать также негативное воздействие вибрации на обслуживающий персонал.

Опыт эксплуатации показывает, что примерно 20% времени вынужденных простоев турбомашин связано с вибрационной наладкой.

Низкочастотная вибрация, основной причиной возбуждения которой служит потеря ротором динамической устойчивости на масляном слое опорных подшипников, считается наиболее опасной.

Так, санитарными нормами, вибрация рабочих площадок обслуживания турбомашин ограничивается виброскоростью на уровне 2,0 мм/с на частотах более 8 Гц (ГОСТ 12.1.012-2004) [13].

Основной целью нормирования технических уровней вибрации является решение диагностической задачи – создание условий эксплуатации, при которых имеется возможность обнаружения даже незначительных повреждений деталей на начальной стадии их формирования. Для этого производится нормирование вибрации опор подшипников, корпусов цилиндров, фундаментов и маслопроводов.

Вибрационное состояние турбоблока следует оценивать по наибольшему значению виброскорости его элементов, так как разрушительные свойства вибрации определяются преимущественно энергией колебаний.

Опыт энергомашиностроения показал, что наиболее эффективным способом уменьшения виброактивности турбоблоков является разработка мер по снижению динамической неуравновешенности системы в источниках ее формирования при конструкторской проработке как на стадии проектирования, так и модернизации и доводки технических образцов.

Вместе с тем, на тепловых и компрессорных станциях широко используются "пассивные" способы сокращения генерируемых в системах нестационарных колебательных процессов, распространяющихся по структуре турбомашин. Такие виды гашения возмущающих сил могут быть реализованы на практике путем конструктивной амортизации оборудования и составляющих элементов установок с помощью как специальных опорных систем (резинометаллических, цельнометаллических и металлотканых амортизаторов, опор с регулирующей жесткостью, вибропоглотителей, динамических гасителей колебаний, виброизоляторов и др.), так и неопорных устройств (гибких вставок в трубопроводы и присоединительные к механизму валопроводы, резонансных преобразователей, гибких участков кабелей и т. д.) [14].

Важным средством уменьшения вибрации, излучаемой отдельными элементами энергоустановок, является оборудование их системами виброгашения, оснащенными высокоэффективными вибродемпфирующими материалами, вибропоглощающими покрытиями и конструкциями.

Приведены расчетные и экспериментальные частотные характеристики вибровозбудимости и шумоизлучения бетонного междуэтажного перекрытия. Произведена оценка сходимости расчетных и экспериментальных данных. Даны рекомендации по использованию расчетных формул для выполнения приближенных оценок уровней вибрации и структурного шума, создаваемого технологическим оборудованием [15].

Известно, что звуковая энергия распространяется от инженерно-технологического оборудования в виде воздушной и структурной составляющих.

Первая составляющая связана с распространением воздушного шума от оборудования по воздуховодам и по воздушной среде помещений через их ограждения (междуэтажные перекрытия, стены и перегородки). Вторая составляющая – структурный шум, возникает вследствие действия на установочные и другие строительные конструкции динамических сил со стороны оборудования через его опорные (лапы) и неопорные (воздуховоды, трубопроводы и т. д.) связи и последующего распространения возникающей при этом вибрации по конструкциям с ее переизлучением в воздушную среду помещений.

В практике защиты от шума необходимое внимание, как правило, уделяют лишь первой составляющей. Соответствующие проектные работы выполняют с использованием рекомендуемой методической и нормативной документации, например [16].

Имеющиеся в технической литературе [17-25] способы (средства) снижения уровней вибрации и структурного шума от работы оборудования в практике акустического проектирования зданий в полной мере не используются. Такая ситуация является следствием ряда причин, к основным из которых отнесем следующие:

- недооценка роли структурной составляющей в формировании шума от работы оборудования;

- отсутствие методики расчета уровней структурного шума и руководящего документа, предписывающего в обязательном порядке выполнять соответствующие расчеты и разрабатывать при необходимости мероприятия по уменьшению этих уровней;

- отсутствие исходной информации для выполнения расчетных оценок уровней структурного шума (сведений об уровнях вибрации или динамических сил на лапах и фланцах оборудования, о величинах механического сопротивления строительных конструкции по отношению к силам и моментам, действующим на них со стороны оборудования, о значениях коэффициента ослабления вибраций при их распространении по строительным конструкциям, о величинах коэффициента потерь колебательной энергии в строительных конструкциях и коэффициента шумоизлучения этих конструкций и т. д.).

Проведены и проанализированы узкополосные и третьоктавные частотные характеристики вибровозбудимости и шумоизлучения бетонного междуэтажного перекрытия, возбуждаемого сосредоточенной силой. Показано, что в узкополосных спектрах вибраций и шума содержатся максимумы, возникновение которых связано с резонансными колебаниями перекрытия. По пространственному распределению уровней вибраций колебания перекрытия на трех низших резонансных частотах подобны квазиизгибным колебаниям, имеющим по всей видимости разные уровни в сходственных точках на возбуждаемой и противоположной поверхностях перекрытия. Возникновение

максимумов на более высоких частотах вероятнее всего связано с резонансными колебательными процессами в направлении высоты перекрытия.

Шум – один из наиболее распространенных вредных факторов окружающей среды. Вследствие увеличения мощности и числа автомашин на улицах городов, оборудования на производстве, санитарно-технического и другого оборудования зданий и сооружений суммарная звуковая мощность источников шума непрерывно повышается. Это обстоятельство наряду с необходимостью уменьшения массы ограждающих звукозащитных конструкций значительно затрудняет решение задачи защиты от шума и в то же время делает ее с каждым годом все более актуальной [26]. Одним из направлений повышения эффективности звукозащитных конструкций является разработка панелей, обладающих минимальной массой и максимальными акустическими характеристиками [27-36].

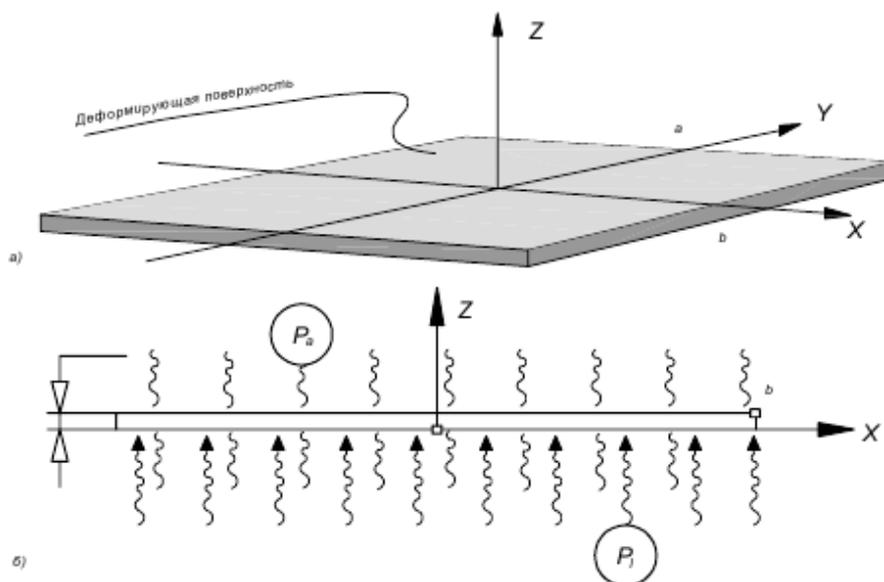
Звукозащитные панели изготавливают из различных материалов, среди которых значительную часть составляют листовые материалы. Эти материалы для обеспечения максимального эффекта звукозащитных панелей должны обладать способностью к максимальному демпфированию воздухом. Сочетание физических параметров листового материала должно быть таким, чтобы окружающая воздушная среда обладала максимальным влиянием на движение поверхности этого листа. Как указывает акустик-практик Р. Тейлор, рабочая характеристика панельного, или мембранного, поглотителя очень сходна с характеристикой резонатора Гельмгольца [27]. Такой поглотитель можно изготовить из любого материала, отвечающего следующим основным требованиям: подходящая масса, достаточное затухание и достаточная гибкость. Незадемпфированные жесткие панели могут только ухудшать положение в результате появления гармоник.

Рассмотрим фрагмент листового материала в виде пластины, находящейся в состоянии вибрации и демпфируемой окружающей средой, что показано на схеме (рисунок 1).

Для определения величины снижения уровня звука, излучаемого пластиной, используем метод волнового сопротивления тонких пластин.

Дано описание аналитического определения распределения уровней звукового давления в соответствии с требованиями ГОСТ 31295.2-2005 с использованием понятия дозы шума как показателя, характеризующего биологическое воздействие шума на организм человека во времени.

Полученное распределение позволяет определять возможные альтернативы регулирования динамики групп населения с целью минимизации шумовых доз, источником которых являются транспортные потоки [34].



а – аксонометрическая проекция; б – сечение панели и схема движения звуковых потоков

Рисунок 1 - Схема фрагмента листового материала в виде пластины [25]

Все возрастающее беспокойство вызывает динамика роста антропогенного воздействия человека на окружающую среду во всех его сферах деятельности. Экологическая ниша современного человека в гораздо большей степени определяется социальными условиями, нежели собственными биологическими критериями и факторами окружающей природной среды. В этих условиях возрастает роль массовых коммуникаций, определяющих поведение человека по отношению к окружающей среде.

Шумовое загрязнение окружающей среды жилых районов особенно интенсивно воздействует на районы с высокой плотностью населения, влияя на жителей и их повседневную жизнь. В сравнении с другими методами оценки влияния окружающей среды, шумовое картографирование как один из лучших путей понимания шума окружающей среды выявляет новые источники, которые оказывают существенное влияние на формирование общественного мнения.

Карта шума преследует следующие цели:

- классификация основных источников шума;
- доступная иллюстрация шума окружающей среды для сбора общественной оценки;
- облегчение контроля шума окружающей среды и практическая организация эффективного контроля шума;
- экономическое обоснование мероприятий по оказанию помощи районам, желающим понизить шум;
- проверка теорий шумовых эффектов в окружающей среде и составление планов улучшения;

- защита новых, чувствительных к шуму городских застроек;
- контроль схем снижения шума и их эффективности;
- обеспечение научно-статистической базой изучения воздействия шума на человеческий организм в условиях города.

Полученное распределение учитывает количество населения, площадь распределения населения, особенности его динамики (на примере простого перемещения), время воздействия соответствующих уровней шума. Это позволяет выделять и наглядно представлять конкретные области, требующие профилактики источников шума и регулирования распределения численности групп населения на отдельных участках рассматриваемой территории, определять возможные альтернативы регулирования динамики групп населения с целью минимизации доз шума, источником которого являются транспортные потоки.

Рассмотрена акустическая модель для расчета звуковой мощности, излучаемой деформированными волокнами древесины при пилении ее круглыми пилами. В основу модели положен точечный источник шума (монополь) и рассмотрен механизм возникновения шума при пульсирующей нагрузке с учетом геометрии срезаемого слоя древесины [37].

Круглопильные станки относятся к разряду наиболее шумного деревообрабатывающего оборудования, уровни звука на рабочих местах которых достигают 110-115 дБА) В соответствии с санитарными нормами СН 2.2.4/2.1.8.562-96 класс условий труда по шумовому фактору на рабочих местах находится в пределах 3.2-3.4, т. е. условия труда являются вредными.

Снижению шума при резании древесины круглыми пилами посвящены многие исследования как у нас в стране, так и за рубежом [38-42].

Общие выводы этих исследований можно сформулировать следующим образом:

- основной вклад в механизм шумообразования дает процесс взаимодействия пилы с обрабатываемым материалом;
- спектр шума рабочего хода имеет ярко выраженный высокочастотный характер;
- шум холостого хода носит аэродинамический характер;
- в шуме рабочего хода круглопильных станков превалирует шум механического происхождения (колебания древесины в пропилене и вибрации пильного диска).

Предложенный инженерный расчет позволяет прогнозировать соотношения между звуковыми мощностями различных источников шума при пилении древесины круглыми пилами и более обоснованно намечать мероприятия по снижению их шума.

Опыт многолетних работ по снижению шума круглопильных станков показывает, что для уменьшения уровня звуковой мощности необходимо снижать скорость резания и подачи, а также, по возможности, выбирать пильные диски с меньшим числом зубьев. Это приведет к снижению как шума от перерезывания волокон древесины, так и шума, излучаемого пильным.

Однако эти меры ограничены технологическими требованиями пиления древесины и дают недостаточный акустический эффект (порядка 5-7 дБ).

Поэтому наряду с указанными рекомендациями необходимо использование комплекса архитектурно-строительных мероприятий: звукоизолирующих кожухов и экранов, ограничивающих распространение шума на рабочее место станочника, а также звукопоглощающей облицовки ограждающих конструкций производственных помещений, где установлены станки.

1.2 Влияние шума и вибрации на организм человека

Эффективность работы любого предприятия зависит от максимального использования производственного потенциала работающих. И конечно же, основное значение в связи с этим приобретает укрепление здоровья и увеличение периода профессиональной активности работающих.

Шум – комплекс звуков, неблагоприятно воздействующих на организм человека, беспорядочное сочетание различных по силе и частоте звуков. Источником шума является любой процесс, вызывающий местное изменение давления или механические колебания в твердых, жидких и газообразных средах. Действие его на организм человека связано главным образом с применением высокопроизводительного оборудования.

Неблагоприятные последствия действия шума на организм достаточно хорошо изучены. Накопленный в мировой практике опыт позволяет считать шум причиной целого ряда нарушений в центральной нервной и сердечнососудистой системах. Известно, что шум – это общебиологический раздражитель. Он воздействует не только на орган слуха, но и на весь организм в целом. Действие шума можно разделить на специфическое, которое проявляется в изменениях в слуховом анализаторе, и неспецифическое, возникающее в других органах человека.

Специфическое воздействие на орган слуха проявляется в ауральных эффектах. Оно представляет собой медленно прогрессирующее понижение слуха по типу неврита слухового нерва (кохлеарный неврит). Патологические изменения затрагивают оба уха в одинаковой степени.

Профессиональная тугоухость развивается у работников при длительной работе в условиях высоких уровней шума. Тугоухость появляется от воздействия многих факторов: индивидуальная чувствительность слухового анализатора, длительность воздействия шума в течении рабочей смены, интенсивность производственного шума.

Неспецифическое воздействие шума проявляются у работников шумных производств в первые годы работы. Появляются симптомы, характеризующие реакцию центральной нервной системы: жалобы на головные боли, которые могут иметь разную интенсивность и локализацию, головокружение при перемене положения тела, снижение памяти, повышенную утомляемость, сонливость, нарушения сна, эмоциональную неустойчивость, снижение аппетита, потливость, боли в области сердца и т.д. Реальное ощущение

снижение слуха обычно возникает значительно позже, хотя аудиологические признаки снижения порога слышимости можно выявить гораздо раньше.

Особое внимание также нужно уделить тому, что воздействие шума может способствовать нарушению функции сердечнососудистой системы. К примеру, широкополосный шум уровнем выше 90 дБА, в котором преобладают высокие частоты, способен спровоцировать развитие артериальной гипертензии. Также отмечается, что широкополосный шум является причиной значительных изменений в периферическом кровообращении.

В работе [43] показаны результаты исследования влияния шума с частотой 63 Гц на работников горной промышленности, имеющих контакт с локальной вибрацией на производстве, и испытуемых добровольцах не имеющих контакта. Для оценки напряжения было проведено изучение состояния ряда функциональных систем организма: сердечнососудистой, нервно-мышечной и терморегуляционной системы. Проводились измерения артериального давления и изучение частоты шума, что давало возможность в некоторой степени судить о вегетативных сдвигах в организме. Исследования показали достоверное повышение порогов слуховой чувствительности после воздействия 1 часа шума у испытуемых со стажем 5 лет на частотах 2000 Гц, 8000 Гц, со стажем свыше 5 лет на частотах 4000 Гц, 6000 Гц, 8000 Гц. Порог чувствительности у вышеуказанных групп после воздействия шума повышался в организме на частотах 2000 - 8000 Гц на 8,6-17,8 дБ. Количество сердечных сокращений после воздействия шума увеличилось во все периоды.

Для измерения импульсного звука следует применять аппаратуры и методы, отличающиеся от тех, которые применяются для измерения стационарного или продолжительного звука. Время нарастания звукового давления для таких приборов должно быть не более 50 мкс. В работе [44] отмечено, что для определения опасных уровней воздействия импульсного шума промышленные серийные шумомеры не подходят, так как их периоды интегрирования не соответствуют требованиям измерения кратковременного звукового сигнала. Импульсный шум способствует прямому разрушению мерцательного эпителия и величину этого импульса можно измерить только с помощью приборов, обеспечивающих определение пикового значения и имеющих постоянное время интегрирования 20 мкс.

Авторами [45] установлено, что снижение слуха вызывается воздействием импульсов, имеющих очень высокие пики звукового давления и достигающие 140 дБ. Если чистый тон поддерживается постоянным значением в течение продолжительного времени, органы слуха человека будут ощущать его постоянную громкость в течение соответствующего времени. Если же звук длится в течение короткого времени, менее 200 мс, органы слуха будут ощущать его как менее громкий, чем он есть на самом деле, и чем короче звук, тем слабее он звучит. Так как человеческое ухо даже отдалено ощущает громкость коротких звуковых импульсов, возникает вопрос: "Как может быть повреждено ухо этими так слабо звучащими импульсами?"

Изучение органов слуха человека доказывает, что короткие импульсы передаются без помех, как через наружное, так и через среднее ухо к нервам кортиева органа, а в кортиевом органе нервные окончания подвергаются воздействию полных амплитуд, также коротких звуковых импульсов. Мозг воспринимает частоты свыше 50 Гц исключительно благодаря тому, что основная часть частотного анализа уже выполнена во внутреннем ухе и передана в различные части мозга по параллельным нервным волокнам.

Именно то, что звуковое ощущение сначала оценивается в мозге, делает возможным восприятие короткого импульса менее громким, чем длинного [46]. Известно, что потеря слуха начинается в области частот 4-6 кГц, и как правило, наиболее сильно действует частота 6 кГц, независимо от того, повреждение органов слуха произошло от импульсного или постоянного шума. Вместе с тем промышленные шумы в области частот 250-500 Гц имеют интенсивность большую, чем в области 6 кГц. Поэтому возник вопрос, почему потеря слуха, вызванная шумом, происходит по шкале звуковых частот тремя октавами выше района частот звуков с наибольшим содержанием энергии.

Авторами [47] было сделано предложение, что на частоте 4 кГц существует резонансное усиление на 3-19 дБ в наружном и среднем ухе. Поэтому вредное действие промышленного шума на органы слуха начинается в области частот около 4 кГц, частично, потому что большинство шумов высокого уровня лежит в этой области (хотя человеческое ухо не может слышать их с истинной громкостью), а частично из-за резонанса уха при 4 кГц, который еще более усиливает периодическое звуковое давление с частотой 4 кГц. Отсюда можно сделать вывод, что работающий подвергается действию импульсного шума, который более интенсивный, чем это ощущается органами слуха. Однако импульсы настолько длины, что они достигаются внутреннего уха с максимальной амплитудой. Короткий импульс, распространяющийся по наружному уху, может вызвать действие на барабанную перепонку уха на 6-7 дБ выше самого высокого звукового давления вне уха. Во время прохождения через среднее ухо может произойти дальнейшее подобное усиление, так что сигналы с частотными составляющими от 4 до 6 кГц могут достигнуть внутреннего уха с общим усилением 10-12 дБ. Если амплитуда импульсов достаточно высока, нервные окончания повреждаются даже если нормальный шумомер покажет, что шум ниже опасного уровня.

Вышеописанное явление изменения порога слышимости при 4 кГц позволяет сделать заключение о том, что при оценке вредного действия шума, а следовательно при установлении максимально допустимых уровней шума, следует определять шумовые характеристики не только нормальным шумомером, но и шумомером, позволяющим оценить импульсную составляющую шума. Представляет интерес, насколько значение импульсной составляющей с временем интегрирования порядка 10-30 мкс превышает значение такой же составляющей с временем интегрирования 35 мкс.

1.3 Борьба с шумом и вибрацией в источнике возникновения

Наиболее рациональным методом борьбы с шумом является снижение шума его в источнике возникновения, что достигается заменой ударных процессов безударными, применением материалов с повышенными демпфирующими свойствами. Решение проблемы шума при использовании сплавов высокого демпфирования возможно осуществить лишь в том случае, если опираться на конкретные результаты исследований, так как для различных классов материала формирование способности поглощать энергию звуковых колебаний самой структурой в зависимости от множества факторов, таких как соотношение структуры, вид технологической обработки и т.д. Данные о влиянии химического состава сплавов на их демпфирующие свойства, позволяет сделать предположение о возможности разработки составов низколегированных сталей с высокими демпфирующими свойствами [48, 49].

Анализ исследований источников шума в горной промышленности показывает, что на рабочих местах преобладает средне- и высокочастотный шум, который составляет 85-100 дБ, а в некоторых случаях достигает 110-120 дБ. Источником ударного шума в горной промышленности являются: ударно-поворотные бурильные машины, бурильные машины вращательного действия, отбойные молотки, конвейеры, проходческие комбайны, горная машина, перфораторы, грохоты, вибраторы, транспортные машины, скреперные установки, рельсовый транспорт, вибрационные питатели, скребковые конвейеры. Значения уровня шума здесь достигают 120-135 дБ, что на 40-45 дБ выше допустимых санитарных норм.

Необходимо отметить, что шум горной техники не удастся сильно снизить ни звукопоглощением, ни звукоизоляцией, ни использованием СИЗ органов слуха. Авторами [50, 51] было предложено снижение уровня шума этих машин и механизмов методом снижения его в источнике возникновения за счет демпфирующих сплавов.

Шум воздушных судов можно снизить за счет использования сплавов с повышенными демпфирующими свойствами. Эти сплавы могут быть использованы для деталей двигателя и других узлов, где происходят ударные процессы, генерирующие шум [52].

Проведены статические испытания кольцевых канатных виброизоляторов используемых в конструкциях виброзащитных систем ручных машин ударного действия. Исследовано влияние геометрических параметров виброизоляторов на их упруго-демпфирующие свойства. Высокий уровень вибрации и шума, сопровождающий эксплуатацию ручного ударного инструмента во всех сферах производства, приводит к снижению производительности труда, ухудшению качества выпускаемой продукции и самочувствия работающих. Особую опасность представляет локальная вибрация, которая действует на руки работающего и оказывает весьма серьезное влияние на здоровье человека [53].

Исследованиями, проведенными с персоналом, работающим с виброинструментом, установлено, что уже в течение 90 мин при работе с таким инструментом наблюдается выраженное нарушение вибрационной

чувствительности, мышечной выносливости, повышается артериальное давление. Поэтому необходимо своевременно принимать меры по снижению вибрации, не допуская появления признаков профессионального заболевания. Установлено, что величина локальной вибрации значительно превышает санитарные нормы практически на всех частотах (кроме 1000 Гц) в 2,7 – 7,5 раз [54].

Методы подавления вибровозбуждения ручных машин продолжают совершенствоваться и находят реализацию в конструкциях создаваемых машин. Однако без применения средств виброизоляции и демпфирования до конца решить проблему виброзащиты пока не удастся. В качестве упругих элементов в виброзащитных системах наиболее широко используются пружины, резина, каучук, виброизоляторы на основе материала МР, а также многослойных элементов с регулярной структурой (пакеты стержней, колец, лент) [55]. Перспективным, с точки зрения высоких упругодемпфирующих свойств, прочности, малой стоимости и простоты изготовления, являются виброизоляторы, выполненные из металлического каната (троса).

В работе [56] были предложены виброзащитные системы ручных ударных машин на основе кольцевых канатных виброизоляторов, благодаря которым достигается снижение уровня вибрации, воспринимаемой руками оператора от действия колеблющегося корпуса, а также увеличивается степень прижатия инструмента к обрабатываемой среде.

Предложена новая конструкция устройства для снижения шума от круглопильных деревообрабатывающих станков [57]. Для снижения шума круглопильных деревообрабатывающих станков (уровень шума на рабочем ходу составляет 111-115 дБА) наиболее эффективно снижение звукоизлучения в источнике его возникновения. Доминирующим источником шума является пильный диск, в меньшей степени – другие конструктивные узлы станка (электропривод, станина и др.). Звуковую вибрацию пильного диска можно снизить до 6-8 дБА за счет применения вибродемпирующих материалов, контактирующих с его поверхностью. Наиболее эффективно использование конструкции из прокладочных материалов (с заданными вибродемпирующими свойствами), помещенной между пильным диском и зажимными фланцами деревообрабатывающего станка. В этой конструкции могут быть использованы эластичные вязкоупругие материалы, в которых диссипация вибрационной энергии происходит за счет вязкого трения (в самом материале).

В этой работе [58] предлагается новая конструкция сборного токарного резца и применяется синтегран, обладающий высокой демпфирующей способностью, во вставке державки с целью уменьшения вибрации при резании и повышения стойкости режущего инструмента. Используются три вида резца: цельнометаллический резец, резец со сквозными горизонтальными отверстиями, расположенными в шахматном порядке во вставке державки и резец со сквозными горизонтальными отверстиями, расположенными в шахматном порядке и заполненными синтеграном. Используются три разных

состава синтеграны с различной демпфирующей способностью во вставке державки: нормальный, жесткий и пластичный синтеграны. Разработана компьютерная модель сборных токарных резцов и изучены их статическое и динамическое поведения, в результате чего получены прогиб вершины резцов, частота собственных колебаний, амплитуда наибольшего вибро смещения режущей кромки резцов. Анализы проведены при различных вылетах как один из важнейших факторов, влияющий на точность обработки. Экспериментально проведен статический анализ резцов и результаты сравнены с компьютерными данными. В результате установлено, что с увеличением вылета смещение вершины резца увеличивается, а частота собственных колебаний уменьшается; модель, заполненная нормальным синтеграном, имеет наименьшую частоту по сравнению с другими моделями; применение синтеграны в державке уменьшило вибрацию и увеличило стойкость резца.

1.4. Исследование демпфирующих и виброакустических свойств демпфирующих материалов

Влияние диссипации на шум от механических ударов исследованы в работе [45, с. 65-69]. В этом исследовании возбуждали механическими ударами пять стальных пластин, каждая из которых имела разную степень структурного демпфирования. Звук, излучавшийся пластиной в результате удара, измеряли шумомером, выходной сигнал которого регистрировали на запоминающем осциллографе. Одновременно группа слушателей оценивала субъективную неприятность звуков, создаваемых этими пластинами. Демпфирование снизило максимальное звуковое излучение пластиной, уменьшило время нарастания и спада ее колебаний (таблица 2). Длительность звучания пластины также уменьшилась.

Таблица 2 - Ослабление излучения звука демпфированной пластиной относительно недемпфированной [45, с. 65-69]

Пластина толщиной 3,2 мм, демпфированная слоем материала толщиной	Разность максимального звукового уровня давления, дБ
Без демпфирования	0
Слой 0,9 мм	-2,2
Слой 1,6 мм	-4,3
Слой 3,2 мм	-9,5
Слой 6,3 мм	-9,5

В научном исследовании с применением метода математического планирования эксперимента были выплавлены сплавы на основе железа, легированные углеродом, кремнием, никелем, хромом, ванадием, ниобием, молибденом, титаном, алюминием, бором, церием, кальцием, лантаном [51, с. 45-47]. Авторами были разработаны демпфирующие сплавы 126 (1,0% Nb;

0,72% Mo; 0,73% Ti; 1,5% Al; 1,0% Ca; 0,5% La; 0,76% Cr; 0,58% Ni; 0,73% V) и 135 (0,4% C; 2,89% Cr; 1,0% Al; 1,0% Ca; 1,5 % La; 0,5 % Cu). Сплав 126 характеризуется следующими демпфирующими свойствами: $L_A=80,7$ дБА, $\delta=0,026$, $V_{C33}=533,3$ дБА/с. Содержание неметаллических включений среднее ($4,526 \times 10^{-2}$ %). Структура сплава состоит из смеси феррита и перлита с некоторым содержанием неметаллических включений. Сплав 135 характеризуется относительно высокими демпфирующими свойствами $L_A=79,6$ дБА, $\delta =0,026$, $V_{C33}=666$ дБА/с. Это объясняется тем, что хотя общее содержание неметаллических включений не самое высокое ($3,436 \times 10^{-2}$), но наличие крупных образований обеспечивало высокую диссипацию звуковой энергии.

Авторами [59-67] разработаны металлические материалы с повышенными диссипативными характеристиками.

Исследованы металлические материалы на основе железа, легированные кремнем, марганцем и никелем [62]. Эти материалы используются для изготовления деталей транспортного оборудования с повышенными демпфирующими свойствами, обеспечивающие снижение шума в источнике возникновения. Опытные сплавы выплавляли в тигельной индукционной печи емкостью 12 кг с основной футеровкой. Исходным материалом служило арможелезо. Легирование производили 97,6 %-ным металлическим марганцем, 77,5 %-ным FeSi и 99,98 %-ным металлическим никелем. Углеродосодержащей добавкой служил синтетический чугун с содержанием углерода 3,9 %. Стали отливали в металлическую изложницу размерами 210×115×115 мм. Все сплавы в диапазоне частот 0,5-2 кГц при мелкозернистой структуре демпфируют звуковые волны лучше, чем эти же сплавы с более крупным зерном. Тогда как на частотах выше 2 кГц лучшие демпфирующие характеристики появляются при крупнозернистой структуре. Та же закономерность проявляется у других сплавов. Одной из причин повышенного уровня демпфирования звуковой энергии крупнозернистой структурой является то, что на высоких частотах 4-16 кГц определяющих общий уровень звукового давления, длина изгибающей звуковой волны имеет минимальные размеры, соизмеримые с размером крупнозернистой структуры.

Исследованы характеристики звукоизлучения сплавов после литья, последующих отжига и закалки с низким отпуском [63]. После литья, заготовка подвергалась нормализации при комнатной температуре. Отжиг проводили по режиму нагрев до $A_{c3}+50^\circ\text{C}$, выдержка 1 час, охлаждение с печью. Закалку проводили по режиму: нагрев до $A_{c3}+50^\circ\text{C}$, выдержка 0,5 часа, охлаждение в масле. Низкий отпуск - нагрев до $200-210^\circ\text{C}$, выдержка 0,3 часа, охлаждение. Если после литья металл находился в неравновесном состоянии, то отжиг привел все сплавы в равновесное состояние, снял напряжение и стабилизировал структуру. Сплавы с ферритным зерном (сплавы 723, 724, 732, 730, 772) или ферритно-перлитным обеспечивают более высокое гашение звуковой энергии, чем перлитная структура. Это связано с различной степенью анизотропии зерен перлита и феррита. Перлит - это тонкодисперсная смесь феррита и цементита,

значительно слабее рассеивающая звук, чем зерна феррита. Структура сплава 732 в литом состоянии представляет феррито-перлитную составляющую с эвтектикой. Сплав среднедемпфирующий. Микроструктура сплава 776, относящийся в литом состоянии к низкодемпфирующим представляет собой мелкозернистую перлитную структуру.

Разработаны демпфирующие сплавы, пригодные для снижения шума промышленного оборудования [64]. Это сплавы 123, 138. Сплав 123 (1,0% La; 0,36% C; 0,30% Si; 0,33% Mn; 0,25% Ni; 0,31% Cr; 0,68% V; 0,200% Nb; 0,40 Mo; 0,47% Ti; 0,2% Al; 0,05% Ce) характеризуются минимальным содержанием легирующих элементов и очень высокими демпфирующими свойствами ($L_A=73,6$ дБА, $\delta=0,031$, $V_{C33}=529$ дБА/с). Содержание неметаллических включений $1,706 \times 10^{-2}\%$. Сплав 138 (1,86% Cr; 3,0% Mo; 1,0% Al; 0,5% V) характеризуется хорошими демпфирующими свойствами $L_A - 76,1$ дБА, $\delta = 0,023$, $V_{C33}= 566$ дБА/с. Содержание неметаллических включений незначительно ($1,543 \times 10^{-2} \%$). L_A - уровень звука, дБА при соударении образца из исследованного сплава и ударника.

Авторы [65] исследовали демпфирующие свойства легированных сталей при соударении. Скорости затухания звука стали 774 (0,1% C, 1,0% Si, 0,3% Mn, 0,4% Ni, 0,5% Cr, 0,4% V, 0,8% Nb, 0,5% Mo, 0,4% Ti, 1,4% Al, 0,5% B, 0,05% Ce, 0,05% Ca, 0,7% La, остальное железо) после прокатки, отжига и закалки. Наибольшее демпфирование ударных взаимодействий наблюдается в закаленном состоянии.

Значения скорости затухания звука (С33) стали 774 после литья, отжига и закалки следующие:

$$V_{C33(l)}=85,2 \text{ дБА/с}$$

$$V_{C33(o)}=85,7 \text{ дБА/с}$$

$$V_{C33(z)}=98,9 \text{ дБА/с}$$

А уровень звука соответственно: $L_{A(l)}=83$ дБА; $L_{A(o)}=78$ дБА; $L_{A(z)}=74$ дБА.

В научной работе [68] была поставлена задача оценить виброакустические характеристики известных, часто применяемых для деталей машин, работающих в режиме ударных нагрузений, сталей с высокой пластичностью и свариваемостью - 08, 08 кп, 10, 15, 20, 25, 10Г2, 20Г. Кроме этого была поставлена задача улучшить демпфирующие свойства этих сталей за счет легирования редкоземельными металлами (РЗМ). Для этого были выплавлены стали, маркированные Т1, Т2, Т3, Т4, Т5, Т6, Т7, Т8.

Акустические свойства исследованных сталей (08, 08 кп, 10, 15, 20, 25, 10 Г2, 20 Г, Т1, Т2, Т3, Т4, Т5, Т6, Т7 и Т8.) представлена в таблице 3.

Таблица 3 - Средние значения уровней звука и уровней звукового давления (УЗД) исследованных сталей в состоянии после отжига [68]

Марка стали	Уровни звукового давления, дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц							Уровень звука, дБА
	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	
08	44,1	43,1	59,4	61,0	65,1	99,4	98,1	95,0
08кп	48,0	41,5	58,1	60,0	65,0	95,0	88,0	87,0
10	53,3	51,3	56,4	55,8	72,4	96,7	85,4	88,3
15	45,4	45,8	60,2	62,1	65,0	100,4	94,6	91,6
20	45,1	44,3	48,6	58,5	70,1	95,2	100,2	93,2
25	44,2	46,3	48,5	56,6	79,5	100,2	92,2	92,1
20	57,0	56,3	55,2	68,1	79,1	99,6	93,3	90,1
10Г2	44,3	46,3	50,2	62,1	71,2	98,1	99,4	93,2
T1	41,1	44,1	49,3	50,1	72,2	97,3	99,8	92,4
T2	48,6	49,3	48,5	62,3	78,1	94,1	94,6	90,1
T3	44,5	48,8	52,6	62,4	71,2	97,3	94,3	92,1
T4	55,1	56,4	55,2	66,8	77,5	106,4	102,2	96,1
T5	44,1	46,4	48,3	56,8	71,6	92,4	96,2	90,4
T6	50,4	48,4	50,3	52,1	75,1	93,2	94,3	91,4
T7	44,5	44,6	48,2	51,1	77,1	96,2	94,6	90,1
T8	43,1	45,4	47,1	60,2	73,1	88,4	85,6	84,0

В твердых телах скорость звука определяется плотностью материала ρ и модулем упругости E для соответствующего вида деформации (продольные колебания, крутильные, изгибные и др.) [69]:

$$C = \sqrt{E / \rho} \quad (1)$$

В таблице 4 приведены величины скорости звука в твердых телах (продольные колебания в стержнях).

Таблица 4 - Акустические свойства твердых материалов

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Скорость звука, м/с		Удельное акустическое сопротивление $\rho \times c$, (кг/м ² с) 10^6	
		В неограниченной среде, с	Продольная, в стержне c_p	В неограниченной среде	Для продольных колебаний в стержне
Железо	7 800	5 850	5 170	45,6	40,4
Дуб	700		1 520		1,06
Сосна	500		1 420		0,8
Лед	916	4 170	3 200	2,92	2,93
Пробка	240		500		0,12
Каучук натуральный	950		30		0,028
Мрамор	2 600	5 030	3 810	2,77	9,9
Гранит	2 700		3 950		10,7
Плексиглас	1 180		2 820		3,3

Известен способ исследования демпфирующих свойств материалов, заключающийся в том, что образец в виде призматического стержня консольно закрепляют в подвешенной на тонких струнах массивной плите, к свободному концу образца прикрепляют инерционный груз, возбуждают в образце поперечные резонансные колебания, регистрируют параметры этих колебаний и по этим параметрам судят о демпфирующих свойствах материала образца [70].

Недостатком известного способа является низкая точность, обусловленная неоднородным напряженным состоянием по длине и толщине образца, вследствие чего показатели, характеризующие рассеяние энергии при колебаниях, представляют интегральную характеристику образца.

Наиболее близким техническим решением является способ исследования демпфирующих свойств материалов, заключающийся в том, что к торцам образца, выполненного в виде призматической балки, прикрепляют инерционные грузы и подвешивают их на тонких струнах, прикладывая силы в виде периодически изменяющихся изгибных моментов, и возбуждают периодические движения грузов, регистрируют силы и перемещения грузов, по которым судят о демпфирующих свойствах материала образца [71].

Недостатком известного способа является низкая точность, обусловленная неоднородным напряженным состоянием по толщине образца, вследствие чего в различных по толщине точках образца рассеивается неодинаковое количество энергии за период колебаний и результаты испытаний представляют интегральную характеристику образца.

Для повышения точности за счет обеспечения одинаковых амплитудных значений деформации по объему образца предлагается способ исследования демпфирующих свойств материала, заключающегося в том, что к торцам образца прикрепляют инерционные грузы, подвешивая их на тонких струнах, прикладывают к ним силы и сообщают грузам движение, после чего регистрируют силы и перемещения грузов, в заявляемом способе образец выполнен в виде тонкостенного цилиндра, а масса инерционных грузов симметрично распределена относительно оси образца массой. В плоскости, проходящей через ось образца, к инерционным грузам прикладывают пары равных сил противоположного направления и равномерно вращают их до получения установившегося движения, после чего измеряют величину приложенных сил и перемещение грузов и по ним судят о величине демпфирующей способности материала [72].

Известны такие методики, как метод исследования акустических свойств (Tong Chen, Darui Zheng, Schad G.H., Staiano M., Warlimont H., Павловская В.Н., Качерович А.Н., Лукьянов А.П.); метод исследования шума соударений труб в заглушенной камере (Rossing T.); исследование шума ударного происхождения пластин (Warnaka G., Сулеев Д.К., Игараси Т., Утепов Е.Б., Парфёнов А.А., Працюк В.А., Дрейман Н.И., Муравьев В.А., Crocker M., Price A.); способ изучения шума ковша и стального шара (Pennington D.); метод исследования шума соударяющихся бутылок (Richards E.J., Lenzi A., Cuschieri Y.); метод определения коэффициента демпфирования упругой подвески механического объекта при сбрасывании груза (Варсанюфьев В.Д., Варсанюфьев Д.В.); метод соударения шарика и молотка с поверхностью двигателя внутреннего сгорания (Луканин В.Н.); способ соударения твёрдых тел (Акелис М.Э., Бразджионис А.Т., Валангаускас Ю.Д.).

Конструкторами и технологами была получена информация о диссипативных свойствах большой группы черных и цветных металлов. Это результаты работ известных специалистов: Постникова В.С., Фавстова Ю.К., Пигузова Ю.В., Головина С.А., Никифорова А.С., Изак Г.Д., Заборова В.И., Клячко Л.Н., Сулеева Д.К., Утепова Е.Б. и др.

1.5 Методы исследования ударного шума

Ударный шум - вредный фактор промышленных предприятий. Исследование шума соударений весьма актуально. Результаты исследования позволяют разработать мероприятия по снижению уровней вредных шумов и вибраций. Оценка акустических характеристик машин и механизмов дает картину шумовой обстановки на рабочем месте.

Проведен аналитический обзор установок для исследования шума соударяющихся металлических деталей машин и механизмов. Наиболее оптимальными установками являются разработки к.т.н. Дреймана Н.И., к.т.н. Працюка В.А., к.т.н. Хохлова П.П., к.т.н. Лидтке В.Ю., д.т.н. Сулеева Д.К., д.т.н. Утепова Е.Б., д.т.н. Хакдодова М.М. [73, 74].

Авторы [73] генерировали шум соударений при соударении стального

бойка (0,45 кг) и алюминиевого листа. Для записи затухающих колебаний использовали прибор фирмы «Брюль и Кьер» (модель 2305). Недостатком этой установки является удар бойка по пластине происходит при подъеме бойка, то есть после прохождения равновесного состояния, что затрудняет центральное соударение бойка с пластиной и импульс направлен не перпендикулярно плоскости пластины. Установка громоздка, и практически невозможно проводить испытания большой серии образцов. В этом случае не обеспечена защита повторного удара бойка, что может исказить акустическое поле при излучении звука поверхностью пластины. Подобным образом изучали звукоизлучение труб диаметром 125 и 200 мм, длиной 1400 мм и толщиной стенок 0,6 и 1,2 мм заглушенной камере. Трубу возбуждали ударом, излучаемый звук регистрировали 1/3 октавным анализатором.

Целью исследования являлся выбор определенного количества хомутов и способа их расположения на трубе, обеспечивающего наибольший эффект демпфирования при наиболее рациональном покрытии поверхности.

В установке используются неметаллические материалы – хомуты, что не дает возможности оценить истинную демпфирующую способность металлической трубы. Кроме того, следует отметить сложность изготовления образцов трубчатой формы.

Для изучения колебательных явлений в элементах двигателя авторы [75] предлагают установку. Авторы определяли значение собственных частот двумя методами. При первом методе возбуждение осуществляется одиночным импульсом – ударом шарика. В основе второго метода лежит также ударное действие. Замыкание контактов приводит к тому, что ток направляется в катушку электромагнита, которой притягивает рычаг, с установленным на нем молотком – ударником. В устройстве имеется возможность менять молоток, его массу, материал, кривизну и форму поверхности ударника. В исследовании, для импульсного возбуждения использовали шарик, ударяющий в центр пластины. Фиксировали продолжительность удара, спектр смещения центра пластины и акустическое давление в точке наблюдения, время между двумя ударами. Продолжительность удара измеряли прибором RFT-16 путем определения длительности электрического короткого замыкания, происходящего при контакте шарика и пластины. Частотную зависимость уровня звукового давления измеряли прибором ВЖК (модель 3345). Оценка звукоизлучения осуществлялась электромагнитными преобразователями, наклеенными на колокол. Возбуждение колебаний осуществлялось с помощью резистивно-емкостного генератора, частота которого менялось до ее совпадения с частотой колокола. Настройку совпадения частот осуществляли по фигурам Лиссажу электронно-лучевого осциллографа. Для определения начальной амплитуды звукового давления обертона, исследования проводили в свободном звуковом поле. Возбуждение колокола осуществляли ударом с помощью оригинального языка, соответствующего размеру колокола. Удар производили об утолщение шлагкольца. Для обеспечения достаточной воспроизводимости, поддерживали строго определенное положение точки подвеса языка колокола и постоянную

высоту падения качающегося языка.

Исследованию процесса соударения двух твердых тел посвящена работа [76]. В результате анализа определены спектральные и статистические характеристики, а также передаточные функции между отдельными процессами и зависимость излучаемого звука от вибрации исследуемого тела. Пространственное звуковое поле вокруг генерирующего объекта неравномерно. В таких случаях исследователи экспериментально устанавливают участки повышенного и пониженного уровня звукового давления.

В работе [77] исследовали звуковое поле вокруг пары зубчатых колес. Уровень шума улавливается и сравнивается с помощью микрофонов, установленных в разных местах. Из рисунка 21 видно, что повышенный уровень шума наблюдается у боковой поверхности работающей пары. В месте зацепления зубчатой пары (у микрофона С) уровень шума ниже, чем у баковых поверхностей. Авторы делают вывод, что на этих участках под воздействием вибрации и шума возможно возникновения резонансного колебания самих шестеренок. За счет изменения расстояния между колеблющимися образцом и микрофоном удалось определить оптимальное расстояние между приемником звука и излучателем.

Иногда импульсное возбуждение проводится с целью моделирования ударных процессов, возникающих в условиях эксплуатации. Большое преимущество этого метода заключается в возможности создания сравнительно простыми способами (с помощью сбрасывания машин) импульсных ускорений массивных испытуемых объектов.

Представленные устройства для исследования шума соударений характеризуется недостатком. А именно, эти устройства разработаны для исследования звукоизлучения определенного узла, механизма. Ввиду того, что исследуемый объект имеет сложную форму (колокол, пила, элементы двигателя) имеется трудность при изготовлении большой серии образцов из различных материалов. Не так давно на кафедре охраны труда Московского института стали и сплавов было сконструировано несколько установок для исследования звукоизлучения металлических материалов. Эти установки отличаются простой конструкции, а исследуемые образцы имеют несложную форму, что облегчает их изготовление.

Установка для исследования акустических характеристик металлических материалов, описанная в работе [75], была использована в работах [66,67]. Установка содержит массивное основание с вмонтированным к нему корпусом из листового металла. В корпусе расположены вертикально перемещающаяся площадка с установленным на ней бункером и механизмом отсекающей, регулирующей поочередную подачу шаров из бункера, отражатель с устройством горизонтального и вертикального перемещения, специальный приемник шаров. Возбуждение образца осуществляли ударом шара весом 4,5 г по центру пластины.

Для исключения центрального удара со стороны контакта шара с образцом установлен ограничитель. Звуковое давление воспринималось микрофоном,

установленным в патрубке. Образец установлен вертикально относительно пола. Ударяясь об отражатель, шар меняет вертикальное движение на горизонтальное. Изменение энергии при отскоке шара от отражателя затрудняет энергетическую оценку соударения. Размещение микрофона в камере, вследствие реверберации, вносит дополнительные погрешности при измерении звуковых колебаний. Наличие отсекающего устройства не обеспечивает достаточной точности попадания в геометрический центр образца. Одним из существенных недостатков названного устройства является отсутствие регулирования натяжения нитей.

Подобным же недостатком страдает установка, описанная в работе [75]. Эта установка широко использовалась в работах для исследования акустических характеристик металлов и сплавов. Это устройство состоит из основания, на котором крепятся стойки для установки электромагнита и крепящее устройство для образца. Для исключения повторных соударений, плоскость подвески образца на 3-5° наклонена к горизонтальной плоскости. Образец подвешивается на капроновых нитях диаметром 0,4 мм к неподвижным и подвижным крючкам узла подвески образца, расположенного на нижней стороне массивного металлического стола, покоящегося на четырех опорах. Установка образца осуществляется с помощью рычага, отжимающего подвижные крючки.

Механизм подачи шаров состоит из накопителя, питателя, рычагов и электромагнита. При включении электромагнита шар притягивается к нижней части сердечника, фиксируя свое положение в гнезде резинового кольца. При включении электромагнита шар свободно падает вниз на исследуемый образец. За счет наклона образца шар отскакивает в сторону и падает в приемник шаров. Для регулировки высоты падения шара служит винт, перемещающий относительно неподвижного стола механизм подачи шаров. Одним из существенных недостатков этой установки является эффект прилипания шара к электромагниту, вследствие намагничивания шара во время эксперимента. Это приводит к снижению точности попадания шара в геометрический центр пластины. Здесь целесообразным было бы применить иной принцип пускового механизма, наподобие установки, описанной в работе [78].

Следует отметить, что наклонное положение образца-пластины способствует непараллельному расположению фронта звуковой волны. Выходом из этого положения является применение наклонного желоба, который уже применялся для исследования ударных процессов.

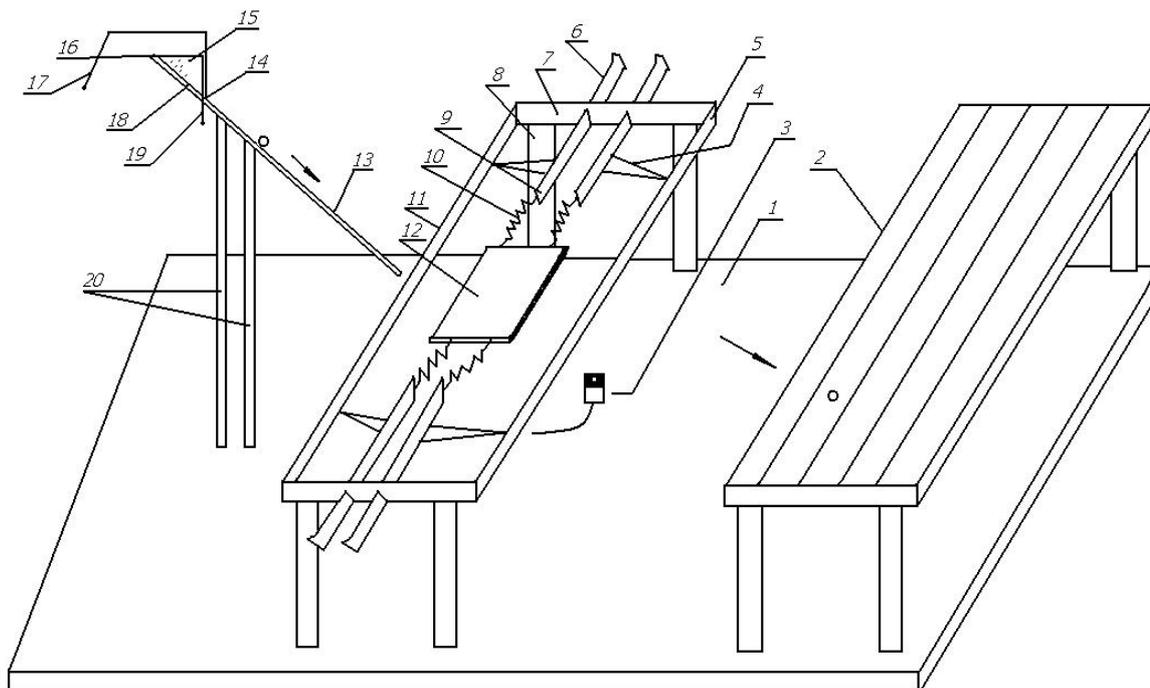
Авторы [79] исследовали зависимость уровня шума от расхода энергии и числа оборотов двух станков. Полностью однозначно явление качественной связи ввиду того, что изменение расхода мощности при холостом ходе хорошо согласуется с кривой уровня шума. Уровень генерируемого станком шума, естественно определяется величиной той энергии, которая расходуется на возникновение вибрации в работающем агрегате. При этом нет прямо пропорциональной зависимости между уровнем шума и параметрами вибрации.

Авторы [80] считают, что при распределении энергии оборудования между шумом и вибрацией, наблюдаются скрытые моменты. Этот вывод

говорит о том, что при поиске сплавов с высокими демпфирующими свойствами для использования в практике борьбы с шумом, необходимо в качестве критерия оценки демпфирующих свойств материала принять прежде всего характеристики звукоизлучения (шумообразования), то есть уровень звукового давления и скорость затухания звуковых колебаний.

Исследователи шума соударений не учитывают длительность максимального звукового импульса, которая играет существенную роль в интенсивности звуковой энергии.

Схема разработанной установки представлена на рисунке 2.



1-основание; 2-стол с пластилиновым покрытием; 3-микрофон; 4 - стрелки контроля; 5,11-шкала контроля; 6-натяжные болты; 7-каркас механизма крепления, 8 - стойки; 9-головки для крепления пружин; 10-пружины; 12 - образец; 13-наклонный желоб; 14-ограничитель; 15-механизм спуска; 16-кожух; 17-рычаг, 18-накопитель; 19-отсекатель; 20-стойки для крепления желоба

Рисунок 2 - Установка для измерения параметров звуковых колебаний [80]

Установка состоит из основания 1, стоек для крепления образца 8, пружин 10, натяжных болтов 6, головок для крепления пружин 9, натяжные регулировочные болты ввернуты в торцевые планки каркаса механизма крепления 7. Для подачи шаров к образцу имеется желоб 13, установленный на стойках 20. Шары находятся в накопителе 18, где удерживаются ограничителем 14, отсекателем 19, кожухом 16. К ограничителю крепится рычаг 17. Энергия звуковых колебаний образца 12, возбуждаемого в результате удара стального шара по геометрическому центру образца, фиксируется микрофоном 3 и преобразуется в эквивалентный электрический сигнал, по которому с помощью звукоизмерительной аппаратуры можно регистрировать величину уровня

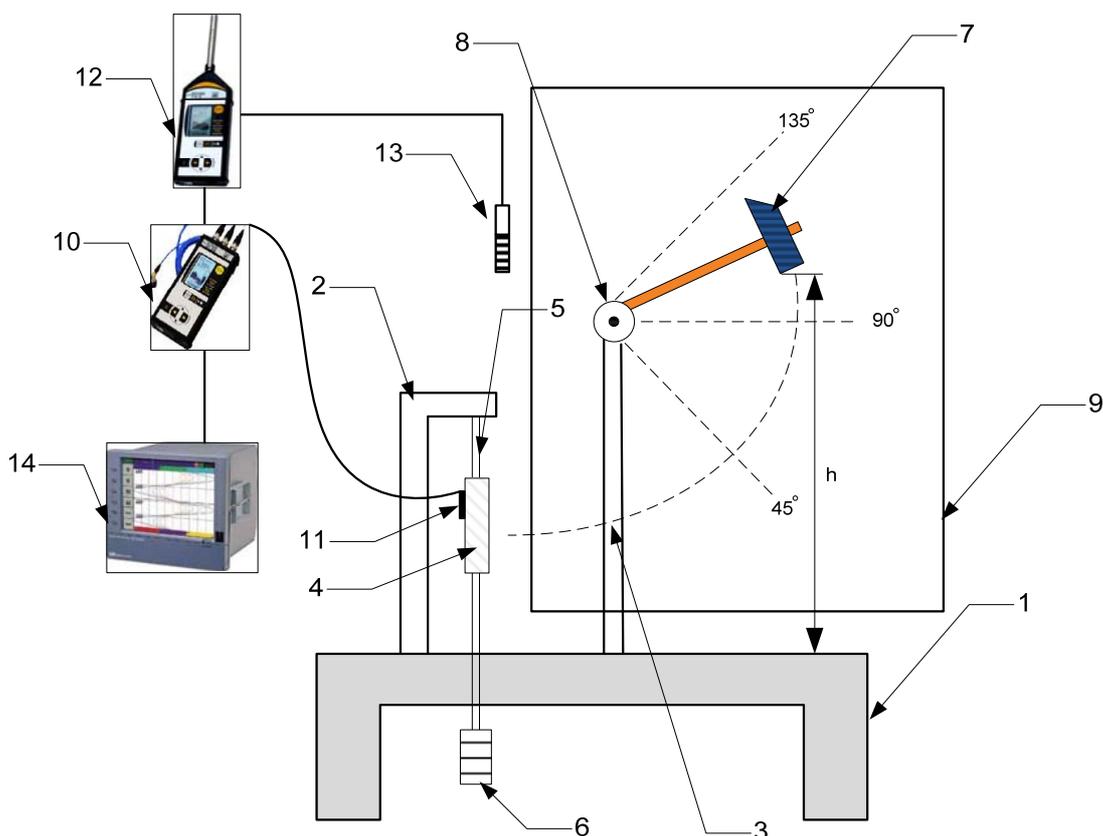
звукового давления. После соударения с пластиной шар отскакивает и попадает на стол с пластилиновым покрытием 2, что позволяет производить измерение величины отскока шара после соударения. Для регулирования натяжения образца служат стрелки и шкалы 5 и 11. В работе используется шарик, изготовленный из стали ШХ15, массой 4,5 г и диаметром 10 мм.

Установка работает следующим образом. Крепление образца (50×50×5 мм) капроновыми нитями на пружинах, натяжение регулируется через капроновые нити. Усилие натяжения образца определяется по шкале с помощью стрелок. В исходном состоянии шары расположены в накопителе, где удерживаются от скатывания отсекателем, который в этот момент находится в верхнем положении. Один шар, готовый к спуску по желобу, находится между отсекателем и ограничителем. При повороте рычага против часовой стрелки ограничитель плавно поднимается и шар под собственным весом скатывается по желобу и совершает движение до соударения с образцом. Конструкция установки позволяет измерять уровни звукового давления плоских образцов в зависимости от изменения высоты скатывания шара. Для этого имеется возможность регулировать расположение механизма спуска по всей длине желоба.

Установка для измерения демпфирующих свойств КазНТУ-2007 [81] представлена на рисунке 3.

Установка представляет собой следующее. Образец 6 из исследуемого сплава, крепится капроновыми нитями 5 и постоянным грузом (10 кг) на столе 1 в наклоненном к горизонту положении (для предотвращения повторного удара). Ударник (шарик из стали ШХ-15 диаметром 10,3 мм) находится строго вертикально над центром пластины и удерживается электромагнитом 2. Электромагнит крепится к стойке 4, которая установлена на столе 1 и имеется возможность изменять расстояние от образца до ударника. Под образцом на расстоянии 300 мм на штативе 12 крепится микрофон 9 шумомера 00017 фирмы КРТ. Шумомер 7 последовательно соединен с осциллографом 8 модели С8-13 и самописцем 13 модели Р80-101 фирмы КРТ.

Рядом с образцом 6 находится уловитель шаров 3. Ударник (шарик) 10, подсоединен к частотомеру 14, а образец 6 - к генератору импульсов 15.



1 - стол; 2, 3- стойки; 4 - образец (пластина); 5 - капроновые нити;
 6 - груз; 7 - ударник; 8 - фиксатор; 9 - шкала; 10 - виброметр;
 11 - акселерометр; 12 - шумометр; 13 - микрофон; 14 – осциллограф и самописец

Рисунок 3 – Установка «КазНТУ-2007» для исследования вибрации и шума соударений металлических плоских образцов [81]

Устройство «КазНТУ-2007» работает следующим образом. Образец 4 крепится в сплетение туго натянутых нитей 5 за счет относительно тяжелого по отношению к образцу груза 6 (вес груза 20 кг). Ударник 7 отклоняется от нижней точки на определенный угол, который определяется как по шкале 9, так и по высоте h . Затем ударник отпускается, и он под собственным весом падает и совершает соударение с образцом 4. Уровень вибрации от соударения измеряется виброметром общей и локальной вибрации 10 «Октава-101В» с трехкомпонентным акселерометром 11, прикрепленного к образцу. Уровень шума измеряется шумометром 12 «Октава-101А» с микрофоном 13. Кривую затухания ударного процесса регистрирует осциллограф и самописец 14. После соударения ударник останавливается фиксатором 8, предохраняющим от повторного удара.

Ударник 7 представляет собой стальной молоток с массой ударника 218 г. и может совершать удары с разной силой, т.к. имеется возможность отклонять его под разным углом от положения равновесия.

Для исследования шума направляющих труб токарных автоматов предложена установка [82]. Схема установки представлена на рисунке 4.

Она состоит из токарного автомата 1, направляющей трубы 2 которая крепится к полу 13 посредством хомутов 5. Стойки 3 крепления направляющей трубы уставлены на виброизолирующие опоры 6. Фиксация уровня шума осуществляется микрофоном 10, подключенным к импульсному шумомеру 7 00017 фирмы RFT. Шумомер 7 последовательно подсоединен к осциллографу 8 и к самописцу 9. Обрабатываемый пруток 4 закреплен к шпинделю 14 токарного автомата. Демпфирующие элементы 12 крепятся с помощью винтов крепления 15 с потайной головкой.

Установка работает следующим образом. Обрабатываемый пруток 4 устанавливается через дальний от станка конец трубы и зажимается в шпинделе 14. Микрофон 10 импульсного шумомера 7 располагается на высоте 50 см от направляющей трубы 2 по центру трубы.

Шум от соударений прутка и направляющей трубы фиксируется не только шумомером, но и осциллографом и самописцем.

Установка направляющей трубы и ее замена осуществляется за счет винтов крепления 29. В качестве токарного автомата выбрана модель 1В116П.

Установка находится на участке токарных автоматов завода «Актюбинсксельмаш».

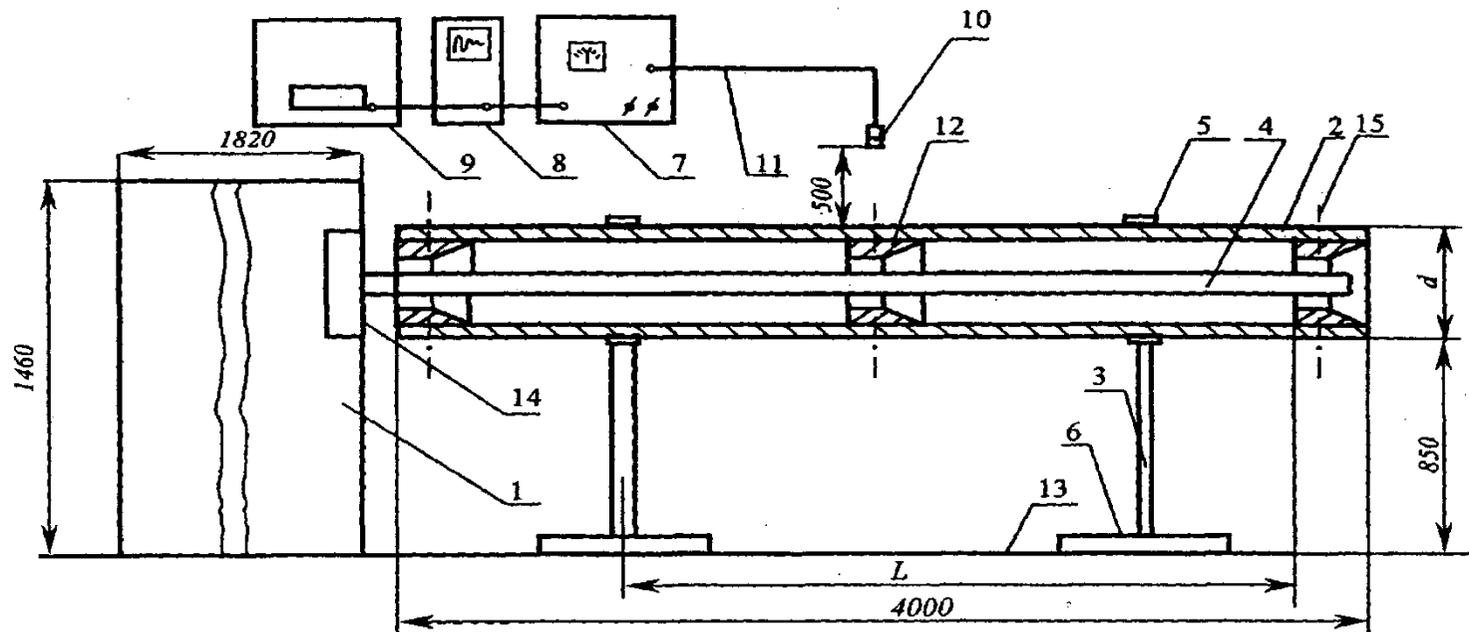
В отличие от известных установок по исследованию шума соударений, УШНТЕ-1 имеет преимущества:

- нет необходимости производить перерасчет коэффициентов моделирования, так как эксперименты проводились на производственном участке на реальном промышленном оборудовании; отсюда более высокая точность эксперимента;

- простота конструкции за счет использования доступных материалов, конструкций и приборов;

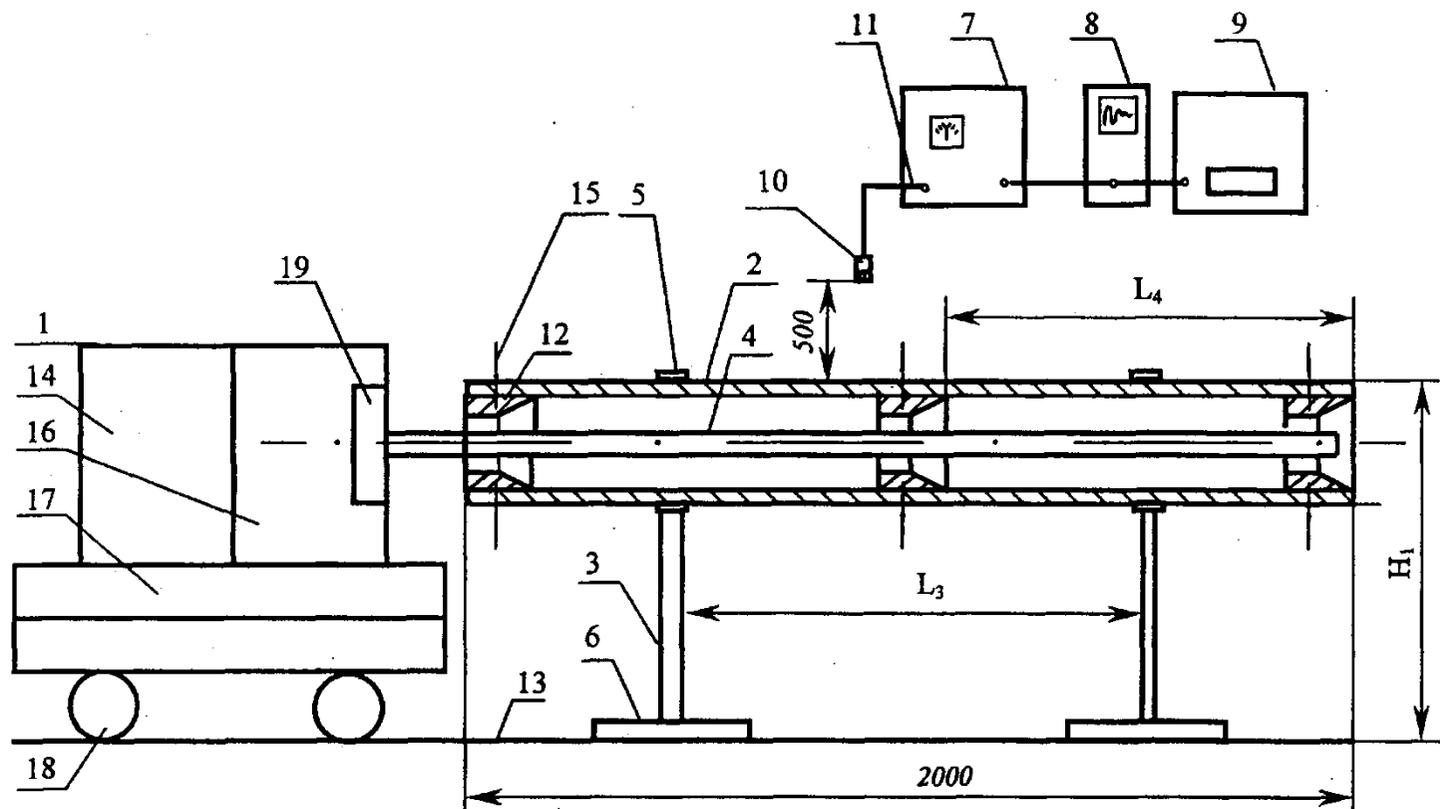
- универсальность установки (имеется возможность менять конструкцию трубы: изменять расположение демпфирующих втулок на расстоянии друг от друга; менять сами демпфирующие элементы после их износа; изменять расстояния между микрофоном и направляющей трубой; изменять амплитуду удара прутка о направляющую трубу).

Если установка УШНТЕ - 1 использовалась в цеху токарных автоматов, то установка УШНТЕ - 2 [83] позволяла моделировать акустические исследования в лабораторных условиях (рисунок 5).



1 - токарный автомат 1В116П; 2 - направляющая труба; 3 - стойки направляющей трубы; 4 - обрабатываемый пруток ; 5 -хомут крепежный; 6 - виброизолирующие опоры; 7 - шумомер; 8 - осциллограф; 9 - самописец; 10 -микрофон; 11 - соединительные провода; 12 - демпфирующие элементы; 1 - пол цеха; 14 - шпиндель станка; 15 - винты крепления

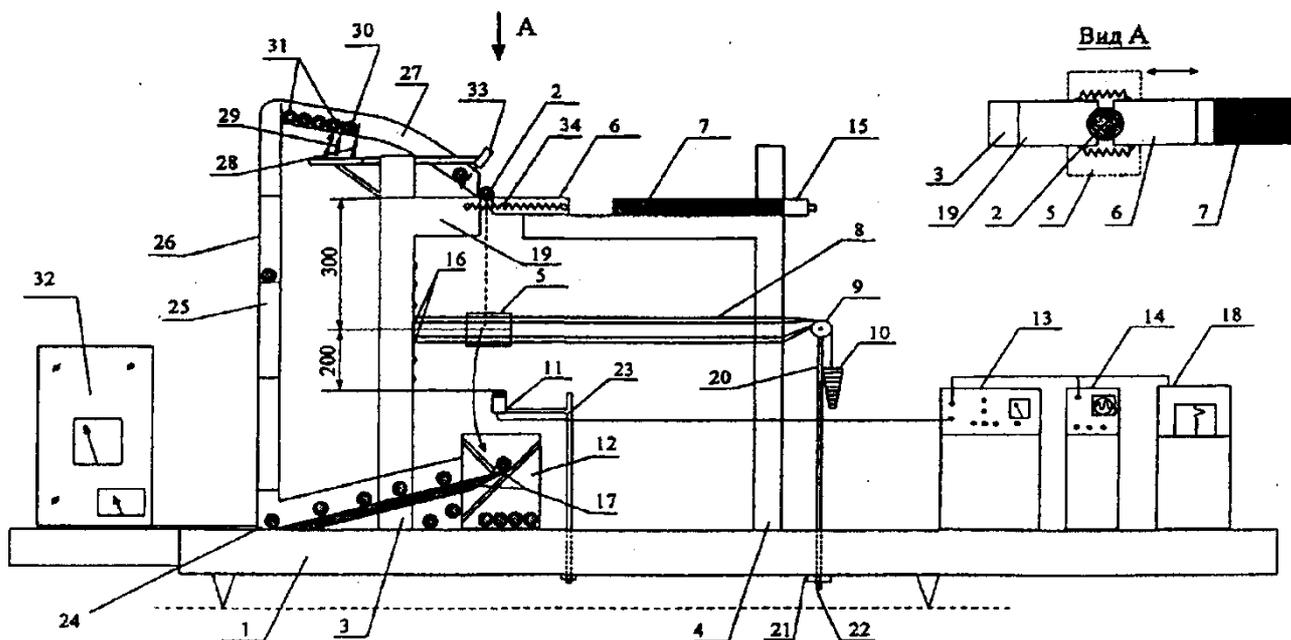
Рисунок 4 - Установка для исследования шума направляющих труб токарных автоматов УШНТЕ – 1 [82]



1 - электродвигатель; 2 - направляющая труба; 3-стойка; 4-обрабатываемый пруток; 5-крепежный хомут; 6-виброизолирующая опора; 7- шумомер; 8-осциллограф; 9-самописец; 10-микрофон; 11-соединительный провод; 12'-демпфирующие элементы; 13-пол цеха; 14-редуктор; 15-винты крепления; 16-механизм привода тележки; 17-тележка; 18-колесо; 19-шпиндель.

Рисунок 5 - Установка для исследования шума направляющих труб токарных автоматов УШНТЕ – 2 [83]

Представляет интерес установка для исследования скорости затухания звука УДИ СЗЗ-1 [48, с. 50-55]. Схема установки представлена на рисунке 6.



1-основание; 2-ударник (шарик); 3,4-стойки; 5-образец (50x50x5мм); 6-подвижная пластина; 7-эл.магнит; 8-нити натяга; 9-лебедка; 10-груз; 11-микрофон; 12-приемник шаров; 13-шумомер; 14-осциллограф; 15-пусковое устройство электромагнита; 16-крючки крепления нитей; 17-нижний наклонный желоб; 18- самописец; 19-неподвижный выступ стойки 3; 20-стойка лебедки; 21-гайка; 22-резьба стойки; 23-штатив; 24-основание элеватора; 25-элеватор для подъема шаров; 26-вертикальный желоб элеватора; 27-верхний наклонный желоб элеватора; 28-первый ограничитель шаров; 29-второй ограничитель шаров; 30-шар; 31- группа остановленных шаров; 32-пусковое устройство элеватора; 33- третий ограничитель шаров; 34-пружина

Рисунок 6 - Установка для исследования скорости затухания звука УДИСЗЗ-1 [48]

Установка УДИСЗЗ-1 работает следующим образом. На металлическом основании 1 жестко установлены стойки 3 и 4. На стойке 4 закреплены подвижная пластина 6, электромагнит 7 и пусковое устройство электромагнита 15. Ударник (шарик из стали ШХ-15 диаметром 10,3 мм) устанавливается между неподвижным выступом 19 стойки 3 и подвижной пластиной 6. Подвижная плита снабжена пружиной, позволяющей возвращать плиту в исходное состояние после процесса соударения. Образец для исследования (пластина размерами 50×50×5 мм) зажимается между туго натянутыми капроновыми нитями 8. Нити одними концами закреплены к крючкам 16, а другими концами через лебедку 9, крепящейся к стойке 20, к грузу 10. Стойка 20 лебедки 9 имеет возможность менять высоту за счет гайки 21 и резьбовой части стойки 22. Такое устройство лебедки позволяет изменять расстояние от образца до ударника - для исследования амплитудной зависимости звукоизлучения. Крючки 16 установлены на расстоянии 2 см друг от друга в

количестве 20 штук. Это сделано для возможности изменять расстояние между ударником 2 и образцом 5 для исследования амплитудной зависимости звукоизлучения. Микрофон 11 шумомера 12 установлен под образцом на расстоянии 200 мм за счет штатива 23, расстояние от микрофона до образца можно изменять. Шумомер 13 последовательно соединен с осциллографом 14.

Шары после соударения с образцом попадают в приемник шаров 12, снабженный демпфирующей наклонной плоскостью 17. Шары после соударения из приемника шаров 12 по нижнему наклонному желобу 17 скатываются к основанию 24 элеватора 25. Элеватор 25 поднимает шары по вертикальному желобу 26. Достигая верхней части элеватора, шары попадают в верхний наклонный желоб 27 элеватора, где фиксируются первым ограничителем 28. После остановки шаров, включается второй ограничитель 29, отсекающий один шар 30 из группы приостановленных шаров 31. Для проведения эксперимента исследователь (оператор) с помощью пускового устройства 32 отпускает шар 30 по верхнему наклонному желобу 27. Шар 30 свободно катится до третьего ограничителя 33. Если на плитах 19 и 6 отсутствует шар 2, то оператор выключает третий ограничитель 33 и шар 30 опускается в гнездо между плитами 19 и 6. Шар готов для свободного падения и процесса соударения. До соударения шар 2 находится на высоте 300 мм от образца. Для предотвращения повторного удара образец 5 слегка наклонен к горизонту, что обеспечивает отскок шара и попадание его в приемник.

Включая пусковое устройство электромагнита 15, приводится в движение подвижная пластина 6. В результате чего шар 2 вертикально падает в геометрический центр образца 5. После удара шар 2 отскакивает и попадает в приемник шаров 12. Уровень звука от соударения воспринимается микрофоном 11 и фиксируется как шумомером 13, так и осциллографом и самописцем. Из приемника шаров, ударник (шар) по нижнему наклонному желобу 17 попадает к основанию 24 элеватора 25. Не останавливаясь шары поднимаются по вертикальному желобу 26 до верхнего наклонного желоба 27 элеватора. Здесь они свободно скатываясь по желобу, останавливаются первым ограничителем шаров 28. Как только образуется группа шаров из 5 единиц, элеватор останавливается, движение шаров вверх прекращается и срабатывает второй ограничитель 29, отсекающий один шар 30 из группы шаров 31. Этот шар после отключения первого ограничителя свободно скатывается до третьего ограничителя 33. Если гнездо между плитами 19 и 6 свободно, ограничитель 33 освобождает дорогу шару 30 и он опускается на исходную точку для свободного падения. Так процесс повторяется непрерывно. В отличии от известных установок процесс исследования на УДИСЗЗ-1 имеет следующие преимущества:

- более высокая точность попадания шара в геометрический центр пластины за счет использования системы подвижная - неподвижная плита (аналогично диафрагме фотоаппарата);
- более высокая производительность проведения эксперимента за счет использования автоматического элеватора подъема шаров;

- простота конструкции, за счет использования доступных материалов, конструкций и приборов;

- универсальность установки (имеется возможность менять параметры ударного процесса - высоту падения шара; расстояние между микрофоном и образцом; размеры образца; место соударения образца и ударника - за счет возможности передвижения образца вдоль капроновых нитей).

Проанализированные методики исследования шума соударений дают некоторые заключения:

- исследования шума соударений весьма актуально;

- установки для оценки шума соударений характеризуется широким разнообразием исследуемых деталей;

- оптимальными устройствами следует признать конструкции ученых НИТУ МИСиС и КазНТУ имени К.И.Сатпаева.

Таким образом, метод исследования звукоизлучения сталей и сплавов путем ударного возбуждения и измерения уровня звукового давления с помощью импульсного шумомера для разработки материалов с высокими демпфирующими свойствами получил широкое распространение. При изучении демпфирующих свойств материалов для использования в технике борьбы с шумом ударного происхождения, следует прежде всего в качестве критерия оценки принимать значение уровня звукового давления.

Существующие установки по изучению звукоизлучения металлических материалов, имеющие ряд существенных недостатков. Одним из упущений при исследовании импульсного шума является отсутствие сравнительных характеристик звукового сигнала в зависимости от длительности максимального звукового давления, а отсюда и отсутствие рекомендаций по снижению импульсного шума с различной продолжительностью.

Выводы по первому разделу

Анализ научной и технической литературы позволил выявить следующее:

- шум, возникающий при соударении деталей машин и механизмов, является очень вредным и опасным для работающих металлургической, машиностроительной, обрабатывающей и других отраслей промышленности. Уровень шума соударений достигает 120-130 дБА, что значительно выше допустимых санитарных норм (80 дБА);

- наиболее интенсивные научные работы по исследованию шума соударений приходятся на 1975-2008 гг, и в основном они предлагают известные способы защиты от шума (звукоизоляция, звукопоглощение, использование СИЗ и др);

- эффективным способом снижения шума соударения деталей оборудования в источнике возникновения является применение демпфирующих металлических материалов на основе железа (стали и сплавы), т.к. прочностные свойства этих материалов достаточны для длительной и эффективной работы;

- изученные работы по созданию демпфирующих металлических

материалов дают определенную картину диссипативных свойств известных, широко используемых сталей и сплавов (С.А. Головин, Ю.В. Пигузов, В.С. Постников), чугунов (В.А.Муравьев, А.К. Еркопыр, С.Т. Калдыбаева), биметаллов (А.В. Белов, Г.Е. Утепова, Д. Койшигарина), но в то же время отсутствуют сведения о демпфирующих и акустических характеристиках высокопрочных сталей и сплавов, легированных бором, ванадием, никелем.

- способ исследования шума соударений за счет ударника и образца является наиболее оптимальным при разработке демпфирующих материалов.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВУКОИЗЛУЧЕНИЯ И ВИБРОУСКОРЕНИЯ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

В качестве объекта исследования были выбраны стали, легированные бором, ванадием и никелем (стандартные: 20ХНР, 30ХН2МФА и 38ХН3МФА; выплавленные: 1М, 2М, 3М). Исследовали акустические (уровень звука, уровень звукового давления), вибрационные (уровень виброускорения, общий уровень виброускорения) и демпфирующие (логарифмический декремент, внутреннее трение, относительное рассеяние) характеристики сплавов. Назначение сталей и общая характеристика приведены в таблице 5. Режим термообработки и механические свойства, а также химический состав исследованных сталей приведены в таблицах 6 и 7.

Таблица 5 - Назначение и общая характеристика сталей [84]

Сталь	Назначение
20ХНР	Крупные детали, работающие в условиях ударных нагрузок; зубчатые колеса, червяки, валы-шестерни, кулачковые муфты, валики, пальцы, втулки и др. Стали применяются как цементуемые и как улучшаемые.
30ХН2МФА	Валы, цельнокованные роторы паровых турбин, диски, валы и крышки турбовоздуховных машин, детали редукторов, тяжело-нагруженные болты и шпильки и другие особо ответственные детали турбин и компрессорных машин, работающие при температуре до 450°С.
38ХН3МФА	Наиболее ответственные тяжело нагруженные детали, работающие при температурах до 400°С.

Таблица 6 - Химический состав исследованных сталей в %

Сталь	С	Мо	Мn	Cr	Ni	V	В	НСП, м
20ХНР	0,16- 0,23	-	0,70- 1,00	0,75- 1,05	0,80- 1,10	-	0,001- 0,005	-
30ХН2МФА	0,27- 0,34	0,20- 0,30	0,30- 0,60	0,60 - 0,90	2,0- 2,4	0,10- 0,18	-	-
38ХН3МФА	0,33- 0,40	0,35- 0,45	0,25- 0,50	1,20- 1,50	3,0- 3,5	0,10- 0,18	-	-
1М	0,21	-	0,80	0,90	0,5	0,21	0,001- 0,005	-
2М	0,31	-	0,43	0,70	2,8	0,32		-
3М	0,40	-	0,50	1,76	3,5	0,25		-
20ХНР(НС)	0,16- 0,23	-	0,7- 1,0	0,75- 1,05	0,80- 1,10	-		3×10 ⁻⁷
3М (НС)	0,40	-	0,50	1,76	3,5	0,25		3×10 ⁻⁷

Таблица 7 - Механические свойства сталей (ГОСТ 4543-71) [84]

Сталь	Режим термообработки	σ_T	σ_B	δ_5	φ	КСУ, кДж/м ²	НВ после отжига, МПа
		МПа		%			
		не менее					
20ХНР	Нормализация 930°С, в воздухе + Закалка 840°С, в масле, +Отпуск 200°С, в воздухе или в масле	1370	1420	14	60	1080	197
30ХН2МФА	Закалка 860°С, в масле + Отпуск высокий 680°С, в воздухе	785	880	10	40	880	269
38ХН3МФА	Закалка 850°С, в масле + Отпуск высокий 680°С, в воздухе	1080	1180	12	50	780	269
1М	Закалка 870°С, в масле + Отпуск высокий, 610°С, в масле	765	915	14	55	70	280
2М	Закалка 880°С, в масле + Отпуск высокий, 620°С, в масле	745	925	12	50	75	260
3М	Закалка 890°С, в масле + Отпуск высокий, 650°С, в масле	825	990	13	45	55	270

Одной из поставленных задач данной работы является разработка новых демпфирующих металлических материалов на основе железа. В связи с этим путем изменения содержания легирующих элементов (бора, ванадия, никеля) в химическом составе стандартных сталей были получены новые стали с повышенными демпфирующими свойствами. Принципы легирования сплавов в работе основаны на изучении диаграмм состояния Fe-C, Fe-B, Fe-Ni, Fe-V, Fe-Se. Диаграммы состояния определяют в условиях равновесия фазовый состав сплава в зависимости от температуры и концентрации компонентов и позволяют качественно характеризовать многие физико-химические, механические и технологические свойства сплавов.

В качестве основных металлических шихтовых материалов использовали металлический лом, ферросплавы и отходы собственного производства. В качестве флюсов использовали известковый камень.

Технология плавки должна обеспечивать получение нужного и стабильного состава сталей и высокой температуры металла при заданной производительности.

Выполняются эти требования за счет выбора соответствующего расхода кокса и дутья.

Литье производилось в кокиль. Литье в кокиль по сравнению с песчаной формой имеет ряд преимуществ: относительную долговечность формы и ускоренное охлаждение в ней отливки, резкое сокращение или практически полное исключение расхода формовочных материалов; увеличение съема с формовочной площадки в 2-6 раз, повышение производительности труда в 1,5-6 раза, уменьшение шероховатости поверхности, повышение точности отливок, увеличение плотности отливок, уменьшение размеров прибылей и часто даже их устранение. Плавку производили в индукционной печи.

2.1 Влияние легирующих элементов на свойства стали

При содержании легирующего элемента больше, чем указано на (рисунках 7-9) сплавы при всех температурах состоят из твердого раствора легирующего элемента в α -железе. Такие сплавы называют *ферритными*, а сплавы, имеющие лишь частичное превращение - *полуферритными* [85].

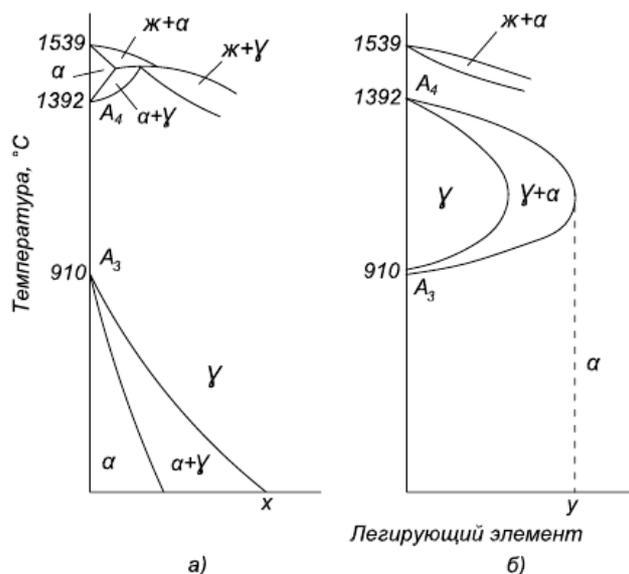
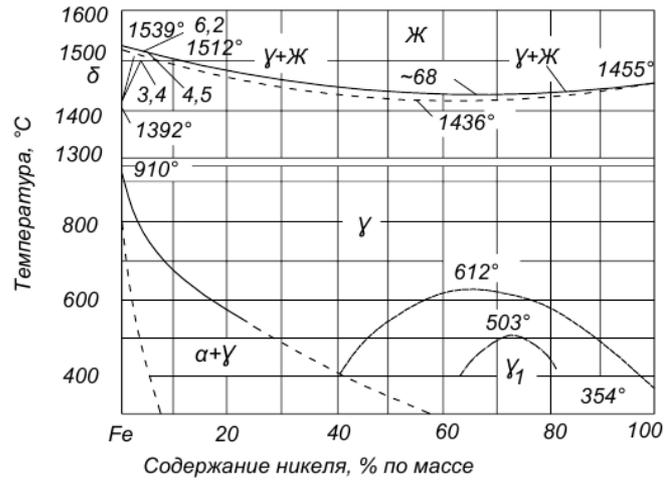
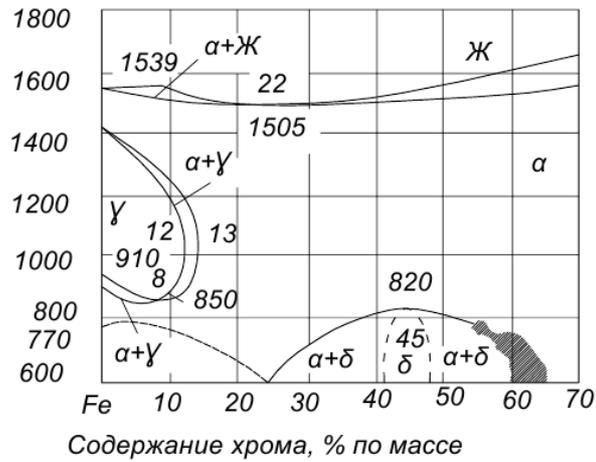


Рисунок 7 - Схемы влияния легирующих элементов на полиморфизм железа [85]

Все легирующие элементы, за исключением никеля, при содержании их в растворе выше определенного предела снижают ударную вязкость КСЧ, трещиностойкость K_{1C} и повышают порог хладноломкости t_{50} . Содержание легирующих элементов, выше которого ударная вязкость КСЧ снижается, а порог хладноломкости повышается, для ванадия и хрома $\sim 1\%$, для кремния $\sim 0,8\%$, для марганца $\sim 1,5\%$. Никель при увеличении его концентрации в твердом растворе понижает порог хладноломкости t_{50} [86].



а)



б)

Рисунок 8 - Диаграммы состояния Fe-Ni (а) б Fe-Cr (б) [85]

При высоком содержании в стали Ni или Mn аустенит может существовать при низких температурах. Он является основной составляющей (матрицей) многих коррозионностойких жаропрочных и немагнитных сталей. Аустенит наиболее сильно упрочняет углерод, растворимость которого в нем достигает при нормальной температуре 1%, и азот. Легирующие элементы, растворяясь в γ -железе, повышают прочность аустенита при нормальной и высоких температурах. Для легированного аустенита характерны низкий предел текучести при сравнительно высоком пределе прочности. Аустенит легко наклепывается, т.е. быстро и сильно упрочняется под действием холодной деформации. Аустенит парамагнитен, обладает большим коэффициентом теплового расширения.

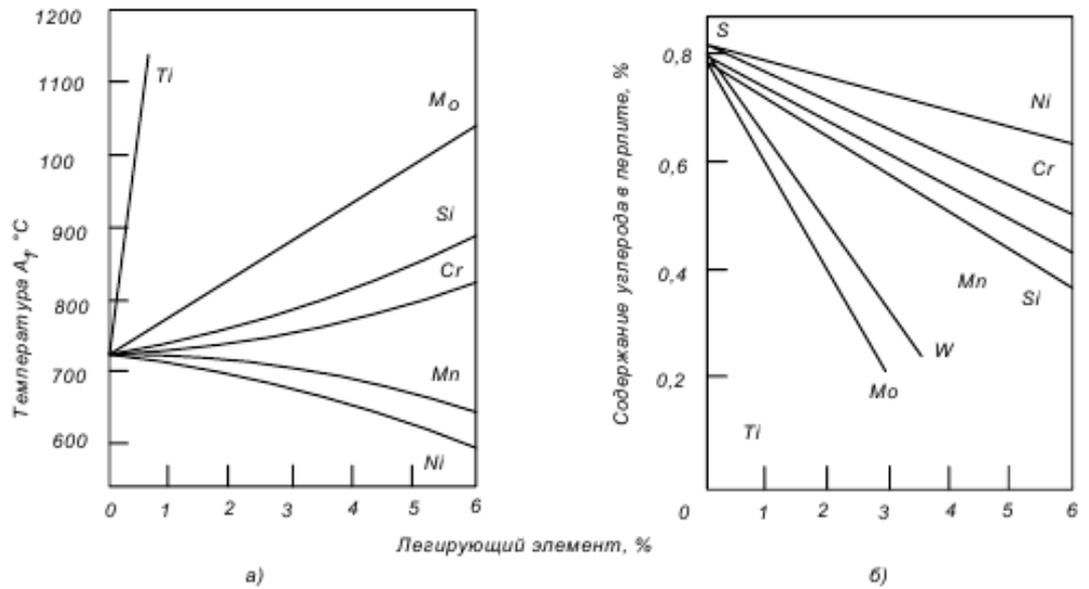


Рисунок 9 - Схема влияния легирующих элементов на точку A₁ (а) и содержание углерода в эвтектоиде перлите – точка S (б) [86]

При низком содержании углерода и большом количестве легирующего элемента, ограничивающего область существования аустенита (Cr, Mo, W, V, Si, Al и др), образуется сталь, относящаяся к *ферритному классу*. Структура такой стали состоит из легированного феррита, чаще с некоторым количеством карбидов.

При высоком содержании в стали легирующего элемента, расширяющего область γ -фазы (Mn, Ni), при нормальной температуре можно получить чисто аустенитную структуру. Этот класс сталей, не испытывающей $\alpha \leftrightarrow \gamma$ – превращения, называют *аустенитным* [87].

На рисунке показано как влияют на свойства феррита использованные легирующие элементы (рисунок 10):

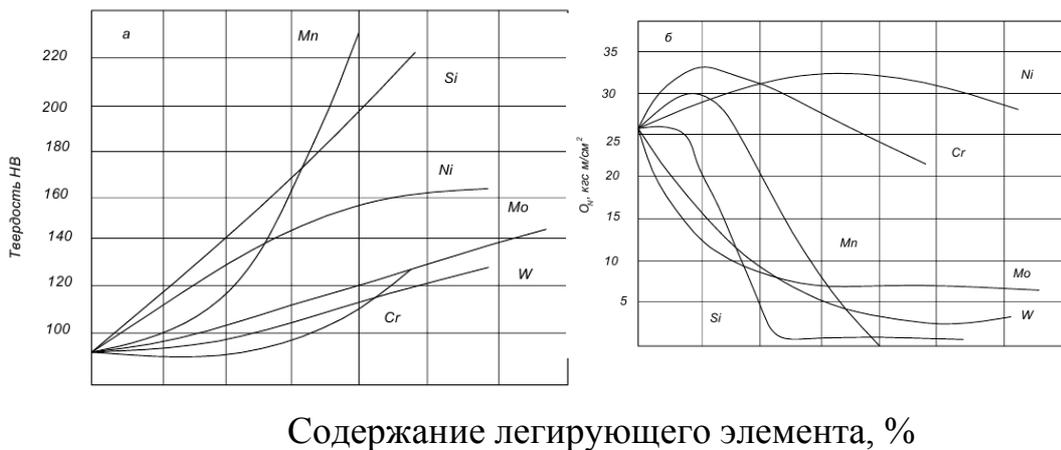


Рисунок 10 – Влияние легирующих элементов на свойства феррита

Ванадий входит в подгруппу металлов VA, его температура плавления 1919°C , на воздухе он устойчив до $200\text{-}300^{\circ}\text{C}$, при повышении температуры он взаимодействует с кислородом, азотом, углеродом, водородом.

Чистый ванадий пластичен. Ванадий проявляет устойчивость в пресной и морской воде. Ванадий широко используется при легировании сталей. Сталь с $(0,1\text{-}0,3)\%V$ характеризуется высокой прочностью, упругостью и малой чувствительностью к ударам, что необходимо для деталей, работающих в режиме соударений. Ванадий широко используется при выплавке инструментальных сталей [88].

Ванадий понижает температуру критической точки A_4 и повышает и повышает температуру точки A_3 . это приводит к тому, что при определенной концентрации легирующих элементов критические точки A_1 и A_3 , а точнее их интервалы, сливаются и область γ -фазы полностью замыкается.

Давно установлено, что расплавленная сталь поглощает много газов, прежде всего кислорода и азота. Когда металл остывает, газы остаются в слитках в виде мельчайших пузырьков. При ковке пузырьки вытягиваются в нити (волосовины) и прочность слитка в разных направлениях становится неодинаковой. Ванадий, введенный в сталь, активно реагирует с кислородом и азотом, продукты этих реакций всплывают на поверхность металла жидким шлаком, который удаляется в процессе плавки. Тем самым повышается прочность отливок, оставшийся ванадий раньше других элементов взаимодействует с растворенным в стали углеродом, образуя твердые и жаростойкие соединения – карбиды. Карбиды ванадия плохо растворяются в железе и неравномерно распределяются в нем, препятствуя образованию крупных кристаллов. Сталь получается мелкозернистой, твердой и ковкой. Структура ванадиевой стали сохраняется и при высоких температурах. Поэтому резцы из нее меньше подвержены деформациям в процессе обработки детали на больших скоростях, а штампы незаменимы для горячей штамповки. Мелкокристаллическая структура обуславливает также высокую ударную вязкость и большую усталостную прочность ванадиевой стали [89]. Практически важно еще одно ее качество – устойчивость к истиранию. Это качество можно наглядно проиллюстрировать таким примером: за тысячу часов работы стенки цилиндров дизель-моторов, изготовленных из углеродистой стали, изнашиваются на $0,35\text{-}0,40$ мм, а стенки цилиндров из ванадиевой стали, работавших в тех же условиях, лишь на $0,1$ мм [90].

На современном этапе развития производства при повсеместном истощении природных ресурсов и ухудшении экологической обстановки наиболее остро встают вопросы разработки ресурсосберегающих технологий получения металлопродукции при одновременном повышении ее качества. В решении этой проблемы ведущая роль принадлежит микролегированным, в том числе борсодержащим, сталям. Хорошо известно положительное влияние микролегирования бором на прокаливаемость и закаливаемость конструкционных сталей. Способность интенсивно измельчать структуру при ускоренном охлаждении делает бор обязательным компонентом многих

высокопрочных низколегированных сталей, разработка которых является одним из важнейших направлений в металлургии [91].

Микродобавки бора позволяют экономить такие остродефицитные легирующие элементы как никель, хром и марганец не снижая качества стали. Несмотря на технологические преимущества борсодержащих сталей, их внедрение в массовое производство сопряжено с определенными трудностями, к числу которых относятся сложности металлургического характера (необходимость получения строго нормированных концентраций бора в процессе выплавки стали, поддержание на заданном уровне содержания азота, титана и алюминия) и ограничения научно-обоснованных рекомендаций по выбору режима легирования стали бором в зависимости от технологических особенностей производства. В настоящее время накоплен значительный экспериментальный и теоретический материал, характеризующий поведение бора в сталях и особенности их (сталей) применения. Тем не менее, такие важные аспекты, как влияние технологии металлургического производства и параметров термической обработки борсодержащих сталей на прокаливаемость, не нашли однозначного толкования. Механизм влияния бора на прокаливаемость, термодинамические условия образования сегрегаций бора и присутствие его в растворе в несвязанном состоянии раскрыты не полностью, и требуют дальнейшего изучения [92].

Бор - исключительно активный и реакционноспособный элемент, легко окисляется и связывается в нитрид даже крайне малыми остаточными концентрациями кислорода и азота в металле. Поэтому основная задача при борном микролегировании - предотвратить окисление и азотирование бора и получить в металле требуемое количество растворенного бора, повышающего прокаливаемость стали. Исключительная активность бора в стальном расплаве требует соблюдения особых мер при выплавке борсодержащей стали. Для предотвращения окисления и нитрирования бора проводят предварительную обработку металла сильными раскисляющими и деазотирующими элементами. На завершающем этапе осуществляют легирование борсодержащим сплавом, задавая его в металл в виде кусков, брикетов, гранул или в составе порошковой проволоки. Однако даже при такой продолжительной и непростой технологии выплавки далеко не всегда удается получить в металле малое количество растворенного бора в узких концентрационных пределах. Кроме того, такая технология требует строго соблюдения жесткого регламента выплавки борсодержащей стали [93].

Наиболее распространенным сплавом, используемым для выплавки сталей, микролегированных бором, является ферробор - сплав на основе железа, содержащий 15-20% бора. К достоинствам ферробора следует отнести его относительную дешевизну при высокой концентрации бора в сплаве. Однако на практике получить заданное содержание бора в металле с помощью ферробора довольно сложно. Как уже отмечалось выше, бор имеет высокое химическое сродство к кислороду и азоту, и, будучи введенный в расплав, он активно взаимодействует даже с очень малыми, остаточными концентрациями

растворенных в металле кислородом и азотом. Обзор литературы позволяет сказать, что отсутствуют исследования по определению влияния бора на диссипативные свойства легированных сталей.

Химическое сродство к кислороду у никеля значительно меньше, чем у железа, поэтому никелевая сталь менее подвержена коррозии, чем простая углеродистая сталь. Однако никелевая сталь в этом отношении значительно уступает более дешевой хромистой нержавеющей стали. Поэтому чисто никелевую сталь (без других легирующих элементов) как сталь, обладающую особыми химическими свойствами (нержавеющая, кислотостойкая и т. д.), не применяют. Никель оказывает чрезвычайно сильное влияние на физические свойства железа.

В металлургии применяют очень много различных железоникелевых сплавов, обладающих особыми физическими и механическими свойствами [94].

Никель широко используют для получения легированных сталей повышенной прочности. Он отлично проявил себя при получении нержавеющей стали, надежность которых подтвержден многими областями применения. Нержавеющие стали с никелем обладают низкой магнитной проницаемостью, необходимой для использования в электронике и медицине.

Микродобавки никеля в демпфирующих сплавах описаны в работах Сулеева Д.К., Утепова Е.Б. [95]. Однако нет сведений о диссипативных свойствах легированных сталей никелем совместно с бором, ванадием, церием.

Одной из задач исследования является оценка влияния редкоземельных металлов на демпфирующие свойства сталей.

Элементы побочной подгруппы третьей группы и семейство, состоящее из четырнадцати элементов с порядковыми номерами от 58 до 71, весьма близки друг к другу по физическим свойствам. Эти элементы следуют в периодической системе после лантана и потому их называют лантаноидами. Иногда их называют редкоземельными элементами.

Редкоземельные металлы обычно находятся в природе совместно. Они образуют минералы, представляющие собой твердые растворы родственных соединений различных металлов. Например, один из главных источников редкоземельных металлов – минерал монацит, состоящий в основном из фосфатов церия, лантана, иттрия и других редкоземельных металлов. Лантаноиды обладают высоким сродством к кислороду, углероду, азоту, сере, и водороду [96].

Свойства лантаноидов определены недостаточно точно. Это относится не только к механическим свойствам, но и к температурам плавления полиморфного превращения, которые, по данным различных авторов существенно отличаются. Причина – наличие значительного количества примесей.

Многие лантаноиды и их соединения нашли применение в различных областях науки и техники. Один из крупных потребителей редкоземельных металлов - стекольная промышленность. Стекло, содержащее церий, не тускнеет под воздействием радиоактивных излучений и применяется в атомной

технике [97].

Церий иногда применяется в производстве стали, чугуна и цветных металлов. При этом используется главным образом мишметалл – сплав лантаноидов с преобладающим содержанием церия и лантана. Добавка малых количеств редкоземельных металлов повышает качество нержавеющей, быстрорежущих, жаропрочных сталей [98].

Церий редко используется в качестве легирующего элемента для демпфирования, но зачастую его добавка необычно меняет свойства сплавов, к тому же, влияние добавки церия в сталь, легированную никелем, бором, ванадием не изучено.

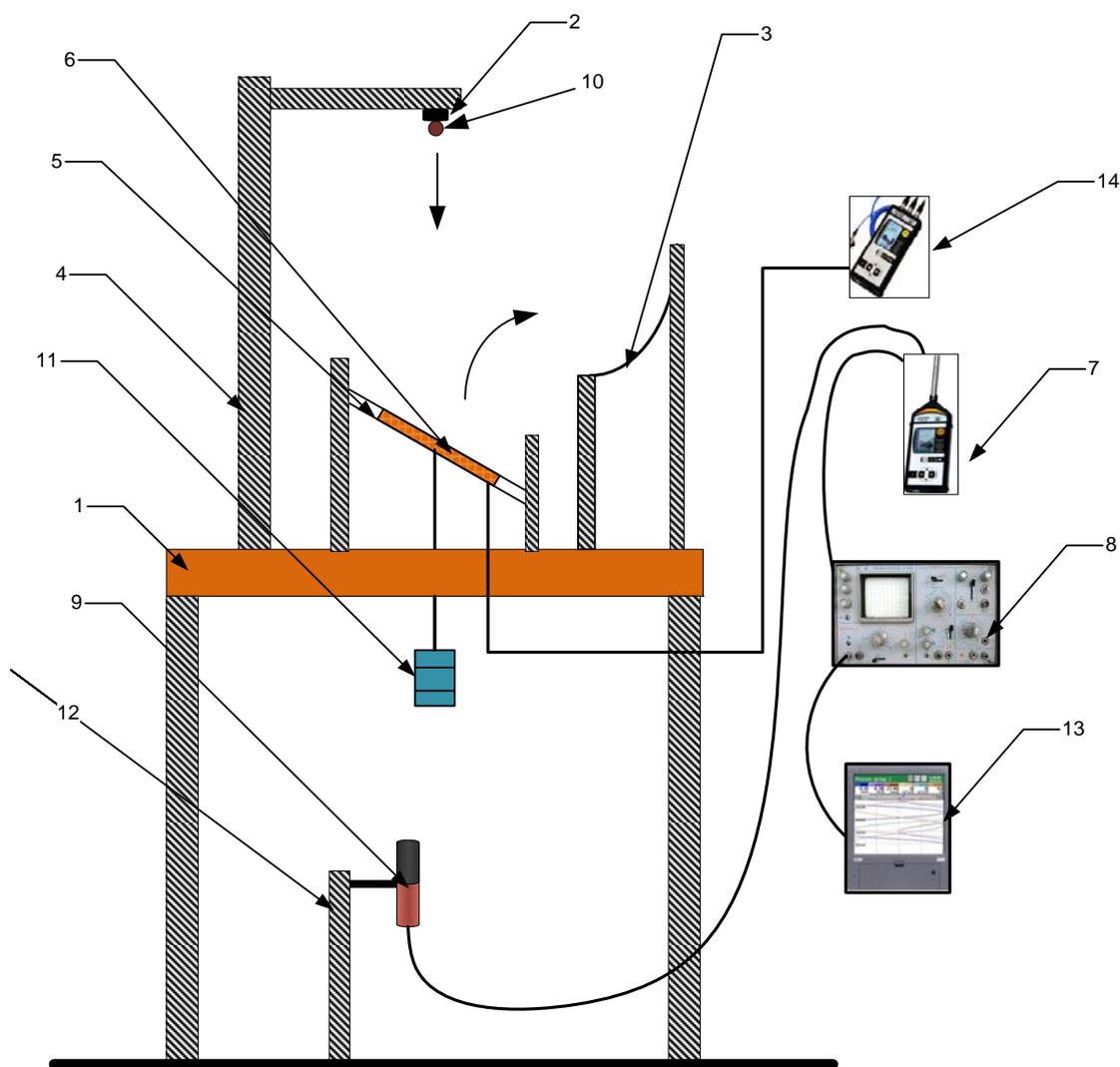
2.2 Методика исследования звукоизлучения и виброускорения демпфирующих сплавов

На основе анализа установок для исследования акустических (уровень звука, уровень звукового давления) и вибрационных (уровень виброускорения, общий уровень виброускорения) свойств сталей было выбрано устройство для комплексного исследования акустических и вибрационных свойств пластинчатых и трубчатых образцов сталей с последующей модернизацией [99].

Установка работает следующим образом (рисунок 11). Установка работает следующим образом. Шар (ударник) 10 удерживается в верхнем положении электромагнитом 2. Во время испытания шар совершает свободное падение и соударяется с образцом 6. Звук соударения шара и пластины фиксируется микрофоном 9 шумомера «ОКТАВА-101А» 7. Уровень вибрации от соударения измеряется виброметром общей и локальной вибрации 14 «Октава-101В» с трехкомпонентным акселерометром. Кроме того, установка позволяет измерять скорость затухания звука за счет самописца 13 модели PSG-101. Характеристики демпфирования можно рассчитать на основе записей осциллографа 8 модели С8-13.

При измерениях были использованы стальные (ШХ15) шары-ударники следующих диаметров: 9,5 мм; 12,7 мм; 15,2 мм; 18,3 мм (масса шаров-ударников соответственно: 2,5 г; 5 г; 9 г и 25 г).

На установке исследовали стальные пластинчатые образцы (50×50×5 мм).



1 - стол; 2 - электромагнит; 3 - ловитель шаров; 4 - стойка; 5 - капроновые нити; 6 - образец (пластина); 7 - шумомер; 8 - осциллограф; 9 - микрофон; 10 - шарик (ударник); 11 - груз; 12 - штатив; 13 - самописец; 14 - виброметр

Рисунок 11 - Устройство для комплексного исследования акустических и вибрационных свойств твердых образцов [99]

Масса шара, плотность образца, расстояния от точки соударения до образца, толщина образца взаимосвязаны по формуле 2 [100]:

$$m < 4,6 \cdot \rho \cdot l \cdot h^2 \quad (2)$$

где m - масса пластины-образца, г;
 ρ - плотность материала пластины-образца, г/см³;
 l - расстояние от точки соударения до ближайшего края пластины-образца, см;
 h - толщина пластины-образца, см.

При этом ширина и длина пластины-образца должны быть не менее чем в 5 раз больше его толщины. Исследуемая пластина размерами 50×50×5 мм удовлетворяет этим требованиям.

Уровни звукового давления исследовали в октавных полосах частот в диапазоне 31,5-31500 Гц, уровни виброускорения в диапазоне 31,5-31500 Гц. Уровень звука – по шкале «А», общий уровень виброускорения – по характеристике «Lin».

Температура воздуха и влажность в лаборатории поддерживались постоянными. Акустические измерения находили как среднее значение пяти измерений.

Проводили также математическую обработку результатов эксперимента (Приложение А) и определение доверительных интервалов в соответствии с методикой [101]. Перед началом работы настройку измерительного тракта осуществляли проверкой уровней звукового давления эталонного образца.

Звуковой импульс от соударения исследуемого образца с шаром-ударником фиксировали не только шумомером, но и регистрировали с помощью запоминающего осциллографа. Зафиксированный сигнал фотографировали и далее определяли характеристики демпфирования: логарифмический декремент, скорость затухания звука. Относительное рассеяние и внутреннее трение определяли расчетным путем.

На рисунке 12 показан сфотографированный звуковой импульс от соударения образца стали 20ХНР.

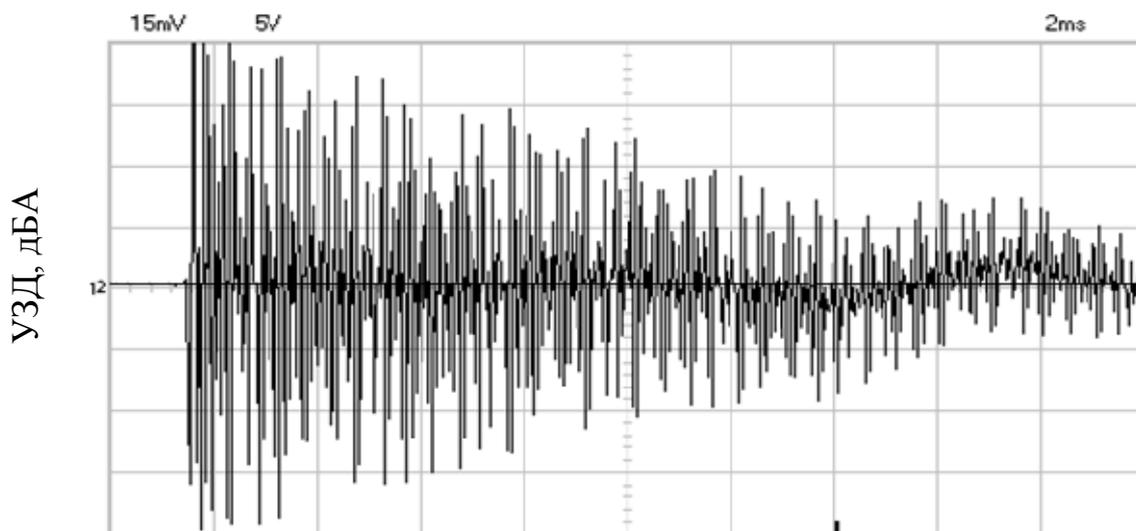


Рисунок 12 - Осциллограмма затухания звукового импульса от соударения образца стали 20ХНР и шара-ударника

Логарифмический декремент этого сплава определяли следующим образом [102]:

$$\delta = \frac{l}{n} \ln \frac{A_0}{A_n} = \frac{1}{42} \ln \frac{90}{70} = 0,0058 \quad (3)$$

где A_0 - начальная, максимальная амплитуда звукового импульса;
 A_n - конечная, минимальная амплитуда звукового импульса;
 n - число импульсов на экране осциллографа.

Относительное рассеяние:

$$\psi = 2\delta = 0,0117 \quad (4)$$

Внутреннее трение:

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{\psi}{2\pi} = \frac{0,0117}{2\pi} = 0,0018 \quad (5)$$

Временной интервал экрана осциллографа составляет 0,005 секунды. Весь интервал делится на $9 \times 5 = 45$ подинтервалов. Таким образом, цена деления временного интервала осциллографа составляет 0,00011 секунды.

Внутреннее трение определяли не только расчетным методом. Учитывая то, что в пластине при ударе возбуждаются в основном изгибные волны, внутреннее трение разработанных сплавов исследовали методом изгибных колебаний.

Использовали автоматический прибор для непрерывной регистрации внутреннего трения при изгибных колебаниях стержней с электромагнитным возбуждением в диапазоне высоких частот (950-1000 Гц), амплитуд 10^4 и температур 20-600°C:

Измерения внутреннего трения проводили с помощью дискриминатора и счетчика импульсов, рассчитывая по формуле:

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{1}{\pi \cdot n} \ln \frac{V}{V_n}, \quad (6)$$

где δ - логарифмический декремент;

V - начальная амплитуда;

V_n - конечная амплитуда;

n - число колебаний, совершенных образцом в диапазоне от начальной до конечной амплитуды.

Аппаратурные потери определяли с помощью кварцевого стержня, устанавливаемого вместо образца. Такие измерения позволили оценить величину фона установки, которая значительно меньше 10^{-5} , что на порядок ниже минимальных значений затухания испытуемых образцов. Характеристики внутреннего трения исследовали на образцах размерами $1,5 \times 1,5 \times 100$ мм после

горячей прокатки в диапазоне частот 950-1000 Гц при комнатной температуре 20°С. На каждом образце проводили пять замеров.

Автором проведены работы по созданию демпфирующих сплавов [103-117].

Оценка механических свойств исследованных сплавов проводили стандартными методами [118].

В таблице 8 приведены механические свойства структурных составляющих сталей.

Таблица 8 – Механические свойства структурных составляющих стали [118]

Структура металлической матрицы	σ_b , МПа	δ , %	КСУ, МДж/м ²	Твердость по Бринелю НВ
Феррит	492	12,4	0,77	187
Феррит и перлит	580	7,5	0,42	223
Перлит	645	3,8	0,19	241
Троостит и феррит	782	7,5	0,42	269
Троостит	1178	3,2	0,21	302
Мартенсит	980	0,3	-	433

Видно, что прочностные свойства максимальны у структуры троостита (1178 МПа), минимальны у феррита (492 МПа). Перлит (565 МПа) и мартенсит (980 МПа) занимают промежуточное положение. Относительное удлинение (δ) максимально у феррита (12,4%), минимально у мартенситной структуры (0,3%). Перлит, троостит и феррит (7,5%), а также троостит (3,2%) занимают промежуточное положение. Эта таблица отображает механические характеристики структуры сталей. Если структура определенной стали имеет различные параметры прочностных и пластических свойств, значит и степень демпфирования также должны применять.

Диссипативные свойства существенно зависят от модуля Юнга. Значение модуля нормальной упругости находили из соотношения [119]:

$$E = 2G(1 + \mu) \quad (7)$$

где G - модуль сдвига;

μ - коэффициент Пуассона.

Определение модуля сдвига G осуществляли по методу крутильных колебаний, который сводится к определению частоты собственных колебаний образца [119]:

$$G = 2,4 \frac{L_M}{d^4} \cdot f^2, \quad (8)$$

$$E = 2 \cdot 2,4 \frac{L_M}{d^4} (1 + \mu) \cdot f^2 = \frac{K}{T^2},$$

где $K = 4,8 \frac{L_M}{d^4} (1 + \mu)$ - постоянная величина;

L_M - длина образца, м;

d - диаметр образца, м;

T - период собственных колебаний образца, с.

Жесткость образцов (пластины 50x50x5 мм) определяли по формуле [119]:

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12(1 - \mu^2)} = A \cdot E = 10,998 \cdot E, \quad (9)$$

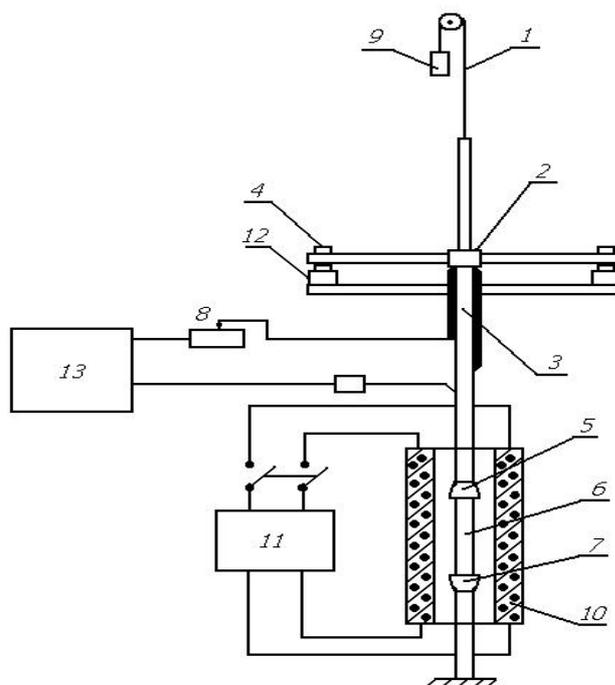
где h - толщина, мм;

E - модуль Юнга, кгс/мм;

μ - коэффициент Пуассона.

$$A = \frac{h^3}{12(1 - \mu^2)} = 10,998 \text{ мм}^3 \quad (10)$$

Измерение модуля сдвига производили на установке, принципиальная схема которой показана на рисунке 13.



1 – капроновая нить; 2 – рамка; 3 – стержень; 4 – электромагниты; 5,7 – цанговые зажимы; 6 – образец; 8 – реостат; 9 – груз; 10 – печь; 11 – терморегулятор; 12 – оптическая система; 13 – генератор

Рисунок 13 - Схема прибора для измерения модуля сдвига и внутреннего трения при свободных и вынужденных колебаниях [120]

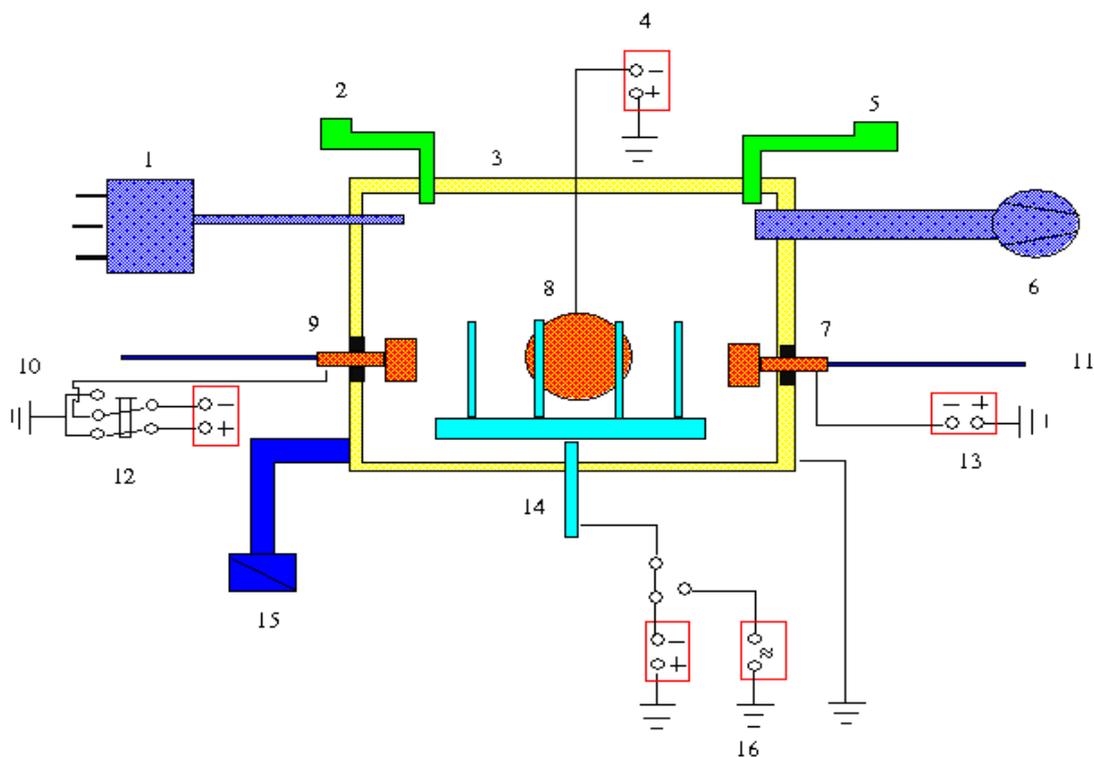
Оценку твердости осуществляли на приборах Бринелля и Роквелла. Металлографическое изучение микроструктуры осуществляли с помощью электронного микроскопа Hitachi S-4700 FE-SEM (Япония), а также на микроскопе МИМ-7 при 300-кратном увеличении..

Геометрические параметры зерна определяли согласно ГОСТ 5639-65. Определение неметаллических включений проводили методом Л (варианты Л1 Л2) - линейным подсчетом включений согласно ГОСТ 1778-70. Для некоторых сплавов механические характеристики (σ_B) определяли расчетным способом.

2.3 Устройство для создания наноструктурного покрытия

Для получения на поверхности исследованных сталей наноструктурных покрытий использовано устройство для создания наноструктурного покрытия ННВ – 6.6 (НИТУ Московский институт стали и сплавов). Устройство позволяет сепарировать нейтральные частицы (микрокапельная фаза).

Принципиальная схема универсальной вакуумно-дуговой установки представлена на рисунке 14.



1 – газосмеситель; 2 – вакуумметр; 3 – камера установки; 4 – источник электропитания ускорителя-сепаратора; 5 – система контроля температуры; 6 – вакуумная система; 7, 9 – дуговые испарители; 8 – источник сепарированной плазмы; 10, 11 – системы охлаждения испарителей; 12, 13 – источники электропитания испарителей; 14 – поворотный стол для размещения инструмента; 15 – система нагрева и охлаждения камеры; 16 – источник

Рисунок 14 - Принципиальная схема вакуумно-дуговой установки универсального назначения [121]

Электродуговой источник с сепарацией потока плазмы SPS-1 (Separated Plasma Source) позволяет получать качественно новые покрытия в традиционной области применения плазменного электродугового метода – нанесение упрочняющих и других функциональных покрытий на инструмент и детали машин, но открывает возможность получения высокоэффективным электродуговым методом покрытий и материалов для таких областей промышленности как электроника, производство МЭМС – МикроЭлектроМеханических Систем и других микросистем, создание новых функциональных наноструктурированных материалов и наносистем.

Электродуговой источник с сепарацией потока плазмы SPS-1 формирует газометаллический пучок плазмы очищенный от микро- и нейтральных частиц с высокой степенью ионизации как металлической так и газовой составляющих. Источник позволяет управлять соотношением компонент (газовой и металлической) в потоке плазмы. В таблице приведены основные эксплуатационные характеристики источника. Для сравнения, в правой части таблицы 9, приведены эксплуатационные характеристики традиционного прямооточного источника плазмы – испарителя установки ННВ-6.6 [121].

Таблица 9 - Название основных эксплуатационных характеристик установки ННВ-6.6 [122]

Наименование	Источник SPS-1	Традиционный испаритель
Сечение потока плазмы, см ²	600	500
Номинальный ток дуги, А	200	100
Потребляемая мощность, кВт	6,5	3,1
Расход катода (титан), г/ч	32,5	18,7
Скорость нанесения покрытий, мкм/ч	до 40	до 25
Скорость травления подложки, мкм/ч	до 8	практически нет

На рисунке 15 приведены: а - распределение скорости осаждения материала по поперечному сечению пучка на подложку, расположенную на расстоянии 160 мм от выхода источника плазмы; б - распределение толщины покрытия по "глубине" - по боковой поверхности, параллельной направлению потока плазмы. С равномерностью до 20% диаметр "пятна" нанесения покрытия составляет 300 мм, а "глубина" - 50 мм [122].

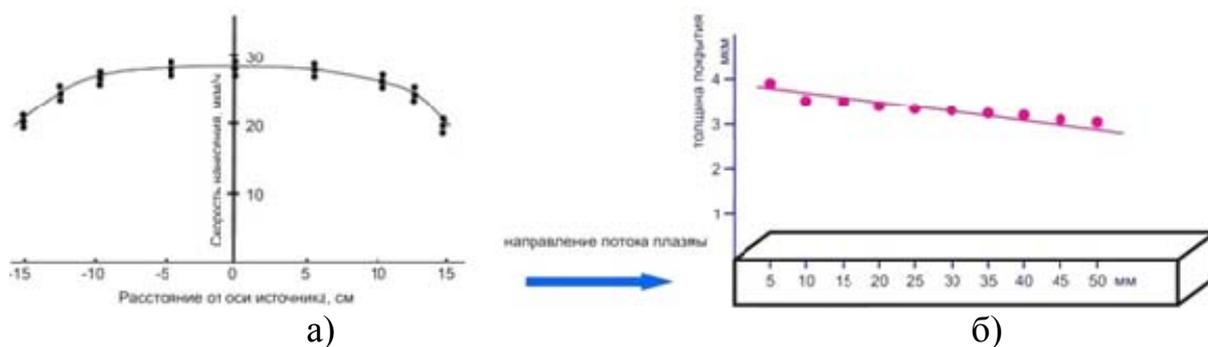


Рисунок 15 - Нанесение покрытия на подложку

На рисунке 16 приведена зависимость скорости травления подложки из стали 3 от ускоряющего напряжения при работе источника в режиме аргоновой газовой плазмы - "запертом" для ионов металла.

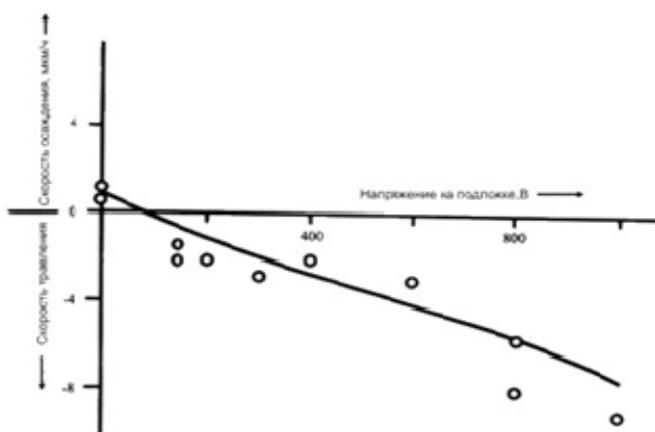


Рисунок 16 - Зависимость скорости травления подложки от напряжения

Источник сепарированной плазмы (рисунок 17) состоит из плазмоведа, который представляет собой часть тора с углом 120° . Внутренний диаметр тора равен 200 мм. С наружной стороны плазмоведа расположена электромагнитная катушка. На входе плазмоведа располагается катодный узел с закрепленным на нем катодом, который смещен от центра плазмоведа таким образом, что он находится относительно центра тора на радиусе $R_0 = \sqrt{r \cdot R}$, где r и R соответственно малый и большой радиусы стенок плазмоведа. На противоположном конце плазмоведа располагается анод дугового разряда, которым могут служить стенки вакуумной камеры. На корпус плазмоведа подается положительное или отрицательное напряжение.

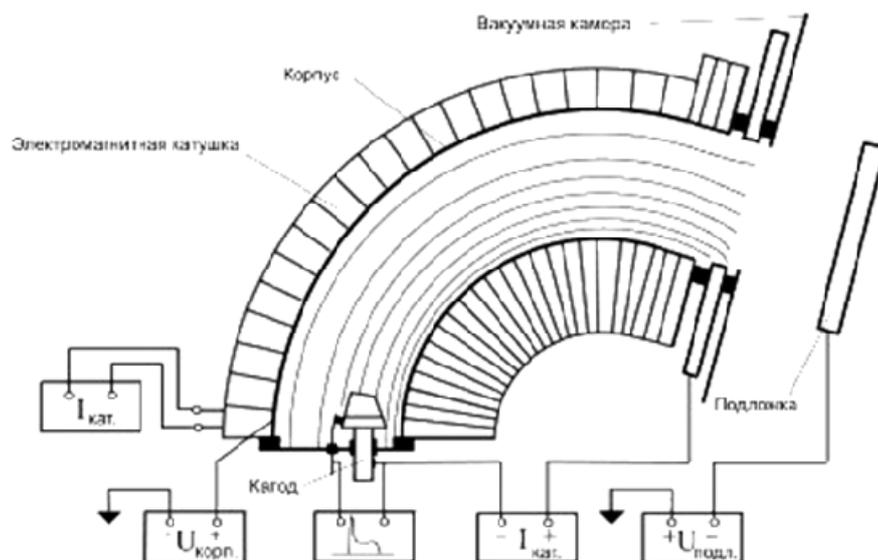


Рисунок 17 - Источник сепарированной плазмы [121]

При пропускании тока через катушку внутри плазмоведа создается равномерное по длине магнитное поле. Величина напряженности магнитного поля на осевой линии тора составляет около 600 эр. Дуговой разряд зажигается между катодом и анодом и обеспечивает прохождение электронного тока дуги через плазму, сформированную внутри плазмоведа. Поскольку электронная компонента плазмы замагничена, то силовые линии магнитного поля, пересекающие катод и проходящие вблизи оси плазмоведа принимают потенциал близкий к потенциалу катода, а силовые линии вблизи стенок плазмоведа – потенциал стенок. Таким образом, в плазме создается электрическое поле, перпендикулярное к стенкам плазмоведа. Электрическое поле обеспечивает дрейф ионов от стенок или к стенкам плазмоведа – в зависимости от полярности и величины напряжения, приложенного к стенкам. Таким образом, ионизованная компонента плазмы транспортируется вдоль силовых линий магнитного поля по плазмоводу к выходу. Тогда как микрочастицы и нейтральная компонента плазмы осаждаются на стенках плазмоведа.

С учетом низкой электропроводности субстратов из градиентной керамики была разработана специальная технология синтеза покрытий на основе использования специальных источников низко- и среднеэнергетической плазмы (газовой и газометаллической), разделения процессов термоактивирования и очистки поверхности субстрата, гашения микродуг и сепарации капельной составляющей, особенно при использовании элементов с относительно низким атомным весом (Al, Ti и др.).

Наноструктурное покрытие на пластинах из исследованных сталей осуществляли на модернизированной ионно-вакуумной установке тремя катодами, два из которых имели электромагнитную стабилизацию катодного пятна и плазмооптическую фокусировку плазменного потока (стандартные

испарители). Один – был оснащен системой для сепарации-ускорения плазменного потока [123].

Образцы из исследованной стали загружали в камеру установки на стол механизма вращения, который обеспечивал перемещение инструмента в потоке газометаллической плазмы. Остаточное давление в камере создавали и регулировали с помощью вакуумной системы и автоматического регулятора напуска рабочего газа, температуру пластин контролировали с помощью пирометрической системы, имеющей рабочий диапазон измеряемых температур 150–900°C, рабочий спектральный диапазон 1,8–3,8 мкм, показатель визирования 1:500 (номинальное значение) и время установления показаний не более 0,025 с.

Создание наноструктурных покрытий (на примере синтеза многофункциональных покрытий на основе системы Ti-Al-N) для субстратов из легированной стали включал 7 основных этапов:

1. Очистка и мойка.
2. Установка пластин в вакуумную камеру установки.
3. Предварительная (глубокая) откачка.
4. Ионная очистка поверхности исследованных пластин.
5. Термическая активация рабочих поверхностей опытных образцов пластин.
6. Синтез (осаждение) адгезионно-упрочняющего слоя, на поверхности образца.
7. Синтез износостойкого слоя.

Предварительная мойка и очистка необходимы для удаления с поверхности изделий поверхностных загрязнений, снижающих прочность адгезионной связи между покрытием и субстратом. Очистку производили в ультразвуковой ванне УЗК – 3,4 при использовании водной эмульсии препарата ТМС – 31 с концентрацией 60 г/л в течение не менее 20-25 минут.

После завершения процесса очистки пластины перемещали в сушильный шкаф, где прогревали до температуры 40-50°C для устранения вероятности выпадения водного конденсата на поверхности пластин в момент их загрузки в камеру установки.

Пластины загружали в специальные приспособления, обеспечивающие определенную пространственную ориентацию пластин относительно дуговых испарителей и источника ионов. При этом загрузку пластин осуществляли таким образом, чтобы исключить вероятность «затенения» их рабочих поверхностей относительно ионного потока в процессах ионной очистки, формирования адгезионно-упрочняющего подслоя и износостойкого слоя покрытия.

Предварительную откачку осуществляли с использованием форвакуумного насоса до значений давления остаточного газа в камере $\cong 1$ Па. После достижения давления 1 Па включали диффузионный насос и осуществляли откачку до величины остаточного газа в камере (вакуум) порядка $\cong 10^{-3}$ Па.

С учетом низкой электропроводности пластин, процесс их ионной очистки

производили с использованием источника ионов типа «Поток-2». Для исключения вероятности формирования микродуг, которые могут служить причиной электроэрозии режущих кромок пластин в процессе ионной очистки исключали подачу на пластины рабочего напряжения смещения. Очистку производили в среде аргона при давлениях рабочего газа $\cong 6 \div 10^2$ Па, длительность цикла ионной очистки составляла до 20–30 минут.

Для обеспечения высокой прочности адгезионной связи между рабочими поверхностями пластин и покрытием их прогревали до температур 600-700°C. Нагрев пластин производили в плазме несамостоятельного тлеющего (газового) разряда путем приложения к изделию небольшого (до 100 В) положительного потенциала, что исключало появление микродуг на рабочих поверхностях пластин.

Термоактивацию рабочих поверхностей пластин осуществляли в среде аргона при рабочих давлениях порядка $0,8 \div 1,5 \times 10^{-1}$ Па.

Длительность термоактивирования пластин составляла, в зависимости от степени загрязненности, до 15–40 минут. Контроль температуры нагрева (термоактивации) производили при использовании оптического пирометра.

Синтез адгезионно-упрочняющего подслоя и покрытия на рабочие поверхности пластин производили при использовании двух катодов Al и Ti (для вакуумно-дуговых установок с 3-мя испарителями). Для полного исключения появления катодных пятен на рабочих поверхностях пластин на начальной стадии процесса синтеза в течение 2–3 минут осаждение производили при величине напряжения смещения равного 0. Затем напряжение смещения увеличивали до 60-100 В.

Длительность цикла синтеза покрытия определяется необходимостью получения толщины покрытия определенной величины и зависит от собственно напряжения смещения, тока дуги и давления реакционного газа (азота). На используемой вакуумно-дуговой установке толщину покрытия (Ti, Al) $N \cong 3 - 4$ мкм достигали за 30-40 минут [124].

2.4 Имитационное моделирование виброакустических моделей опытных образцов в COMSOL Multyphysics

Современное программное обеспечение дает возможность имитационно моделировать физические процессы, которые позволяют более точно анализировать демпфирующие свойства сплавов, т.к. вычислительная возможность данных программных пакетов обширна.

Одним из таких программных пакетов является COMSOL Multiphysics. Это уникальная интерактивная среда для моделирования и расчетов почти всех научных и инженерных задач, которые основываются на использовании дифференциальных уравнений в частных производных (PDE) методом конечных элементов. С этим программным обеспечением можно расширять стандартные модели, использующие только одно дифференциальное уравнение в мультифизические модели для расчета связанных между собой физических явлений. Расчет с данным программным пакетом не требует глубокого

знания математической физики и метода конечных элементов. Это возможно благодаря встроенным физическим режимам, где коэффициенты PDE задаются в виде понятных физических свойств и условий, таких как: теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, объемная мощность и т.п. в зависимости от выбранного физического раздела. Преобразование этих параметров в коэффициенты математических уравнений происходит автоматически. Взаимодействие с программой возможно стандартным способом – через графический интерфейс пользователя (GUI), либо программированием с помощью скриптов на языке COMSOL Script или языке Matlab [125].

COMSOL Multiphysics обеспечивает идеальный инструмент для создания симуляций, которые могут точно повторить важнейшие характеристики тех или иных разработок. Способность включать все соответствующие физические и химические эффекты, которые существуют в реальном мире, многократно облегчает все этапы в процессе моделирования: определение геометрии, сетки, решения, а затем визуализации ваших результатов.

Программа основана на системе дифференциальных уравнений в частных производных. Существует три математических способа задания таких систем:

- 1 Коэффициентная форма, предназначенная для линейных и близких к линейным моделей;
- 2 Генеральная форма, для нелинейных моделей;
- 3 Слабая форма, для моделей с PDE на границах, ребрах или для моделей, использующих условия со смешанными производными по времени.

Используя эти способы, можно изменять типы анализа, включая:

- стационарный и переходный анализ;
- линейный и нелинейный анализ;
- модальный анализ и анализ собственных частот.

Для решения PDE, COMSOL Multiphysics использует метод конечных элементов (FEM). Программное обеспечение запускает конечноэлементный анализ вместе с сеткой, учитывающей геометрическую конфигурацию тел и контролем ошибок с использованием разнообразных численных решателей. Так как многие физические законы выражаются в форме PDE, становится возможным моделировать широкий спектр научных и инженерных явлений из многих областей физики таких как: акустика, химические реакции, диффузия, электромагнетизм, гидродинамика, фильтрация, тепломассоперенос, оптика, квантовая механика, полупроводниковые устройства, сопломат и многих других [126].

Акустический модуль программного пакета COMSOL Multiphysics — решение мирового уровня для моделирования акустических явлений. Лёгкий в использовании, модуль позволяет рассчитывать распространение волн в воздухе, воде и других средах. Предназначен специально для расчёта с позиций классической акустики устройств, производящих, измеряющих и использующих акустические волны.

Разработаны имитационные модели исследования процесса затухания

звуковой волны и вибрации в исследуемых сплавах в прикладном программном пакете COMSOL Multiphysics. В основе модели заложен принцип исследований акустических и вибрационных свойств, которые ранее проводились экспериментально на установке комплексного исследования акустических и вибрационных свойств пластинчатых и трубчатых образцов сталей.

Целью моделирования является – проведение сравнительного визуального анализа между образцами стандартной стали 20ХНР и опытного сплава 3М после соударения.

Моделирование виброакустического демпфирования основаны на следующих уравнениях:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} &= Q \\ p_t &= p + p_b \\ k_{eq}^2 &= \left(\frac{\omega}{c_c} \right)^2, -i\omega = \lambda \\ -\rho\omega^2 u - \nabla \cdot \sigma &= F_v, -i\omega = \lambda \end{aligned} \quad (11)$$

где, λ - собственное значение, которое находится через $\lambda = i2\pi f = i\omega$,
 F - собственная частота,
 ω - угловая частота.

Звуковые волны в твердой среде, базируются на уравнениях для акустического давления P (Па):

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p - q) \right) = Q \quad (12)$$

Т.к. эти значения не зависят от давления, алгоритм не учитывает любые дипольные и монопольные источники.

Уравнение 11 относится к 3D случаю. Уравнения решаются в собственной частоте заменой $\omega^2 \rightarrow -\lambda^2$.

Смоделированы образцы в виде 3D пластины с размерами 50×50×5мм (рисунок 18).

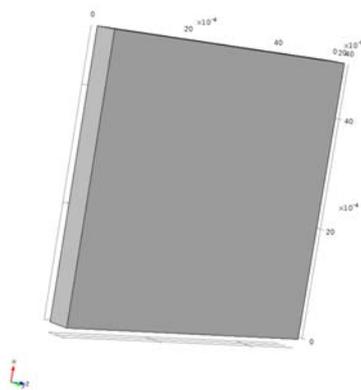


Рисунок 18 - Геометрия моделируемого образца

Для того, чтобы получить более полную картину движения звуковых волн, шарик падал не на горизонтально расположенную поверхность пластины, а на вертикально расположенную грань образца, тем самым позволяя визуализировать процесс зарождения и затухания звуковых волн после соударения по всему образцу.

На рисунках 19 и 20 представлены результаты моделирования процесса затухания звуковой волны в образцах из сталей 20ХНР и 3М в COMSOL Multiphysics.

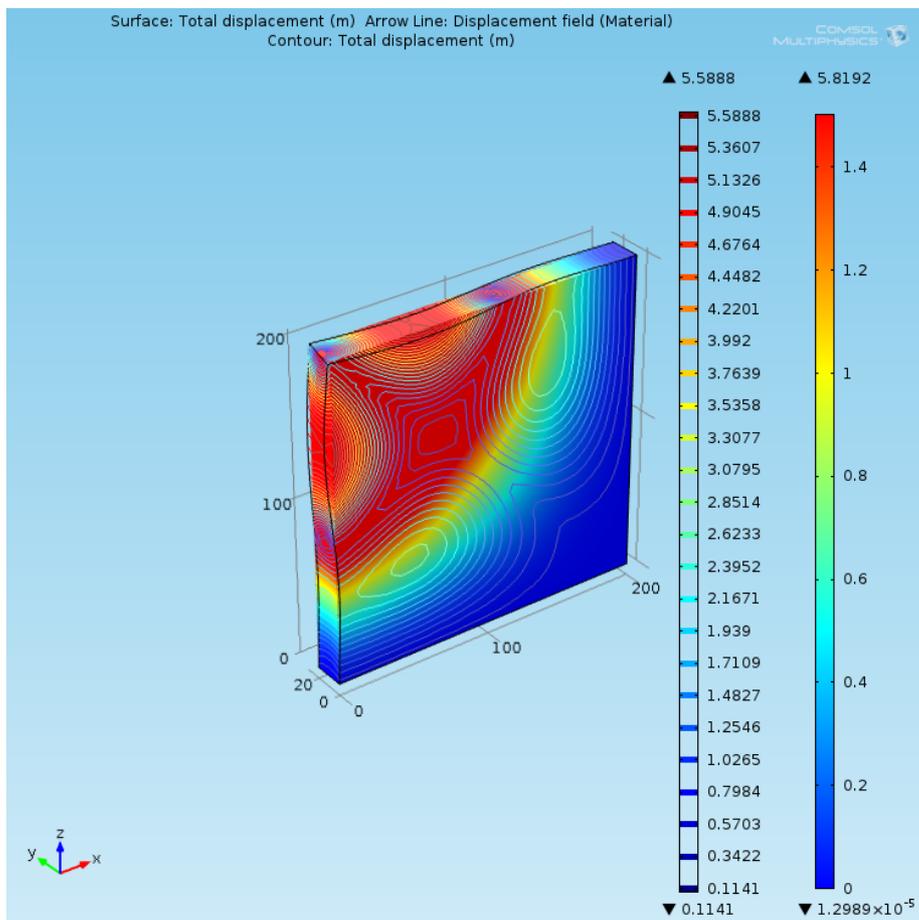


Рисунок 19 - модель стандартного материала (20ХНР)

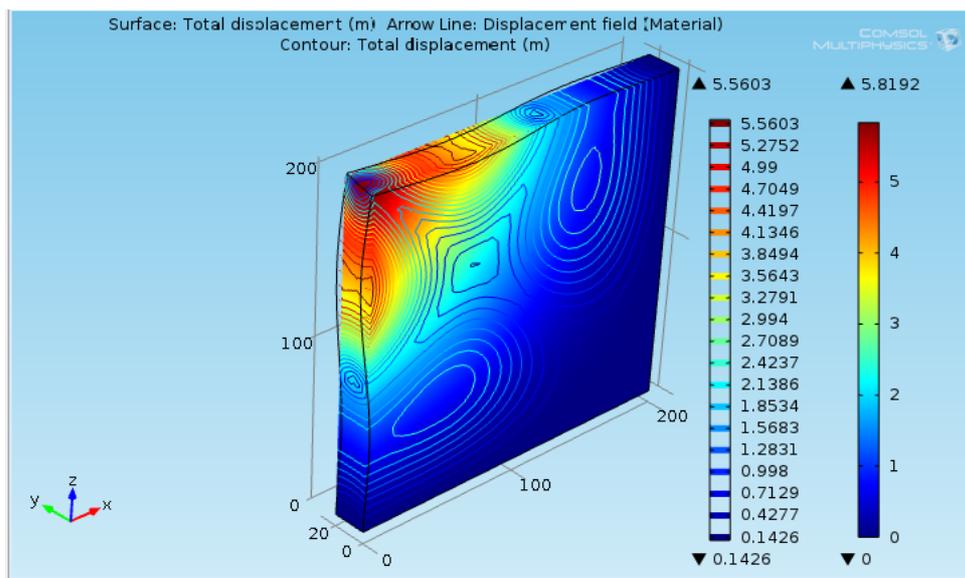


Рисунок 20 - модель опытного образца 3М

Видны области деформации, где произошло соударение шара с образцами. С помощью изолиний можно увидеть области интенсивного звукоизлучения, и области, где происходит полное затухание волн. Сравнивая результаты визуализации, видно, что у образца 3М ширина распространения акустических волн гораздо меньше, чем у стали 20ХНР, что говорит о высоком уровне демпфирования.

В работе также была смоделирована 3D модель цилиндрического образца (штулки) из опытного сплава 3М. Основные этапы: постановка задачи моделирования; определение размерности и задачи геометрии; указание начальных и граничных условий; построение сетки; расчет и результаты представлены в Приложение Б.

Таким образом, с помощью COMSOL Multiphysics были получены имитационные модели образцов сталей 20ХНР и 3М.

Выводы по второму разделу

1 Объектом исследования были выбраны легированные стали 20ХНР, 30ХН2МФА и 38ХН3МФА, из которых изготавливают детали, работающие на трение и при ударных нагрузках (червяки, кулаки шарнира, зубчатые колеса), а также новые демпфирующие сплавы 1М, 2М, 3М, легированные никелем, ванадием, бором. Демпфирующие свойства этих сплавов неизвестны.

2 Для исследования звукоизлучения и виброускорения разработанных образцов было использовано устройство для комплексного исследования акустических и вибрационных свойств пластинчатых и трубчатых образцов сталей.

3 Определены физико-механические свойства исследуемых материалов (модуль Юнга, предел прочности, модуль сдвига, жесткость образцов, твердость) по стандартным методикам.

4 Для получения покрытий на поверхности образцов использована вакуумно-дуговая установка для нанесения наноструктурных ионноплазменных покрытий ННВ – 6.6.

5 Использован программный пакет COMSOL Multiphysics для моделирования инженерной задачи с различным химическим составом. В основе модели заложен принцип исследования акустических и вибрационных свойств, которые ранее проводились экспериментально на установке комплексного исследования акустических и вибрационных свойств пластинчатых и трубчатых образцов сталей. С помощью акустического модуля программного пакета COMSOL Multiphysics получены имитационные модели образцов сталей 20ХНР и 3М, получена визуальная картина колебания пластины после ударного возбуждения и области затухания звука в исследуемых сталях.

3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ПОИСКЕ ВИБРОДЕМПФИРУЮЩИХ СПЛАВОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ НИКЕЛЕМ, ВАНАДИЕМ, БОРОМ И ЦЕРИЕМ

3.1 Применение методов планирования эксперимента

Математическое планирование экспериментов строит эксперимент по заранее составленному плану. Это свидетельствует о математических методах управления экспериментом. Часть труда исследователя, базирующаяся ранее на его интуиции, становится формализованной [127].

Преимущества методов планирования эксперимента заключается, во-первых, в том, что математическая статистика ввела в теорию эксперимента концепцию случая, т.е. эффекты, обусловленные многочисленными строго детерминированными, но неконтролируемыми факторами, рассматриваются как случайные. Это возможно только после того, как эксперимент рандомизируется. Во-вторых, планирование эксперимента позволяет резко повысить эффективность эксперимента. Это значит, интересующие параметры могут быть определены со значительно меньшей ошибкой, чем при традиционных методах исследования. В задачах со многими факторами исследователь может ставить эксперименты так, что варьирует все факторы сразу в отличие от традиционного подхода, при котором исследователь изучает влияние каждого фактора в отдельности. В-третьих, математическое планирование эксперимента позволяет построить стратегию исследования, основанную на последовательности четких, логически осмысленных операций. Традиционными методами исследования можно получить такие же результаты, как и новыми методами. Однако, там нет такой четкости, логически упорядоченной стратегии - исследователь ведет поиск экстремума, руководствуясь только своей интуицией. Это приводит к постановке многих лишних опытов, что существенно удорожает экспериментальную часть. В-четвертых, в математической статистике разработаны методы, позволяющие производить обработку результатов наблюдений наилучшими приемами, которые дают так называемые эффективные оценки. Важно то, что оценка параметров и установление доверительных границ для них производится некоторым стандартным образом. Исследователи, работающие в различных организациях и даже в разных странах, могут получать сопоставимые результаты. Появляется возможность говорить о коллективной работе [128].

Метод Бокса-Уилсона называется методом крутого восхождения - это один из популярных способов математического планирования экспериментов. Смысл метода состоит в том, что проводится эксперимент на небольшом участке поверхности отклика (плоскостная модель). Затем определяется уравнение этой плоскости, а из него - направление, по которому следует двигаться к точке оптимума на поверхности. Поскольку следующий эксперимент должен быть в направлении, в котором предполагается самое быстрое

увеличение высоты (крутое восхождение), этот метод не позволяет определить, насколько далеко от исходной экспериментальной точки, предшествующей последующими экспериментальным точкам, нужно продвигаться, однако он указывает экспериментатору направление, по которому следует двигаться к последующей точке.

Методы математического планирования экспериментов широко используются в экспериментальной работе, где имеются несколько регулируемых факторов [128-139].

Метод МПЭ использовался и для поиска демпфирующих сплавов [140-146], но химический состав был иной. Ни в одном из исследований не использовалось сочетание легирующих элементов: никель, ванадий, бор. Поэтому, для создания демпфирующих сплавов с легирующими элементами (никель, ванадий, бор) решено использовать один из самых эффективных методов МПЭ - метод Бокса-Уилсона.

3.2 Методы исследования демпфирования

Применение методов математического планирования экспериментов получило широкое распространение в прикладных научных расчетах. В соответствии с целью настоящего исследования, когда из огромного числа вариантов необходимо было определить химический состав демпфирующей стали с добавками никеля, бора, ванадия и церия, наиболее оптимальным является способ поиска экстремума поверхности отклика. В качестве переменных факторов установили содержание углерода и легирующих элементов Ni, V, B. С целью повышения демпфирующих характеристик выплавляемых сталей, решено было добавить в качестве легирующего элемента представителя РЗМ - церий. Легирующие элементы и интервалы варьирования были выбраны с учетом их влияния на прочностные, акустические и демпфирующие свойства стали.

Изучали стали с содержанием углерода от 0,2 до 0,4%, легированные никелем от 0,5 до 3,5%, бором от 0,001 до 0,005%, ванадием от 0,1 до 0,35, церием от 0,01 до 0,1%.

В качестве других факторов, влияющих на звукоизлучение и диссипацию звуковой энергии были выбраны: толщина наноструктурного покрытия и термическая обработка. В результате этого, определилась база исследования, включающая свыше десяти тысяч вариантов.

В связи со столь большим числом вариантов в основу исследования был положен метод математического планирования экспериментов (МПЭ), позволивший резко сократить объем необходимых исследований, избавиться от мешающих факторов и задать четкую логическую схему для всех операций. Если говорить о количественной стороне, то применение МПЭ дало возможность в тысячи раз сократить число исследуемых вариантов.

Как было показано ранее, в последнее время появился ряд работ с использованием МПЭ для изучения демпфирующих свойств сплавов [140-143]. В каждой из этих работ подход к решению проблемы связан с использованием

различных методов математического планирования эксперимента. Взаимодействие математической теории эксперимента с физическим экспериментом нельзя рассматривать как простое явление. Отсюда должна быть четкая постановка задачи - это построение логической модели изучаемого процесса, которая включает цель исследования, выдвижение гипотезы (или нескольких гипотез), подлежащей проверке. После четко поставленной задачи эксперимента, необходимо выбрать стратегию исследования. Так как в нашем случае целью исследования был поиск экстремума поверхности отклика, то использовали метод крутого восхождения Бокса-Уилсона [139]. Однако, в работе возникла необходимость использовать методику оценки отклонений величин фактических уровней от запланированных, так как этот вопрос в литературе практически не нашел отражения. В качестве параметра оптимизации был выбран уровень звукового давления. Исследовалась зависимость звукового давления от семи факторов. Наименования, размерности и условные обозначения факторов и параметры оптимизации приведены в таблице 10.

Таблица 10 - Факторы и параметр оптимизации эксперимента

Переменный фактор			Параметр		
Наименование	Размерность	Условн. обозн.	Наименование	Размерность	Условн. обозн.
Фиктивный фактор	-	X ₁	УЗД	дБА	У
C	%	X ₂			
Ni	%	X ₃			
B	%	X ₄			
V	%	X ₅			
Ce	%	X ₆			
Толщина НСП	мкм	X ₇			
Термообработка	-	X ₈			

Эксперимент производился по следующему плану. На первом этапе была выполнена реплика порядка 1/16 полного факторного 2 - эксперимента (8 опытов). В таблице 11 приведены запланированные и фактические переменные факторы и параметр оптимизации.

По результатам опытов вычислены оценки $\hat{\epsilon}_i = 0,1 - 7, 7$ коэффициентов линейной модели:

$$Y = \sum_{i=0}^7 \tilde{\epsilon}_i \cdot x_i \quad (13)$$

С помощью этих оценок определен следующий шаг в направлении градиента функции (14) и установлены начальные уровни и интервалы варьирования факторов x_1, \dots, x_7 для второго этапа. Процедура эксперимента последующих этапов идентична процедуре первого этапа.

Практически оказалось достаточным трех этапов для выхода в область оптимального значения факторов. Однако при выплавке сплавов возникла ситуация, когда реальные уровни факторов не совпали с планируемыми значениями уровней. В нашем случае это происходило из-за того, что нельзя было изготовить сплавы, у которых значения параметров были бы в точности равны планируемому уровням (таблица 11).

Таблица 11 - Планируемые и фактические уровни факторов на первом этапе планирования эксперимента

Номер опыта	Переменные факторы							Параметр оптимизации УЗ (уровень звука, ДВА)
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	
	Содержание элементов, %					Толщина НС, мкм	Состояние материала	
С	Ni	В	V	Се				
1	<u>0,40</u>	<u>3,5</u>	<u>0,005</u>	<u>0,32</u>	<u>0,09</u>	<u>50</u>	<u>1</u>	62
	0,42	3,4	0,004	0,31	0,08	50	1	
2	<u>0,20</u>	<u>3,5</u>	<u>0,005</u>	<u>0,25</u>	<u>0,01</u>	<u>50</u>	<u>0</u>	56
	0,20	3,3	0,006	0,21	0,01	50	0	
3	<u>0,40</u>	<u>3,5</u>	<u>0,001</u>	<u>0,25</u>	<u>0,09</u>	<u>20</u>	<u>0</u>	67
	0,41	3,3	0,002	0,21	0,08	20	0	
4	<u>0,20</u>	<u>3,5</u>	<u>0,001</u>	<u>0,32</u>	<u>0,01</u>	<u>20</u>	<u>1</u>	67
	0,20	3,2	0,002	0,31	0,01	21	1	
5	<u>0,41</u>	<u>3,5</u>	<u>0,005</u>	<u>0,25</u>	<u>0,01</u>	<u>20</u>	<u>0</u>	64
	0,43	3,4	0,004	0,35	0,02	21	0	
6	<u>0,40</u>	<u>3,5</u>	<u>0,005</u>	<u>0,25</u>	<u>0,09</u>	<u>20</u>	<u>1</u>	63
	0,30	3,4	0,003	0,22	0,09	20	1	
7	<u>0,40</u>	<u>3,5</u>	<u>0,001</u>	<u>0,25</u>	<u>0,01</u>	<u>20</u>	<u>1</u>	60
	0,41	3,3	0,002	0,26	0,01	21	1	
8	<u>0,40</u>	<u>3,5</u>	<u>0,001</u>	<u>0,32</u>	<u>0,09</u>	<u>50</u>	<u>0</u>	58
	0,28	3,3	0,001	0,33	0,09	50	0	

Примечание - числитель - планируемые переменные факторы, знаменатель - фактические переменные факторы

3.3 Учет погрешности при выплавке стали

Была предпринята попытка при выплавке добиться точного запланированного состава стали, однако этого не удалось сделать. Заметим, что при экспериментировании такая ситуация возникает всякий раз, когда технологически значение факторов трудно удержать на заданных уровнях. Погрешности, возникающие из-за несоответствия планируемых и фактических значений уровней, могут быть велики настолько, что требуется внесение поправок в результаты обработки эксперимента. В большей части литературы по МПЭ не приводятся способы учета этих погрешностей, а имеющиеся в ряде работ рекомендации носят весьма приближенный характер. Поэтому прежде чем определить направление движения по градиенту и рассчитать интервалы варьирования легирующих элементов для второй матрицы планирования вычислили погрешности и внесли коррективы. Порядок вычисления погрешностей был принят следующий. Пусть

$$X = \begin{pmatrix} x_{10} & x_{11} \dots x_{1m} \\ x_{n0} & x_{n1} \dots x_{nm} \end{pmatrix}$$

матрица планируемых уровней факторов в эксперименте, $\tilde{B}^T = (\tilde{b}_0, \tilde{b}_1, \dots, \tilde{b}_m)$ – вектор оценок коэффициентов модели и $Y^T = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ – вектор наблюдаемых значений отклика. (Здесь и далее символ "Т" указывает операцию транспонирования матрицы). Оценки B по методу наименьших квадратов определяли решением системы нормальных уравнений

$$X^T = X\tilde{B} = X^T Y \quad (14)$$

Для ортогональных планов

$$X^T X = \frac{1}{n} E \quad (15)$$

(E - единичная матрица) и поэтому

$$\tilde{B} = \frac{1}{n} X^T Y \quad (16)$$

Это соотношение служит расчетной формулой при вычислении оценок по результатам эксперимента.

Пусть X^* - матрица фактических уровней. Если X^* не является ортогональной матрицей, то равенство 15 не выполняется и, следовательно, нарушается равенство в формуле 16.

Обозначим ΔX матрицу нормированных отклонений фактических уровней от планируемых

$$\Delta X = X^* - X \quad (16)$$

Когда ΔX существенно отличается от нуля, для получения оценок \tilde{B} уже требуется решить систему

$$(X + \Delta X)^T (X + \Delta X) \tilde{B} = (X + \Delta X)^T Y \quad (17)$$

что в вычислительном отношении составляет гораздо более трудоемкую задачу, чем вычисление по формуле 15. Однако возможен более простой способ учета отклонений ΔX . Причем в качестве нулевого приближения оценки рассчитанные по формуле

$$\tilde{B}_0 = \frac{1}{n} X^T Y, \quad (18)$$

и построим итерационный процесс для решения системы 17 с этим начальным приближением. Применяя метод итерации [129], можем записать

$$\tilde{B}_j = [E - (x - \Delta x)^T (x + \Delta x)] \tilde{B}_{j-1} + (x + \Delta x)^T Y, \quad (19)$$

Выполнив преобразование с учетом формул (3,5,7), получим:

$$\tilde{B}_j = \tilde{B}_0 + \Delta \tilde{B}_j, \quad j = 1, 2, \dots$$

$$\Delta \tilde{B}_1 = -\frac{1}{n} F^* \tilde{B}_0 \quad (20)$$

$$\Delta \tilde{B}_j = \Delta \tilde{B}_1 - \frac{1}{n} (F^* + F^T) \Delta \tilde{B}_{j-1}, \quad j = 2, 3, \dots$$

Здесь обозначено:

$$F = X^T \Delta x, \quad F^* = (X^*)^T \Delta x \quad (21)$$

После каждого шага $j = 1, 2, \dots$ Остаточная средняя погрешность коэффициента $\tilde{\epsilon}_0, \tilde{\epsilon}_1, \dots, \tilde{\epsilon}_m$ не превышает величины

$$S_j^2 \leq \sigma \sum_{i=0}^m \Delta \tilde{\epsilon}_{ij}^2 \quad (22)$$

$\Delta \tilde{\epsilon}_{0j}, \Delta \tilde{\epsilon}_{1j}, \dots, \Delta \tilde{\epsilon}_{mj}$ – величины поправок на шаге j и ρ – величина, зависящая только от погрешностей уровней факторов.

$$\sigma = \frac{1}{m+1} \sum_{j=0}^m \sum_{i=1}^n \Delta x_{ij}^2 \quad (23)$$

Если, как обычно, положить, что вычислительная погрешность должна быть на порядок меньше погрешности, обусловленной случайными ошибками измерения откликов, то из формулы 22 получим, что процесс уточнения коэффициентов следует прекратить, когда на очередном шаге поправки удовлетворяют неравенству

$$\sum \Delta \tilde{\epsilon}_i^2 \leq 0,1 \frac{S_y^2}{n\sigma} \quad (24)$$

где S_y^2 – дисперсия ошибок измерения откликов.

Число требуемых итераций тем меньше, чем ближе к нулю ΔX . Для уменьшения ΔX следует перенормировать факторы, приняв в качестве новых исправленных верхних и нижних уровней средние значения соответствующих фактических уровней. При этом величина S достигает минимума.

Порядок реализации опыта приняли следующим:

1. Составляем план и устанавливаем планируемые уровни факторов на первом этапе эксперимента (таблица 12).

Таблица 12 - План эксперимента на первом этапе

Номер опыта	Переменные факторы							
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1

Исходя из литературных данных [130], были заданы верхний и нижний уровни переменных факторов и интервал варьирования (таблица 13).

Таблица 13 - Планируемые уровни факторов на первом этапе эксперимента

Фактор	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
Верхний уровень 1	0,40	3,5	0,005	0,32	0,09	50	1
Нижний уровень -I	0,20	3,5	0,001	0,25	0,01	20	0
Интервал варьирования	0,10	0,10	0,30	0,03	0,01	10	-

2. Выполняем эксперимент. Фактические уровни X^x , $i = 1, \dots, 7$ и их отклонения

$$\delta x_i = x_i^* - x_i, \quad (25)$$

от планируемых приведены в таблице 14.

Таблица 14 - Фактические уровни переменных факторов и отклонения от планируемых величин факторов

№ опыта	1		2		3		4		5		6		7	
	X_1	X_1^*	X_2	X_2^*	X_3	X_3^*	X_4	X_4^*	X_5	X_5^*	X_6	X_6^*	X_7	X_7^*
1	0,42	-0,02	3,4	0,1	0,004	0,001	0,31	0,01	0,08	0,01	50	0	1	0
2	0,20	0	3,3	0,2	0,006	-0,001	0,21	0,04	0,01	0	50	0	0	0
3	0,41	-0,01	3,3	0,2	0,002	-0,001	0,21	0,04	0,08	0,01	20	0	0	0
4	0,20	0	3,2	0,3	0,002	-0,001	0,31	0,01	0,01	0	21	-1	1	0
5	0,43	-0,02	3,4	0,1	0,004	0,001	0,35	0,10	0,02	-0,01	21	-1	0	0
6	0,30	0,10	3,4	0,1	0,003	0,002	0,22	0,03	0,09	0	20	0	1	0
7	0,41	-0,01	3,3	0,2	0,002	-0,001	0,26	0,01	0,01	0	21	-1	1	0
8	0,28	0,12	3,3	0,2	0,001	0	0,33	0,01	0,09	0	50	0	0	0

3. Определяем исправленные верхние и нижние уровни факторов как средние значения соответствующих фактических уровней. Например, для фактора X_1 имеем

$$X_{B1} = (0,42 + 0,41 + 0,43 + 0,41) / 4 = 0,4175$$

$$X_{H1} = (0,20 + 0,20 + 0,30 + 0,28) / 4 = 0,245$$

Рассчитанные таким образом уровни приведены в таблице 15.

Таблица 15 - Исправленные по результатам эксперимента уровни факторов для первой матрицы планирования экспериментов

Фактор	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇
Верхний уровень	1	0,4175	3,35	0,003	0,2825	0,0475	28	0,5
Нижний уровень	-1	0,245	3,30	0,003	0,2675	0,050	35	0,5

Определяем нормированные значения отклонений фактических уровней от исправленных. Имеем:

$$X_i^{(n)} = \frac{2x_i - (x_{ei} + x_{ni})}{x_{ei} - x_{ni}} \quad (26)$$

откуда

$$\Delta X_i = \frac{2(x_i^* - x_i)}{x_{ei} - x_{ni}} \quad (27)$$

По значениям фактических уровней рассчитываем новые верхние и нижние уровни факторов.

В формулах 26, 27 x_{ei} , x_{ni} , x_i , x_i^* обозначают соответственно значения планируемого нижнего, верхнего и фактического уровня фактора x_i в натуральном масштабе, $X_i^{(n)}$ - нормированное значение уровня и Δx_i - нормированное отклонение фактического уровня от планируемого.

Необходимые для окончательного расчета на первом этапе эксперимента данные представлены в таблице 16.

Таблица 16- Результаты опытов на первом этапе эксперимента

№ опыта	Фиктивный фактор			Переменные факторы								
	0			1			2			3		
	X ₀	X ₀ [*]	ΔX ₀	X ₁	X ₁ [*]	ΔX ₁	X ₂	X ₂ [*]	ΔX ₂	X ₃	X ₃ [*]	ΔX ₃
1	1	1	0	1	0,911	-0,089	1	1,035	0,035	1	1,078	0,078
2	1	1	0	1	1,070	0,070	-1	-0,854	0,146	1	1,012	0,012
3	1	1	0	-1	-1,045	-0,045	1	1,022	0,022	-1	-0,976	-0,024
4	1	1	0	-1	-0,890	0,110	-1	-0,910	0,090	-1	-0,915	-0,085
5	1	1	0	1	1,014	0,014	1	0,850	-0,150	-1	-0,930	0,070
6	1	1	0	1	0,837	-0,163	-1	-1,050	-0,050	1	0,955	-0,045
7	1	1	0	-1	-0,905	0,095	1	0,830	-0,170	-1	-1,061	-0,061
8	8	8	0	-1	-0,992	-0,008	-1	-0,923	0,077	1	0,837	-0,163

Продолжение таблицы 16

№ опыта	Переменные факторы												Среднее значение параметра оптимизации (y_i)	Дисперсия (S_{yi}^2)
	4			5			6			7				
	X_4	X_4^*	ΔX_4	X_5	X_5^*	ΔX_5	X_6	X_6^*	ΔX_6	X_7	X_7^*	ΔX_7		
1	1	1,180	0,180	1	1	0	1	1	0	1	1	0	62	1,035
2	-1	-1,056	-0,056	-1	-1	0	1	1	0	-1	-1	0	56	1,122
3	-1	-0,908	0,092	1	1	0	-1	-1	0	-1	-1	0	67	0,540
4	1	1,042	0,042	-1	-1	0	-1	-1	0	1	1	0	67	0,578
5	1	1,198	0,198	-1	-1	0	-1	-1	0	-1	-1	0	64	0,387
6	-1	-1,101	-0,101	1	1	0	-1	-1	0	1	1	0	63	0,410
7	1	-1,077	-0,077	-1	-1	0	1	1	0	1	1	0	60	1,256
8	-1	0,722	-0,278	1	1	0	1	1	0	-1	-1	0	58	1,541

В столбцах этой таблицы указаны планируемые уровни x_i , $i = 0, \dots, 7$, нормированные с учетом направлений фактические уровни x_i^* , нормированные величины Δx_i отклонения фактических уровней от планируемых, рассчитанные по формуле 27. Для контроля правильности вычислений следует учитывать тот факт, что сумма чисел в столбцах должна быть равна нулю. Для повышения точности в каждом опыте проводилось 5 независимых измерений уровня звукового давления. В таблице 16 указаны средние величины этих 5 измерений, по которым рассчитывались выборочные среднеквадратичные отклонения результатов измерений, рассчитанных по формуле:

$$S_{yi} = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{j=1}^5 (y_{ij} - y_i)^2} \quad (28)$$

$$y_i = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 y_{ij} \quad \begin{matrix} i=1,2,\dots,8 \\ j=1,2,\dots,5 \end{matrix}$$

Для того, чтобы судить об однородности измерений уровня звука в серии опытов проверяем по М-критерию Бартагетта гипотезу равенства дисперсий $S_{yi}^2 = S_y^2$ и имеем

$$M = 32 \ln \left[\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 S_{yi}^2 \right] - 4 \sum_{i=1}^8 \ln S_{yi}^2 = 11,53. \quad (29)$$

По таблицам [131,132] определяем величину m_α . Так как $M < m_\alpha$, то с уровня значимости 5% различия выборочных дисперсий следует признать не-

значительным и считать измерения уровня звукового давления во всех опытах равноточными с дисперсией:

$$S_y^2 = \sum_{i=1}^8 \frac{S_{y_i}^2}{8} = 2,12 \quad (30)$$

Следовательно, оценка для дисперсии, указанной в таблице 15 средних величин уровня звука равна:

$$S^2 = \frac{S_y^2}{S} = 0,365$$

Далее рассчитали оценки коэффициентов модели. Необходимые для расчета величины берем из таблицы 16.

Выполнив расчеты получим:

$$\begin{aligned} \tilde{B}_0^T &= (62,3 \quad 1,742 \quad -0,108 \quad 0,54 \quad 0,47 \quad 0,285 \quad -2,535 \quad 1,4), \\ \Delta \tilde{B}_i^T &= (0 \quad 0,154 \quad 0,108 \quad 0,056 \quad -0,135 \quad 0,044 \quad 0,189 \quad 0,08) \end{aligned}$$

Проверяем по формуле 24, требуется ли дальнейшее уточнение $\Delta \tilde{B}_2$. Так как $0,156 < 0,165$ уточнения не требуется, тогда принимаем:

$$\tilde{B} = \tilde{B}_0 + \Delta \tilde{B}_1 \quad (31)$$

Необходимо отметить, что изложенный метод учета отклонений фактических уровней от планируемых обеспечивает требуемую точность оценок коэффициентов уже при первом или в крайнем случае втором приближении. Это хорошо видно на нашем примере. Сравнительно большие величины отклонения фактических уравней от заданных были учтены уже при первом приближении. Окончательное уравнение регрессии первого этапа планирования эксперимента имело вид:

$$y = 62,30X_0 - 2,02X_1 - 0,841X_2 + 0,755X_3 + 0,451X_4 + 0,321X_5 + 0,888X_6 + 1,112X_7.$$

Как видно из таблицы 17 на первом этапе МПЭ, когда варьировалось содержание углерода от 0,2% до 0,4%, оценка коэффициента, характеризующая влияние этого элемента составила 2,02, что в 2 с лишним раза выше, чем влияние других легирующих элементов.

Таблица 17 - Результаты опытов по трем этапам эксперимента

		№ опыта										
		1	2	3	4	5	6	7	8	Bi		
Фиктивный фактор	X01	1	1	1	1	1	1	1	1	62,30		
	X02	1	1	1	1	1	1	1	1	60,4		
	X03	1	1	1	1	1	1	1	1	61,5		
Переменные факторы	Содержание элементов, %	C	X11	0,42	0,20	0,41	0,20	0,43	0,3	0,41	0,28	1,742
			X12	0,43	0,23	0,45	0,22	0,39	0,2	0,45	0,19	0,048
			X13	0,353	0,18	0,27	0,34	-	-	-	-	-0,498
		Ni	X21	3,4	3,3	3,3	3,2	0,4	0,4	0,3	0,3	-1,108
			X22	2,8	2,7	3,1	2,5	1,1	1,9	2,2	2,5	0,857
			X23	3,0	1,4	2,1	0,5	-	-	-	-	-0,530
		B	X31	0,004	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54
			X32	1,5	1,10	1,10	1,07	1,52	1,54	1,12	1,12	-0,163
			X33	1,42	1,37	1,15	1,22	-	-	-	-	-0,625
	V	X41	0,31	0,21	0,21	0,31	0,35	0,22	0,26	0,35	0,47	
		X42	0,18	0,32	0,25	0,17	0,21	0,18	0,25	0,28	0,054	
		X43	0,34	0,25	0,18	0,21	-	-	-	-	-0,035	
	Ce	X51	0,04	0,01	0,04	0,01	0,09	0,01	0,01	0,09	0,285	
		X52	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	-	
		X53	0,04	0,03	0,03	0,05	-	-	-	-	0,180	
	Толщина НПС, мкм	X61	50	50	20	20	20	20	50	50	-2,535	
		X62	50	45	40	50	50	50	30	50	0,888	
		X63	50	50	50	50	50	50	50	50	-	
	Состояние материала	X71	1	0	0	1	0	1	1	0	1,4	
		X72	1	0	0	1	0	1	1		0,275	
		X73	1	1	1	1	-	-	-	-	-	
	Уровень звука, дБА	Y1	62	56	67	67	64	63	60	58		
		Y2	61	52	60	61	60	60	58	60		
		Y3	60	54	60	59	-	-	-	-	-	

Выявлено, что увеличение содержания углерода способствует росту уровня звука сплавов, что и было подтверждено экспериментальными данными. Следующим по значимости коэффициентом регрессии является содержание кремния. Оценка коэффициента этого момента составляет - 0,841, показывающая, что рост содержания никеля от 0,5% до 3,5% способствует повышению демпфирующих свойств сплавов.

Влияние содержания углерода (1,742%) существенно на акустические свойства сталей. Никель с ростом от 0,5% до 3,5% увеличивает уровень звукового давления, при соответствующих значениях бора, церия, ванадия и

углерода. Ранее было установлено эффективное влияние никеля на диссипацию звуковой энергии (работы Е.Б. Утепова, В.А. Працюка и др.), однако химический состав был иной. Установленная зависимость никеля и звукоизлучения позволяет получить полезную информацию – происходит экономия дорогостоящего легирующего элемента.

Влияние ванадия (от 0,1 до 0,3%) оценивается коэффициентом (0,47%). Это означает, что увеличение ванадия в указанных пределах обеспечивает рост диссипации.

Бор (0,54%) существенно обеспечивает рост демпфирования по сравнению с ванадием, но значительно ниже, чем содержание углерода (1,742%).

Содержание церия оценивается коэффициентом 0,285, что ниже, чем влияние других легирующих элементов. Это также положительный факт в исследовании при легировании дорогостоящими элементами.

Влияние наноструктурного покрытия на звукоизлучение оценивается коэффициентом 1,95, что выше чем даже влияние содержания углерода. Наноструктурное покрытие эффективно снижает уровень звука за счет послынного состояния.

Термообработка эффективно влияет на диссипативные свойства сталей (коэффициента $V_i=1,4$), отжиг увеличивает размеры зерна, обеспечивает рост демпфирования.

В связи с тем, что нижеприведенный расчет параметров выбранного метода математического планирования эксперимента для каждого этапа идентичен, был применен пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений MatLab. Прежде всего произвели расчет оценок коэффициентов $\tilde{\theta}_i$,

$$\tilde{\theta}_i = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 x_i * y_i \quad (32)$$

Далее находим сумму квадратов откликов

$$\sum_{i=1}^8 y_i^2 \quad (33)$$

и выполняем проверку

$$\sum y_i^2 - 8(\tilde{\theta}_0^2 + \tilde{\theta}_1^2 + \tilde{\theta}_2^2 + \tilde{\theta}_3^2 + \tilde{\theta}_4^2 + \tilde{\theta}_5^2 + \tilde{\theta}_6^2 + \tilde{\theta}_7^2) = 0 \quad (34)$$

Поиск направления наибольшего снижения отклика в данной точке находим по формуле:

$$\cos \beta_k = \frac{\tilde{\theta}_k}{\sqrt{\theta_1^2 + \dots + \tilde{\theta}_7^2}}, \quad (35)$$

отсюда оценка дисперсии изменения отклика:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=0}^N y_i^2 - N \sum_{j=0}^k \tilde{\theta}_j^2}{N - k - 1}, \quad \text{при } N=1, k=7,$$

где N – число опытов,

k – число факторов эксперимента.

Чтобы движение по градиенту было эффективным должно выполняться неравенство:

$$\tilde{\theta}_1^2 + \dots + \tilde{\theta}_7^2 > \frac{\gamma_\alpha^2 S^2}{\nu}, \quad (36)$$

где ν – число степеней свободы; в нашем случае при 5 измерениях каждого образца, 8-ми опытах, степень свободы будет равна $5 \times 8 - 8 = 32$;

γ_α – процентная точка распределения Стьюдента, для нашего случая $\gamma_\alpha = 1,370$.

В нашем случае получили $27,434 > 0,069$, следовательно, движение по градиенту эффективно.

Определяем величину радиуса ρ движения по градиенту:

$$\sigma = \frac{\sqrt{k}}{2}, \quad (37)$$

Значения нормированных координат точки $X^{(1)}$ – центра эксперимента на новом этапе определяем

$$x_j^{(1)} = \frac{\sigma}{\sqrt{\tilde{\theta}_1^2 + \dots + \tilde{\theta}_7^2}} * \tilde{\theta}_j, \quad j=1, \dots, 7. \quad (38)$$

По формулам интервалы варьирования, шаг для второй матрицы планирования приведены в таблице 18. По данным таблицы был запланирован химический состав 8 сплавов 2-го этапа МПЭ, далее был произведен весь комплекс работ и расчетов, как и для первой матрицы МПЭ.

Таблица 18 - Интервалы варьирования основных переменных факторов для второй матрицы планирования

Интервалы варьирования	Переменные факторы				
	Содержание элементов, %				
	X1	X2	X3	X4	X5
	C	Ni	B	V	Se
Верхний предел	0,40	3,5	0,005	0,32	0,09
Нижний предел	0,20	0,5	0,001	0,25	0,01
Среднее значение	0,30	2,0	0,003	0,285	0,05
Шаг	0,10	1,5	0,002	0,035	0,08

После окончания второго этапа МПЭ провели подробный расчет для построения плана третьей матрицы МПЭ. Значение интервалов варьирования для третьей матрицы планирования приведены в таблице 17.

Процедура обработки данных на третьем этапе точно такая же, как процедура обработки на первом этапе. Данные по трем этапам эксперимента приведены в таблице 17. Значения коэффициентов регрессии для трех этапов планирования эксперимента представлены в таблице 19.

Таблица 19 - Фактические значения оценок коэффициентов регрессии трех этапов математического планирования эксперимента

Номер опыта	Оценки коэффициентов							
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7
1	62,30	2,02	0,841	0,755	0,451	0,321	0,888	1,112
2	60	0,012	0,113	0,055	0,212	0,012	0,551	0,211
3	61	-0,121	-0,251	-0,478	-	-	-	-

На третьем этапе МПЭ влияние легирующих элементов не отличалось друг от друга. Оценка коэффициента для C, Ni, B, V, Se изменялась от 0,035 до 0,498. На этом этапе никель был включен в состав влияющих факторов. Кроме запланированных матрицей МПЭ сплавов были выплавлены некоторые дополнительные сплавы, позволившие оценить влияние легирующих элементов на уровень звука исследуемых сплавов. Так, увеличение содержания ванадия до 0,25% не повлияло на демпфирующие свойства сплавов с содержанием углерода - 0,2% - 0,4%; бора - 0,001% - 0,005%; никеля - 0,5% - 3,5%, а остальное - железо. Увеличение содержания бора до 0,005% также не сыграло решающей роли в изменении уровня звука и уровня звукового давления сплавов с содержанием углерода 0,2%; кремния - 0,5% - 3,5%; ванадия - 0,21% - 0,25%.

Сплавы четвертой матрицы были выплавлены для проверки правильности движения по градиенту и выбранного метода планирования эксперимента в целом. Если сплавы первых трех этапов были выплавлены с целью снижения уровня звука, то сплавы 4-го этапа представляли область, предположительно характеризующуюся повышенным звукоизлучением. Таким образом, экспериментально была подтверждена правомерность движения по градиенту: наибольшим звукоизлучением обладают сплавы 4 этапа, далее следует сплавы 1 этапа, 2 этапа и 3 этапа.

В результате исследования были выявлены сплавы с повышенными демпфирующими свойствами, состав и характеристика которых приведены в таблице 20.

Таблица 20 - Химический состав и режимы термической обработки сплавов, обладающих повышенными демпфирующими свойствами

Номер сплава	Содержание элементов, %					Режим термической обработки	Уровень звука, дБА
	C	B	V	Ni	Ce		
1М	0,4	0,005	0,25	3,5	0,09	Нормализация $A_{c3}+50^{\circ}C$, воздух	62
2М	0,2	0,005	0,25	0,5	0,01	Нормализация $A_{c3}+50^{\circ}C$, воздух	65
3М	0,4	0,005	0,25	0,5	0,09	Нормализация $A_{c3}+50^{\circ}C$, воздух	53
4М	0,2	0,005	0,25	3,5	0,01	Отжиг $A_{c3}+50^{\circ}C$, 1 час, печь	56
5М	0,4	0,005	0,21	3,5	0,01	Отжиг $A_{c3}+50^{\circ}C$, 1 час, печь	58
6М	0,2	0,005	0,21	0,5	0,05	Отжиг $A_{c3}+50^{\circ}C$, 1 час, печь	64
7М	0,4	0,001	0,21	0,5	0,01	Закалка $A_{c3}+50^{\circ}C$, 0,5 час, вода, отпуск 200° , 1 ч.	61
8М	0,2	0,001	0,21	3,5	0,04	Закалка $A_{c3}+50^{\circ}C$, 0,5 час, вода, отпуск 200° , 1 ч.	60

Таким образом, примененный метод планирования эксперимента позволил:

- повысить эффективность исследования, т.е. параметр оптимизации определен со значительно меньшей ошибкой, чем при традиционных методах исследования;

- резко сократить экспериментальную часть работы;

- наметить стратегию исследования, основанную на последовательности логически осмысленных четырех этапах эксперимента;

- обработать результаты наблюдений приемами математической статистики, позволяющими оценить вклад каждого фактора в параметр оптимизации.

В работе использован способ учета погрешностей, возникших из-за не-

соответствия планируемых и фактических значений факторов эксперимента.

Таким образом, проведена оценка акустических характеристик большой группы вибродемпфирующих сталей, легированных С, Ni, В, V, Се. Показано, что варьирование химическим составом в незначительном интервале содержания элементов позволяет улучшить демпфирующие свойства сталей на 5-7%. Кроме того, значительное влияние оказывает термическая обработка.

Выводы по третьему разделу

1 Использован метод МПЭ Бокса-Уилсона, позволивший резко сократить объем экспериментальной работы и построить логическую схему проведения эксперимента по выплавке демпфирующих сплавов.

2 Практически оказалось достаточно трех этапов экспериментальной работы (24 опытных сплавов) для выхода в область оптимального значения факторов.

3 Исследовано влияние церия на демпфирующие свойства сталей (влияние церия на демпфирующие свойства сопоставимо с влиянием ванадия).

4 Получено уравнение регрессии, с помощью коэффициентов которой оценены семь переменных факторов (содержание углерода, никеля, бора, ванадия, церия; величина наноструктурного покрытия, вида термообработки), влияющих на уровень звука при соударении: $y=62,30X_0-2,02X_1-0,841X_2+0,755X_3+0,451X_4+0,321X_5+0,888X_6+1,112X_7$. При этом, максимальное влияние на уровень звука оказывает содержание углерода (-2,02), вид термообработки (1,112), величина наноструктурного покрытия (0,888), содержание никеля (-0,841).

4 ДЕМПФИРУЮЩИЕ СПЛАВЫ, СНИЖАЮЩИЕ ШУМ И ВИБРАЦИЮ

В настоящей работе была поставлена задача оценить акустические, вибрационные и демпфирующие характеристики сталей, легированных никелем, ванадием и бором, 20ХНР, 30ХН2МФА и 38ХН3МФА, из которых изготавливают детали, работающие на трение и при ударных нагрузках (червяки, кулаки шарнира, зубчатые колеса). Помимо этого была поставлена задача разработать новые марки демпфирующих сталей и также исследовать их акустические и вибрационные свойства.

Все образцы легированных сталей изготовлены в форме пластин, размером 50×50×5 мм.

4.1 Исследование вибрационных свойств легированных сталей

Вибрационные характеристики исследованных легированных сталей 20ХНР, 30ХН2МФА, 38ХН3МФА и 20ХНР(НС), и новых разработанных сталей 1М, 2М, 3М и 3М(НС), представлены в таблицах 21-22 и на рисунках 21-28.

Термическая обработка образцов - закалка в масле с последующим высоким отпуском.

В таблице 21 представлены вибрационные характеристики образцов из легированных сталей 20ХНР, 30ХН2МФА, 38ХН3МФА и 20ХНР(НС) после проведения эксперимента на установке (рисунок 10) на соударение с шароударниками диаметрами $d_1=9,5$ мм, $d_2=12,7$ мм, $d_3=15,2$ мм и $d_4=18,3$ мм.

Характер кривых уровней виброускорения (УВУ) имеет следующий вид:

- УВУ исследованных образцов изменяются в диапазоне 54-121 дБ;
- максимумы УВУ наблюдаются на частоте 31500 Гц;
- минимумы уровней виброускорений образцов характерны для частот 1000, 2000, 31500 Гц (54 дБ);
- максимальные значения УВУ сравниваемых образцов характерны при соударениях с шароударником диаметром $d_4=18,3$ мм;
- минимальные значения УВУ сравниваемых образцов характерны при соударениях с шароударником диаметром $d_1=9,5$ мм;
- максимумы УВУ по характеристике «Lin» у образцов 20ХНР, 30ХН2МФА, 38ХН3МФА наблюдаются при соударении шароударником диаметром $d_4=18,3$ мм (117-121 дБ).

Принцип амплитуднозависимого демпфирования виброускорения (АЗДВ) заключается в следующем. При соударении шара-ударника большей массы с образцом генерируется уровень виброускорения меньшего значения, чем при соударении шара-ударника меньшей массы. АЗДВ обнаружено в следующих случаях.

Таблица 21 - Вибрационные характеристики образцов стандартных сталей

Марка стали	Диаметр шароударника, мм	Уровни виброускорения, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц											ОУВУ, дБ
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	31500	
20ХНР	d ₁	85	103	88	68	66	67	64	66	63	70	74	111
	d ₂	99	110	99	85	70	64	60	59	58	55	54	116
	d ₃	90	112	88	78	68	66	65	63	80	82	88	117
	d ₄	87	100	85	73	63	60	59	88	90	87	95	119
30ХН2МФА	d ₁	86	110	83	72	69	67	66	68	65	69	67	113
	d ₂	85	111	78	79	70	68	65	62	66	68	69	115
	d ₃	79	110	83	78	67	68	66	67	73	69	66	116
	d ₄	80	116	88	72	68	70	68	66	80	83	82	118
38ХН3МФА	d ₁	82	112	80	70	68	64	63	65	66	72	73	114
	d ₂	80	113	83	79	71	65	64	63	65	71	75	117
	d ₃	77	117	81	76	65	67	66	65	66	70	72	120
	d ₄	69	118	85	68	66	72	71	76	84	85	92	121
20ХНР (НС)	d ₁	73	101	80	69	64	62	65	67	60	72	74	110
	d ₂	76	109	78	73	67	66	64	63	62	70	72	113
	d ₃	72	113	86	81	70	68	67	67	65	72	75	116
	d ₄	79	109	85	73	65	68	66	65	66	78	72	117

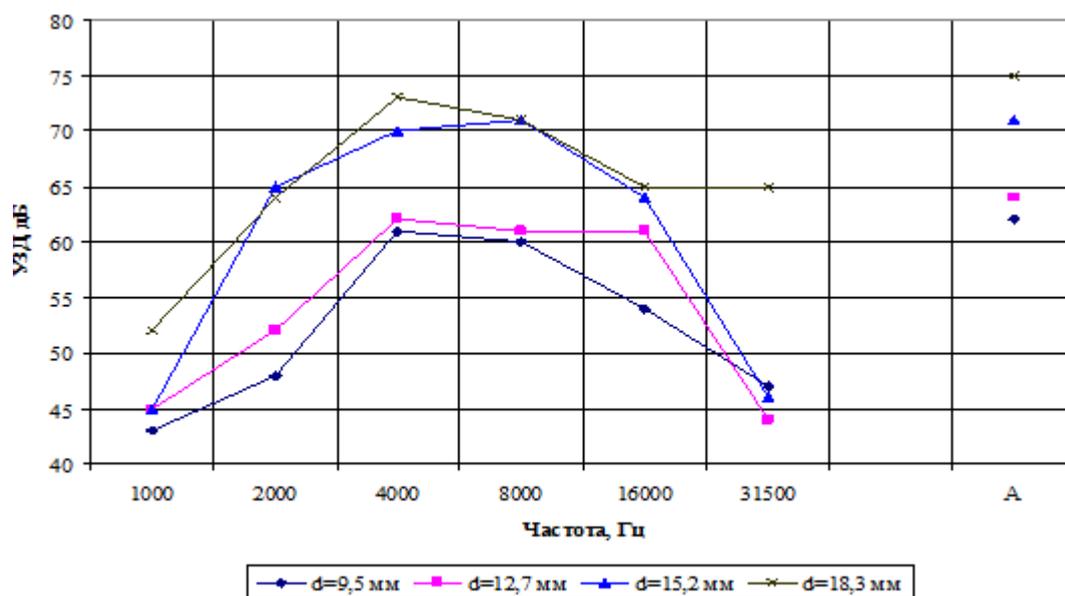


Рисунок 21 – Характеристики виброускорений стали 20ХНР при соударении

В соответствии с рисунком 21 на частоте 63 Гц при соударении образца 20ХНР с шароударником диаметра d₄=18,3мм, УВУ=100 дБ, а при соударении

образца 20ХНР с шаром-ударником диаметром $d_3=15,2$ мм УВУ=112 дБ. Эффект АЗДВ=12 дБ.

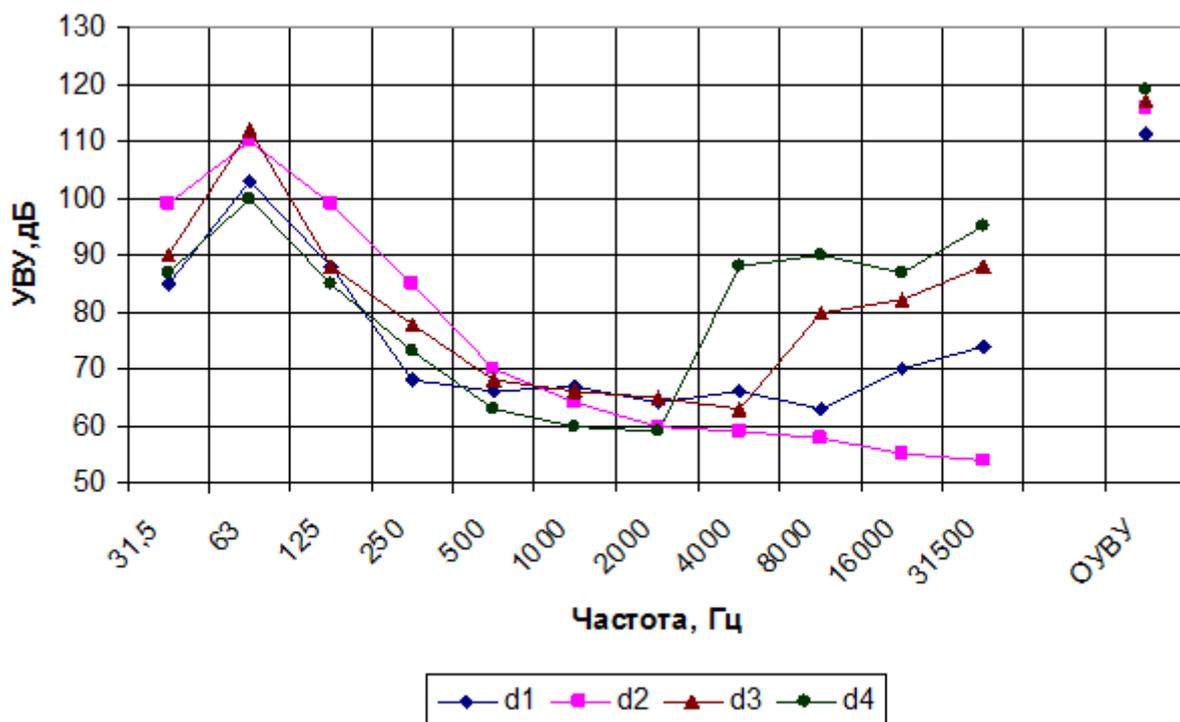


Рисунок 22 – Характеристики виброускорений стали 30ХН2МФА при соударении

В соответствии с рисунком 22 максимальный эффект АЗД обнаружен на частоте 125 Гц при соударении образца 30ХН2МФА с шаром-ударником диаметром 15,2 мм, УВУ=79 дБ, а при соударении этого же образца с шаром-ударником диаметром, равным 18,3 мм УВУ=80 дБ. Эффект АЗД=1 дБ.

На частоте 250 Гц при соударении образца 30ХН2МФА с шаром-ударником диаметром, равным 15,2 мм УВУ=78 дБ, а при соударении с шаром-ударником диаметром, равным 18,3 мм УВУ=72 дБ. Таким образом, мы видим, что меньший по массе шар-ударник $d_3=15,3$ мм генерирует УВУ повышенного значения, чем при соударении с шаром-ударником $d_4=18,3$ мм. Эффект АЗДВ составил 6 дБ.

В соответствии с рисунком 29 максимальный эффект АЗД обнаружен на частоте 250 Гц при соударении стали 38ХН3МФА с шаром-ударником, диаметр которого равен 12,7 мм УВУ=79 дБ, а при соударении образца стали 38ХН3МФА с шаром-ударником, диаметром d_3 УВУ=76 дБ, т.е. меньший по массе шар-ударник d_2 генерирует УВУ повышенного значения, чем при соударении с шаром-ударником диаметром d_3 . Эффект АЗДВ составил 3 дБ.

На частоте 125 Гц при соударении образца стали 38ХН3МФА с шаром-ударником диаметра d_2 , УВУ равен 83 дБ, а при соударении образца с шаром-ударником диаметром d_3 , УВУ=81 дБ. Эффект АЗДВ составляет 2 дБ.

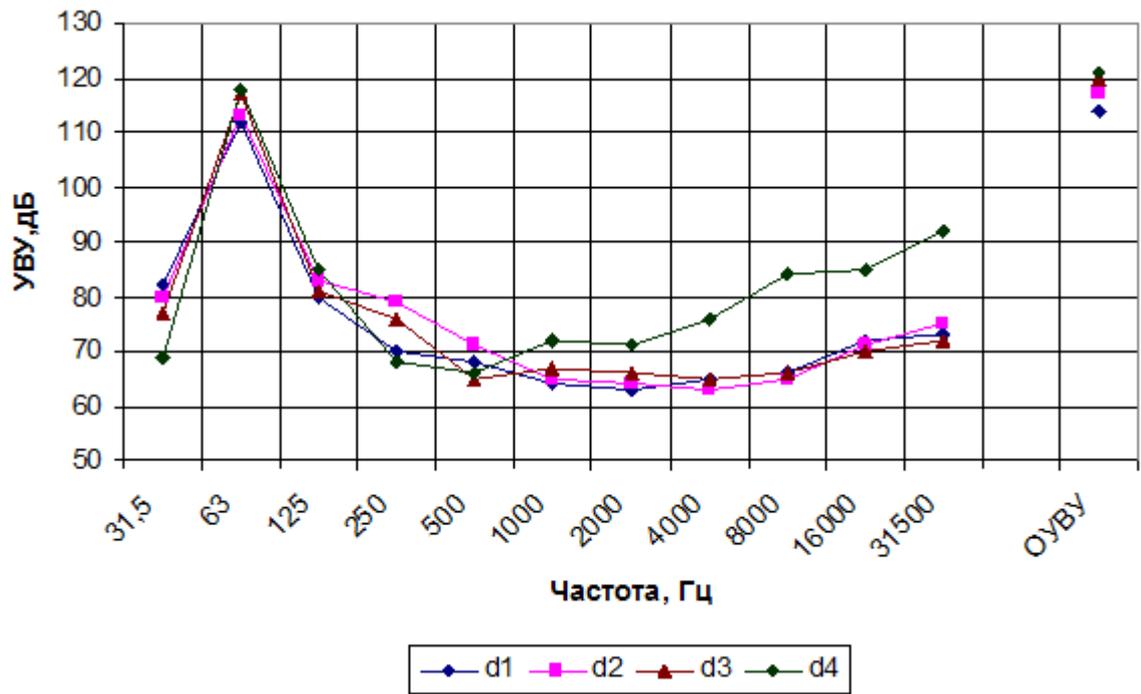


Рисунок 23 – Характеристики виброускорений стали 38ХН3МФА при соударении

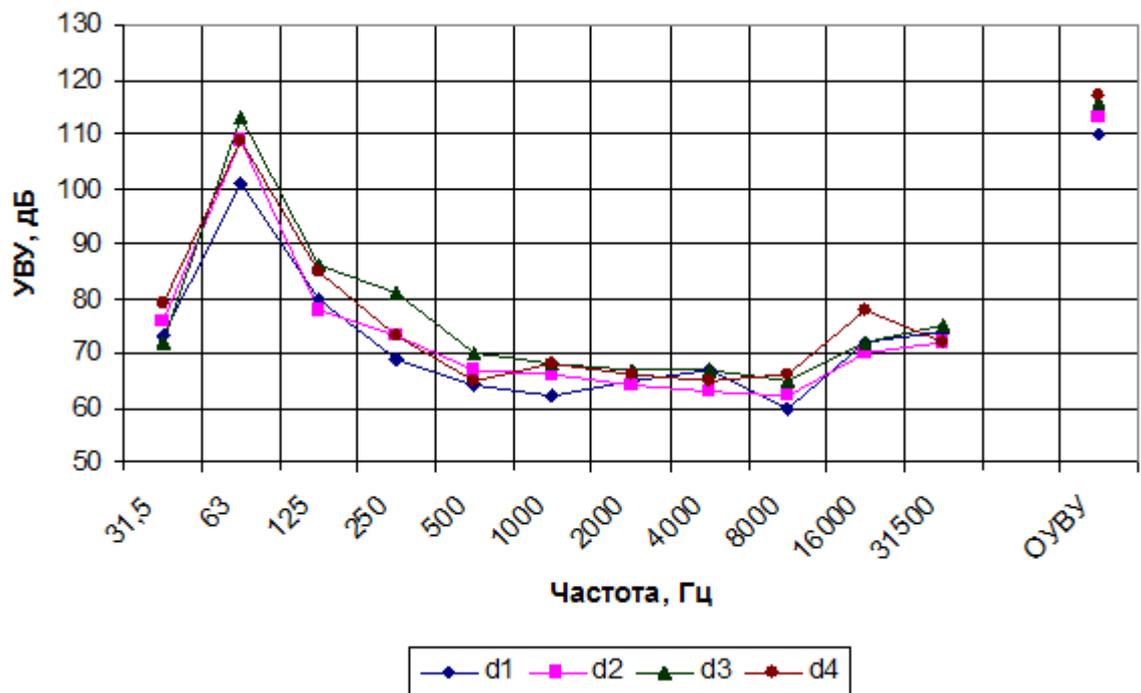


Рисунок 24 – Характеристики УВУ стали 20ХНР(НС) при соударении

В таблице 22 представлены вибрационные характеристики образцов новых выплавленных сплавов, легированных никелем, ванадием и бором - 1М, 2М, 3М и 3М(НС).

Таблица 22 – Вибрационные характеристики разработанных сталей 1М, 2М, 3М, 3М(НС).

Марка стали	Диаметр шара-ударника, мм	Уровни виброускорения, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц											ОУВУ, дБ
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	31500	
1М	d ₁	69	70	73	65	60	52	53	70	81	80	79	91
	d ₂	78	81	84	72	74	61	55	63	60	59	62	93
	d ₃	72	65	63	60	57	55	54	58	53	56	54	96
	d ₄	67	61	58	62	62	63	90	87	81	89	92	94
2М	d ₁	61	62	67	64	57	58	55	56	54	57	54	102
	d ₂	55	57	65	66	61	59	58	60	63	58	59	120
	d ₃	90	117	99	97	76	61	62	57	55	54	63	124
	d ₄	118	103	91	92	70	64	59	63	61	62	59	123
3М	d ₁	68	79	71	58	59	55	57	58	54	56	55	89
	d ₂	93	82	73	74	72	63	67	70	65	56	54	94
	d ₃	67	95	93	71	64	68	59	61	58	55	58	100
	d ₄	88	118	83	62	63	71	79	82	80	82	81	121
3М (НС)	d ₁	67	78	73	54	57	52	56	54	55	57	58	85
	d ₂	89	80	74	75	70	65	65	68	64	57	56	93
	d ₃	66	92	88	70	63	66	55	60	57	56	59	97
	d ₄	85	115	81	60	62	73	80	87	81	79	80	115

Характер кривых УВУ разработанных сплавов имеет следующий вид:

- УВУ исследованных образцов изменяются в диапазоне 52-124 дБ;
- максимумы УВУ наблюдаются на частотах 2000 Гц и 31500 Гц (90-92 дБ);
- минимумы УВУ образцов характерны для частот 1000 Гц, 2000 Гц (52-53 дБ);

- максимальные значения УВУ сравниваемых образцов характерны при соударениях с шаром-ударником диаметром d₄=18,3 мм;

- максимумы уровней виброускорения по характеристике «Lin» у образцов 1М, 2М, 3М и 3М(НС) наблюдаются при соударении с шарами-ударниками диаметрами d₃=15,2 мм и d₄=18,3 мм (121-124 дБ).

В соответствии с рисунком 25 максимальный эффект АЗД обнаружен на частоте 8000 Гц при соударении образца 1М с шаром-ударником диаметром d₁ УВУ равен 81 дБ, а при соударении образца 1М с шаром-ударником диаметром d₂, УВУ=60 дБ. Эффект АЗД составляет 21 дБ.

На частоте 125 Гц при соударении образца 1М с шаром-ударником диаметром d₄, УВУ=84 дБ, а при соударении образца с шаром-ударником диаметром d₂ УВУ=63 дБ. Эффект АЗД=21 дБ.

На частоте 31,5 Гц при соударении образца 1М с шаром-ударником диаметром d_2 , УВУ=78 дБ, а при соударении с шаром-ударником с d_3 УВУ=72 дБ. Эффект АЗДВ составляет 6 дБ.

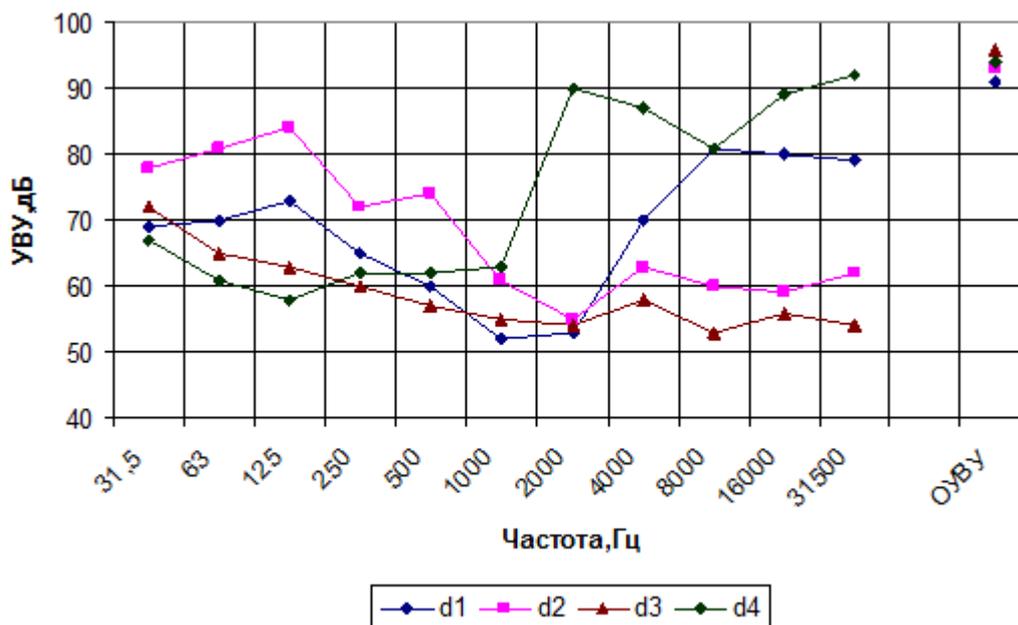


Рисунок 25 - Характеристики виброускорений образца 1М при соударении

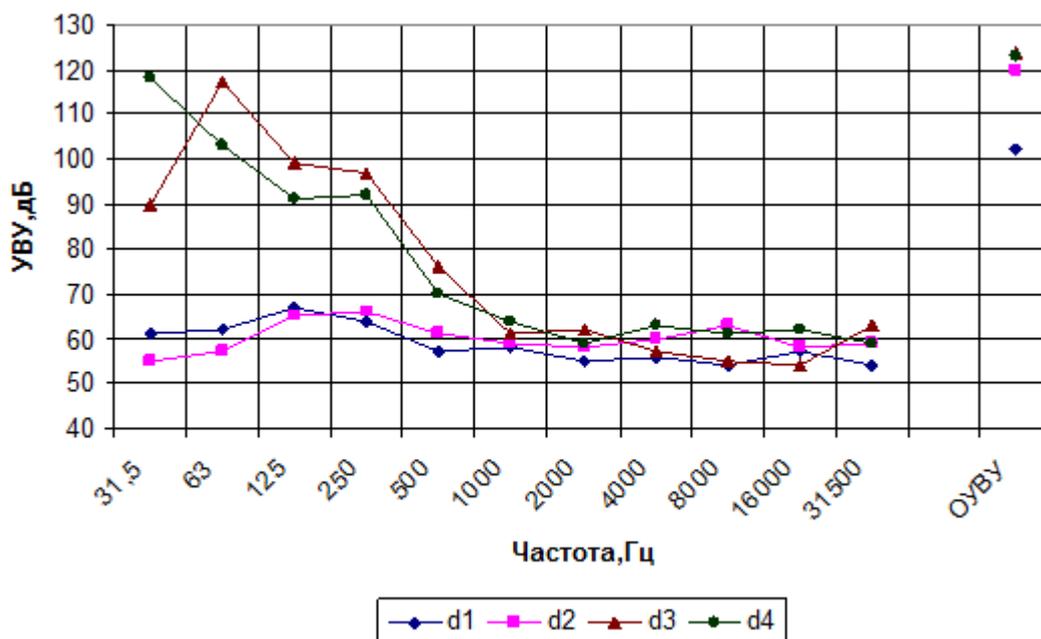


Рисунок 26 - Характеристики виброускорений образца 2М при соударении

В соответствии с рисунком 26 максимальный эффект АЗД обнаружен на частоте 63 Гц при соударении образца 2М с шаром-ударником диаметром, равным 15,2 мм - УВУ=117 дБ, а при соударении с шаром-ударником диаметром, равным 18,3 мм - УВУ=103 дБ. Эффект АЗД составляет 14 дБ.

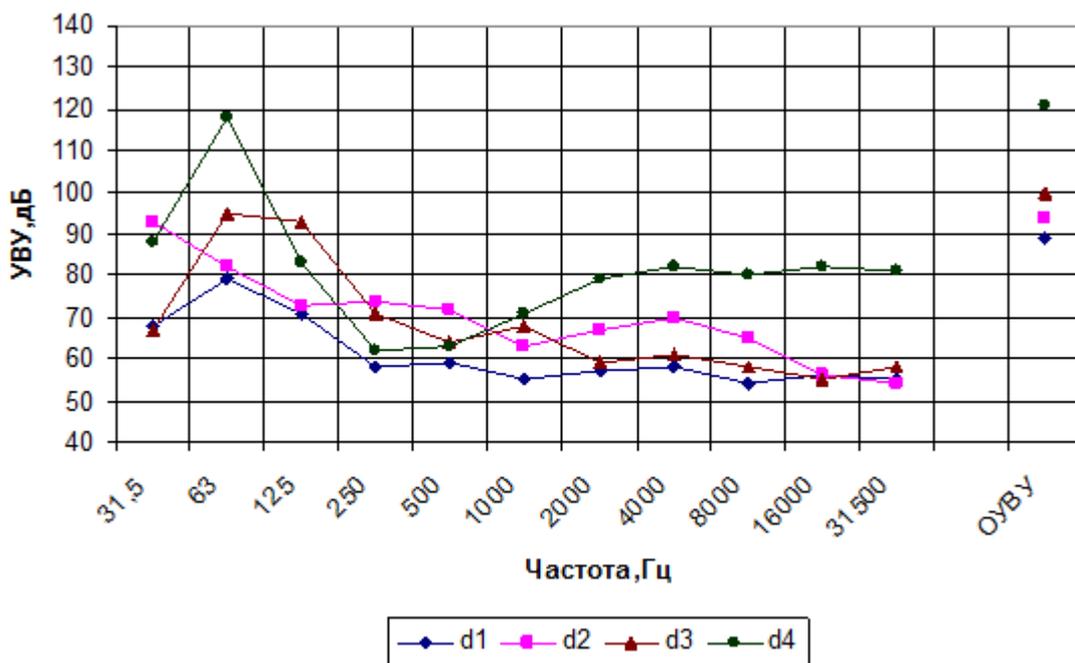


Рисунок 27 - Характеристики УВУ образца 3М при соударении

В соответствии с рисунком 27 максимальный эффект АЗД обнаружен на частоте 31,5 Гц при соударении образца 3М с шаром-ударником диаметром d_2 , УВУ=93 дБ, а при соударении с шаром-ударником диаметром d_3 , УВУ=67 дБ. Эффект АЗДВ=27 дБ.

На рисунке 28 представлены УВУ образца 3М(НС). Уровни вибрации образца с наноструктурным покрытием имеют свои особенности: ОУВУ ниже, чем у образцов 1М, 2М, 3М. Наблюдаются минимальные значения УВУ в диапазоне частот 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000, 31500 Гц. Несколько отличаются УВУ при соударении ударником диаметром 18,3 мм. АЗДВ наблюдается на всех частотах. Максимальное АЗДВ на частотах 31,5 Гц и 2000Гц.

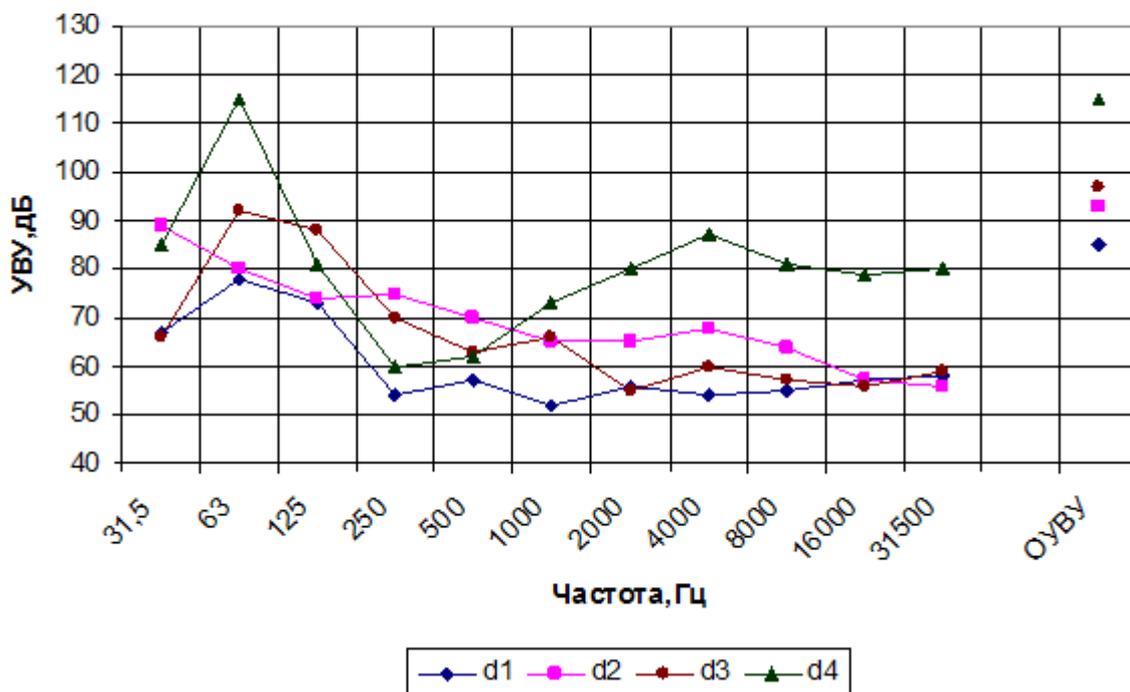


Рисунок 28 - Характеристики УЗД образца 3М(НС) при соударении

4.2 Исследование акустических свойств легированных сталей

Акустические характеристики исследованных стандартных сталей 20ХНР, 30ХН2МФА и 38ХН3МФА, и разработанных демпфирующих сталей 1М, 2М, 3М, 3М(НС) представлены в таблицах 23 и 24 и на рисунках 29-36. Вид термической обработки - закалка в масле с последующим высоким отпуском.

В таблице 23 представлены акустические характеристики стандартных легированных сталей 20ХНР, 30ХН2МФА, 38ХН3МФА и 20ХНР(НС).

Результаты экспериментов и характер кривых уровней звуковых давлений (УЗД) имеют следующий вид:

- УЗД исследованных образцов изменяются в диапазоне 45-79 дБ;
- максимум УЗД наблюдаются на частоте 4000 Гц (79 дБ);
- минимум УЗД образцов характерны для частоты 1000 Гц (54 дБ);
- максимальные значения УЗД сравниваемых образцов характерны при соударениях с шаром-ударником диаметром $d_4=18,3$ мм;
- минимальные значения УЗД сравниваемых образцов характерны при соударениях с шарами-ударниками диаметрами $d_1=9,5$ мм и $d_3=15,2$ мм;
- максимумы УЗ по характеристике «А» образцов сталей 20ХНР, 30ХН2МФА, 38ХН3МФА и 20ХНР(НС) наблюдаются при соударении с шаром-ударником диаметром d_4 , равны 74-79дБ;

Таблица 23 - Акустические характеристики стандартных легированных сталей 20ХНР, 30ХН2МФА, 38ХН3МФА и 20ХНР(НС)

Марка стали	Диаметр шароударника	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						УЗ, дБА
		1000	2000	4000	8000	16000	31500	
20ХНР	d ₁	45	48	62	60	56	48	66
	d ₂	47	53	65	67	66	45	68
	d ₃	45	64	74	72	67	48	73
	d ₄	54	68	79	77	67	66	77
30ХН2МФА	d ₁	48	50	63	66	58	51	70
	d ₂	56	55	68	64	65	50	72
	d ₃	49	66	75	74	64	49	73
	d ₄	58	64	74	72	69	63	80
38ХН3МФА	d ₁	51	53	69	66	60	56	73
	d ₂	59	61	66	68	63	57	74
	d ₃	55	64	71	73	64	58	79
	d ₄	58	70	72	74	66	60	81
20ХНР(НС)	d ₁	45	49	60	59	55	46	64
	d ₂	47	55	64	65	66	47	66
	d ₃	43	63	72	70	62	49	67
	d ₄	54	65	70	74	63	64	68

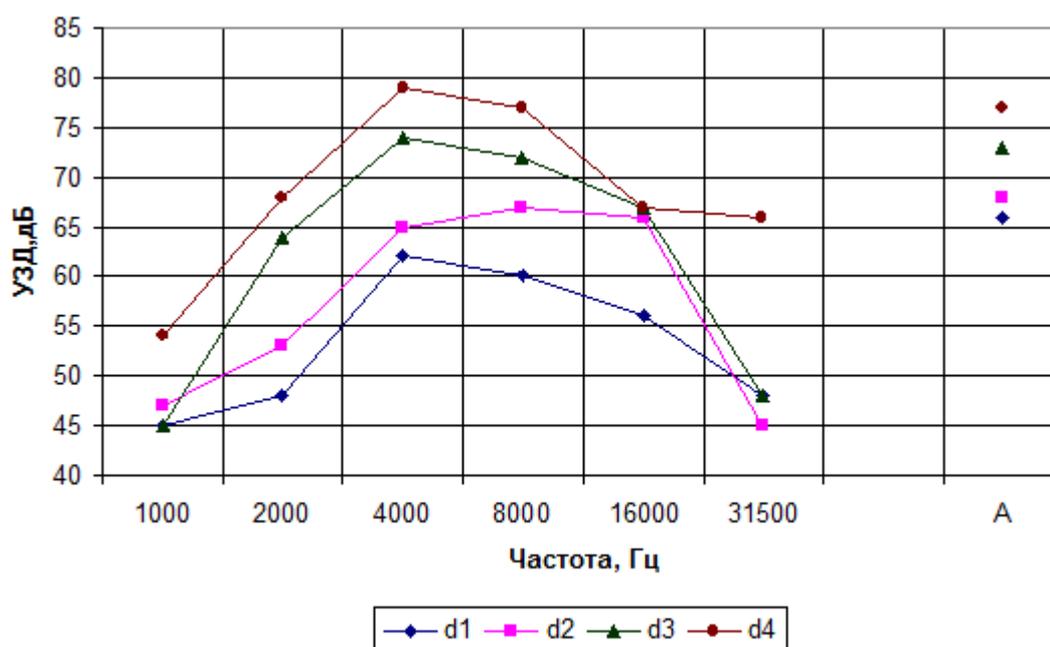


Рисунок 29 - Характеристики звукоизлучения стали 20ХНР при соударении

В соответствии с рисунком 29 на частоте 1000 Гц при соударении образца 20ХНР с шаром-ударником диаметром d₂, УЗД=47 дБ, а при соударении образца 20ХНР с шаром-ударником диаметром d₃, УЗД=45 дБ. Эффект АЗДЗ составил 2 дБ.

На частоте 16000 Гц при соударении образца 20ХНР с шаром-ударником диаметром d_3 , УЗД=67 дБ, а при соударении образца с шаром-ударником диаметром d_4 , УЗД=67 дБ. Удар сильный, а увеличения уровня шума нет.

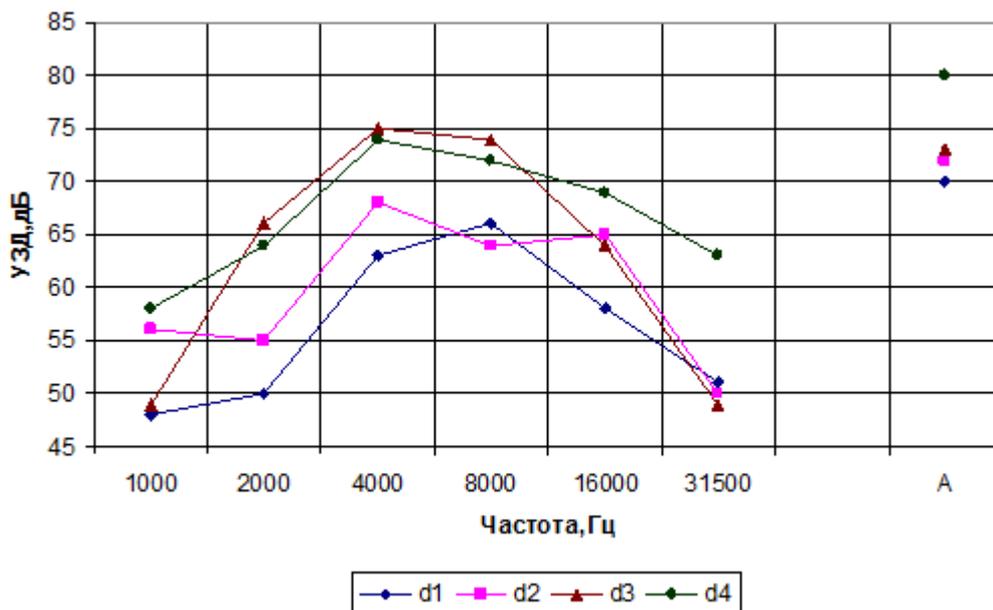


Рисунок 30 - Характеристики звукоизлучения стали 30ХН2МФА при соударении

В соответствии с рисунком 30 максимальный эффект амплитудно-зависимого демпфирования звукоизлучения (АЗДЗ) у стали 30ХН2МФА обнаружен на частоте 4000 Гц.

При соударении образца 30ХН2МФА на частоте 1000 Гц с шаром-ударником диаметром d_2 , УЗД составил 56 дБ, а при соударении с шаром-ударником диаметром d_3 , УЗД=49 дБ. Эффект АЗДЗ=7 дБ.

На частоте 2000 Гц при соударении образца 30ХН2МФА с шаром-ударником диаметром d_3 , УЗД=66 дБ, а при соударении с шаром-ударником диаметром d_4 , УЗД=64 дБ. Эффект АЗДЗ=2 дБ.

На частоте 31500 Гц при соударении образца 30ХН2МФА с шаром-ударником диаметром d_1 , УЗД=51 дБ, а при соударении образца 30ХН2МФА с шаром-ударником диаметром d_2 , УЗД=50 дБ. Эффект АЗДЗ=1 дБ.

В соответствии с рисунком 26 на частоте 1000 Гц при соударении образца 38ХН3МФА с шаром-ударником диаметром d_2 , УЗД=59 дБ, а при соударении образца с шаром-ударником диаметром d_3 , УЗД=55 дБ. Эффект АЗДЗ=4 дБ.

На частоте 4000 Гц при соударении образца 38ХН3МФА с шаром-ударником диаметром d_1 , УЗД=69 дБ, а при соударении образца с шаром-ударником диаметром d_2 , УЗД=66 дБ. Эффект АЗДЗ составляет 3 дБ.

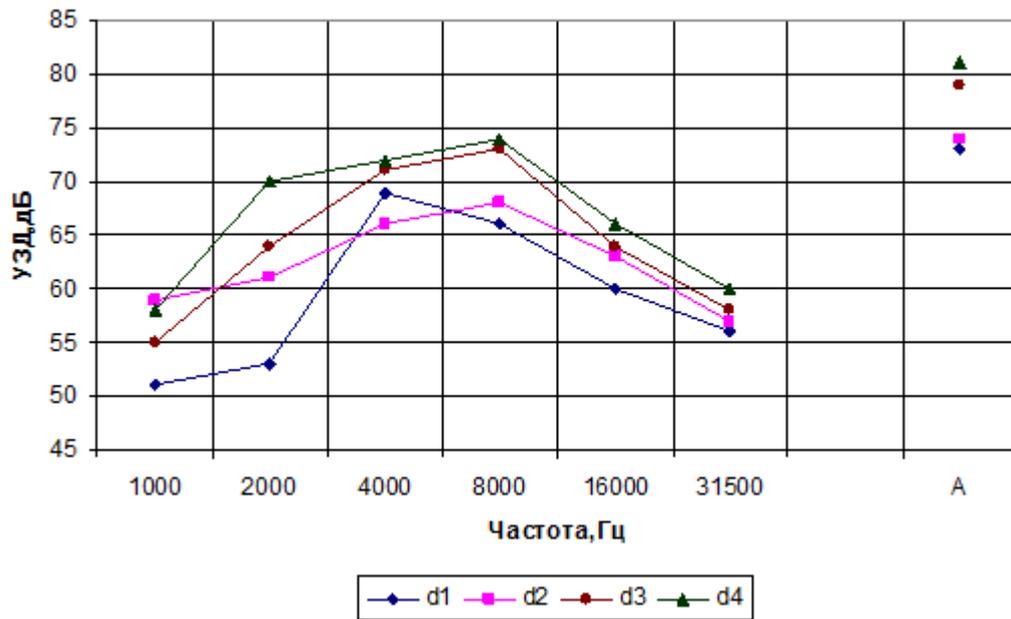


Рисунок 31 - Характеристики звукоизлучения образца 38ХНЗМФА при соударении

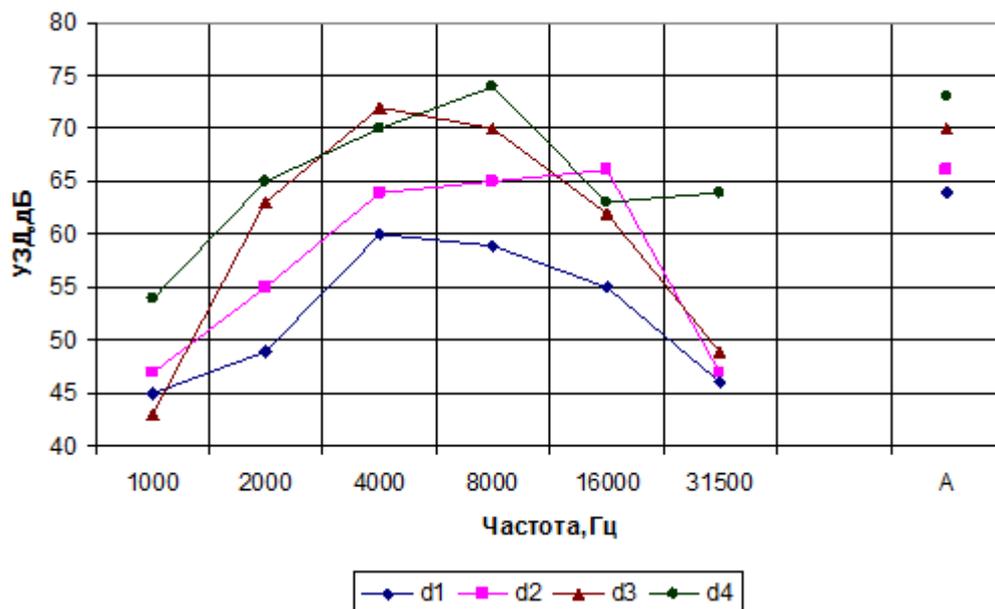


Рисунок 32 - Характеристики звукоизлучения стали с наноструктурным покрытием 20ХНР(НС) при соударении

В таблице 24 представлены акустические характеристики образцов разработанных легированных сталей при соударении с шарами-ударниками разных диаметров.

Таблица 24 - Акустические характеристики образцов разработанных легированных сталей при соударении с шарами-ударниками

Марка сталей	Диаметр шара-ударника	Уровни звуковых давлений, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						УЗ, дБА
		1000	2000	4000	8000	16000	31500	
1М	d ₁	46	50	53	59	58	45	64
	d ₂	51	57	59	72	65	48	69
	d ₃	54	60	64	73	66	54	73
	d ₄	58	67	68	74	71	63	76
2М	d ₁	44	50	61	65	60	51	67
	d ₂	57	59	64	69	65	50	70
	d ₃	54	62	66	75	81	56	74
	d ₄	56	65	67	69	78	63	76
3М	d ₁	47	50	51	55	50	51	54
	d ₂	56	54	60	68	71	55	69
	d ₃	52	60	66	75	70	57	72
	d ₄	54	62	65	78	69	59	75
3М (НС)	d ₁	46	47	50	52	48	47	51
	d ₂	55	52	59	66	67	53	68
	d ₃	50	57	63	70	66	55	70
	d ₄	52	60	64	75	66	57	72

Результаты экспериментов (рисунки 33-36) и характер кривых УЗД имеют следующий вид:

- уровни звуковых давлений исследованных образцов изменяются в диапазоне 44-81 дБ;
- максимумы УЗД наблюдаются на частотах 8000 Гц (75 дБ) и 16 000 Гц (81 дБ);
- минимумы уровней звуковых давлений образцов характерны для частот 1000 Гц и 31500 Гц (44-45 дБ);
- максимальные значения уровней звуковых давлений сравниваемых образцов характерны при соударениях с шарами-ударниками диаметрами d₄ и d₃;
- минимальные значения уровней звуковых давлений сравниваемых образцов характерны при соударениях с шаром-ударником диаметром d₁;
- максимумы УЗ по характеристике «А» у исследованных образцов сталей 1М, 2М, 3М и 3М(НС) наблюдаются при соударении с шаром-ударником диаметром d₄ (74-76 дБ).

В соответствии с рисунком 39 эффект амплитудозависимого демпфирования звукоизлучения обнаружен в следующих случаях: на частоте 8000 Гц (ударники d₃ и d₄).

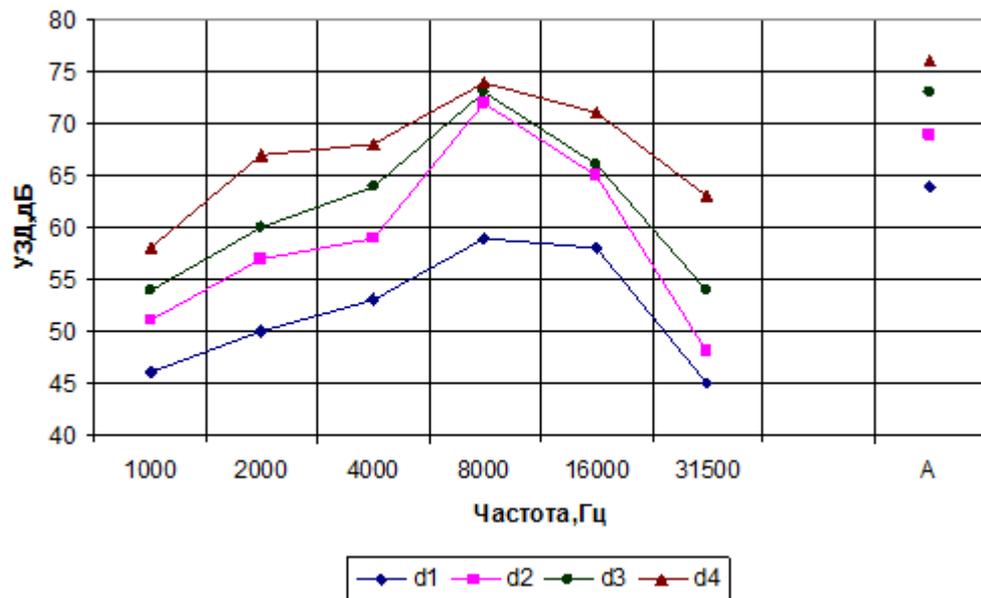


Рисунок 33 - Характеристики звукоизлучения образца 1М при соударении

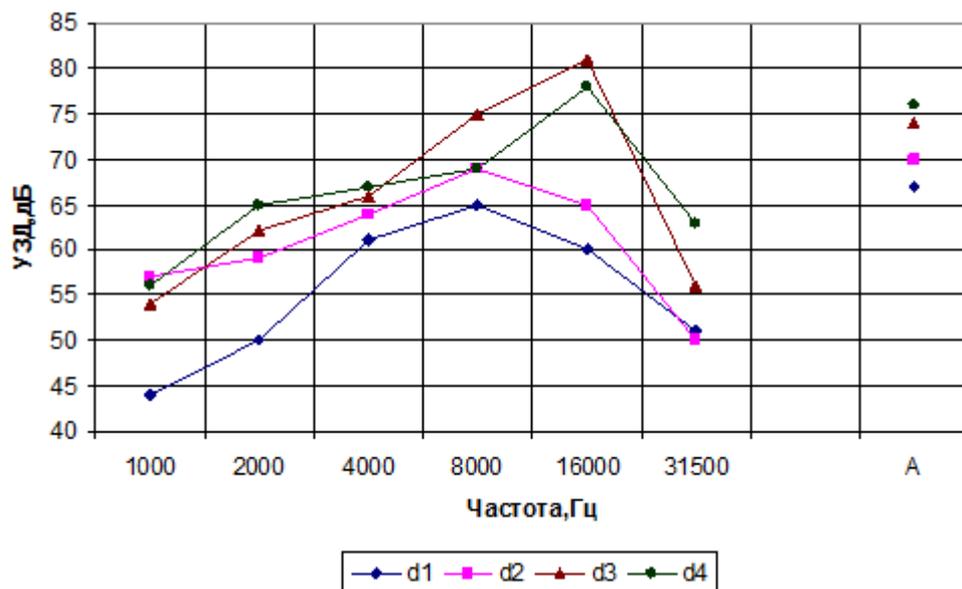


Рисунок 34 - Характеристики звукоизлучения образца 2М при соударении

Для сплава 2М АЗДЗ было обнаружено в следующих случаях (рисунок 34):

- на частоте 1000 Гц при соударении образца с шаром-ударником диаметром d_2 , УЗД=57 дБ, а при соударении образца 2М с шаром-ударником диаметром d_3 , УЗД=54 дБ. Эффект АЗДЗ=3 дБ.

- на частоте 8000 Гц при соударении образца 2М с шаром-ударником диаметром d_3 , УЗД=75 дБ, а при соударении образца с шаром-ударником диаметром d_4 , УЗД=69 дБ. Эффект АЗДЗ=6 дБ.

- на частоте 16000 Гц при соударении образца с шаром-ударником диаметром d_3 , УЗД=81 дБ, а при соударении образца с шаром-ударником диаметром d_4 , УЗД=78 дБ. Эффект АЗДЗ составляет 3 дБ.

- на частоте 31500 Гц при соударении образца 2М с шаром-ударником диаметром d_1 , УЗД=51 дБ, а при соударении образца с шаром-ударником диаметром d_2 , УЗД=50 дБ. Эффект АЗДЗ составляет 1 дБ.

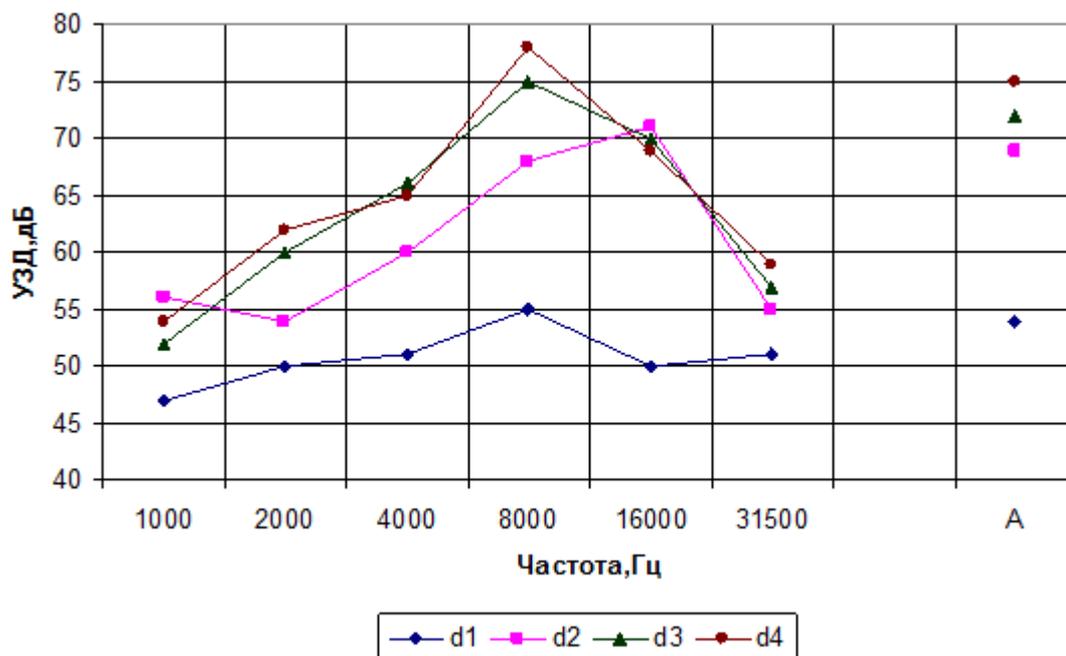


Рисунок 35 - Характеристики звукоизлучения образца 3М при соударении

В соответствии с рисунком 35 максимальный эффект АЗДЗ обнаружен в следующих случаях:

- на частоте 1000 Гц при соударении образца 3М с шаром-ударником диаметром d_2 , УЗД=56 дБ, а при соударении с шаром-ударником диаметром d_3 , УЗД=52 дБ. Эффект АЗДЗ составляет 4 дБ.

- на частоте 4000 Гц при соударении образца 3М с шаром-ударником диаметром d_3 , УЗД=66 дБ, а при соударении образца с шаром-ударником диаметром d_4 , УЗД=65 дБ. Эффект АЗДЗ=1 дБ.

- на частоте 16 000 Гц при соударении образца 3М с шаром-ударником диаметром d_3 , УЗД=70 дБ, а при соударении образца с шаром-ударником диаметром d_4 , УЗД=69 дБ. Эффект АЗДЗ=1 дБ.

В соответствии с рисунком 36, АЗДЗ у сплава 3М(НС) наблюдается на следующих частотах:

- на частоте 1000 Гц при соударении образца с ударником d_2 , УЗД соответствует 55 дБ, а при соударении с d_3 УЗД составляет 50 дБ, эффект АЗДЗ составляет 5дБ.

- на частоте 16000 Гц при соударении образца с ударником d_2 , УЗД составляет 67 дБ, а при соударениях ударниками d_3 и d_4 , УЗД соответствует 66 дБ. АЗДЗ составляет 1дБ.

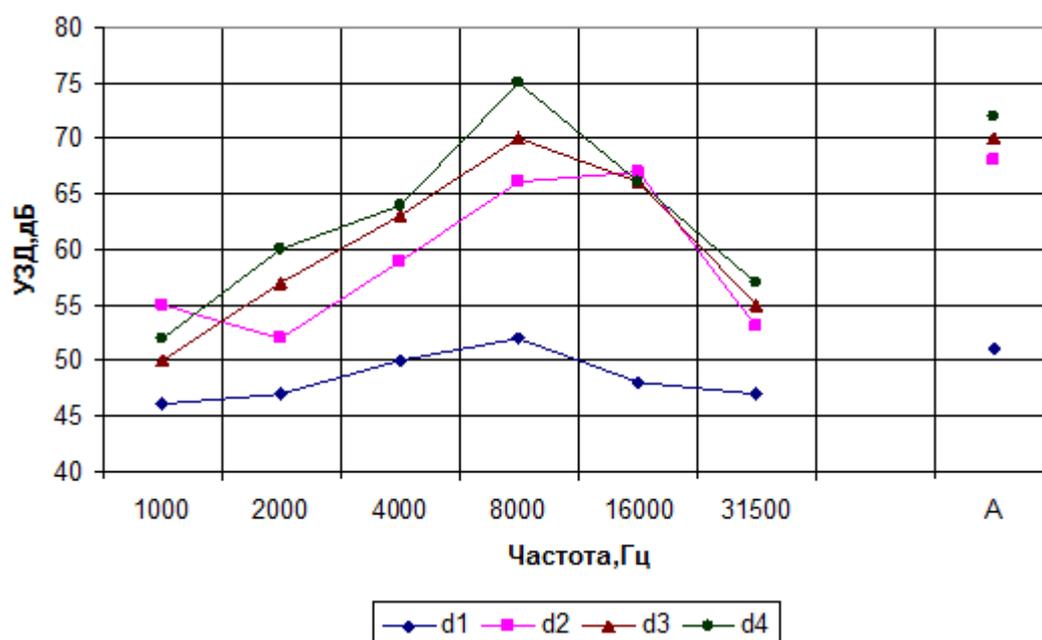


Рисунок 36 - Характеристики звукоизлучения образца 3М (НС) при соударении

4.3 Механизмы затухания колебаний в легированных сталях

В таблице 25 приведены значения внутреннего трения, дисперсия опыта и уровней звука сплавов в исходном состоянии. Анализ этой таблицы показывает, что послековки внутреннее трение сталей 20ХНР, 30ХН2МФА и 38ХН3МФА находится в диапазоне от 0,0013 до 0,0022. Эти же параметры у опытных сталей 1М, 2М и 3М изменяются в пределах от 0,0019 до 0,0036, что в 1,5-3 раза выше, чем у стандартных сталей.

Таблица 25 - Значения внутреннего трения, дисперсия опыта и уровни звука сплавов в исходном состоянии

Марка сплава	Внутреннее трение		Уровень звука, дБА		Дисперсия опыта, $\times 10^4$	
	ковка	закалка 890, отпуск 650	ковка	закалка 890, отпуск 650	ковка	закалка 890, отпуск 650
20ХНР	0,0266	0,0293	70	66	0,0511	0,0521
30ХН2МФА	0,0135	0,0207	73	70	0,1621	0,2211
38ХН3МФА	0,0171	0,0255	77	73	0,3634	0,4758
1М	0,0401	0,0454	69	64	0,4435	0,7128
2М	0,0422	0,0478	71	67	0,4923	0,8185
3М	0,0458	0,0575	59	54	0,5725	0,8284

После закалки внутреннее трение стали 20ХНР увеличилось с 0,0266 до 0,0293, а уровень звука снизился с 70 дБА до 66 дБА. У стали 38ХНЗФА внутреннее трение выросло после закалки с 0,0135 до 0,0207, а уровень звука снизился с 77 до 73 дБА. Мартенситная структура эффективно гасит вынужденные колебания.

У опытных сплавов наблюдается аналогичное явление, но эффект выше. У сплава 1М внутреннее трение послековки составляет 0,0401 (что значительно выше, чем у стали 20ХНР после закалки и отпуска), а после закалки и высокого отпуска – 0,0454, при этом уровень звука снизился с 69 дБА до 64 дБА. У сплава 2М внутреннее трение выросло с 0,0422 до 0,0478, а уровень звука снизился с 71 дБА до 67 дБА. У сплава 3М внутреннее трение выросло после закалки и высокого отпуска с 0,0458 до 0,0575, а уровень звука снизился с 59 дБА до 54 дБА.

Упругие свойства исследованных сталей представлены в таблице 26. Взаимосвязи упругих свойств (как и твердости) с демпфирующими свойствами не обнаружено.

Таблица 26 - Упругие свойства исследованных сплавов

Марка сплава	Период колебаний, Т, с	T^2, c^2	Модуль сдвига, $G \times 10^{10}, Pa$	Модуль Юнга, $E \times 10^{10}, Pa$	Уровень звука, дБА
20ХНР	0,0755	0,0057	3,221	8,79	66
30ХН2МФА	0,0251	0,00063	2,515	6,41	70
38ХНЗМФА	0,0812	0,0066	2,116	6,13	73
20ХНР(НС)	0,0612	0,0037	3,625	8,85	64
1М	0,0861	0,0074	3,133	9,15	64
2М	0,9111	0,8300	2,665	7,19	67
3М	0,1615	0,00026	8,115	9,34	54
3М(НС)	0,2534	0,0642	8,235	9,98	51

Приведены экспериментальные данные удельного электросопротивления исследованных сталей, которое определяли на образцах стали в исходном состоянии, после нормализации и последующей закалки. Результаты определения приведены в таблице 27.

У стали 20ХНР удельное электросопротивление составляет $15,22 \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 10^6$ при уровне звука 66 дБА и УВУ 111 дБ. У сплава 3М (НС) эти же значения соответственно: $26,21 \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 10^6$, 51 дБА и 85 дБ. Наблюдается зависимость: рост удельного сопротивления обеспечивает снижение уровней звукоизлучения.

Таблица 27- Удельное электросопротивление опытных сталей

Марка стали	Удельное электросопротивление, ρ , Ом·м·10 ⁶ ,	Уровень звука, дБА	Общий уровень виброускорения, дБ
20ХНР	15,22	66	111
30ХН2МФА	14,11	70	113
38ХН3МФА	17,24	73	114
20ХНР(НС)	14,35	64	110
1М	19,15	64	91
2М	20,18	67	102
3М	24,33	54	89
3М(НС)	26,21	51	85

После горячей пластической деформации и последующего охлаждения на воздухе сплавы имеют довольно широкий интервал по от 4×10^{-6} до 11×10^{-6} Ом·м, после отжига этот интервал несколько сокращается. Эти же образцы после закалки имеют более низкое удельное электросопротивление.

На рисунке 37 представлен снимок стали 3М(НС) с наноструктурным покрытием. Как видно из представленного снимка, структура покрытия имеет слоистый характер с чередованием слоев Ti-Al-N (темные слои) и слоев, обогащенных содержанием алюминия (светлые слои).

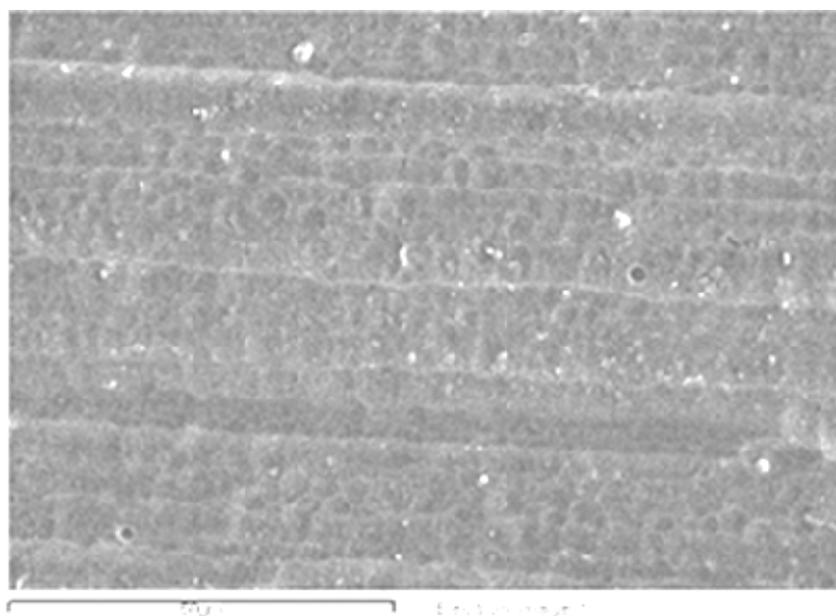


Рисунок 37 - Снимок многослойного наноструктурного покрытия на основе системы Ti-Al-N

На рисунке 38 представлен снимок стали 3М(НС) в разрезе, полученная на сканирующем электронном микроскопе (FE-SEM), на котором была измерена толщина наноструктурного покрытия в 3×10^{-6} м.

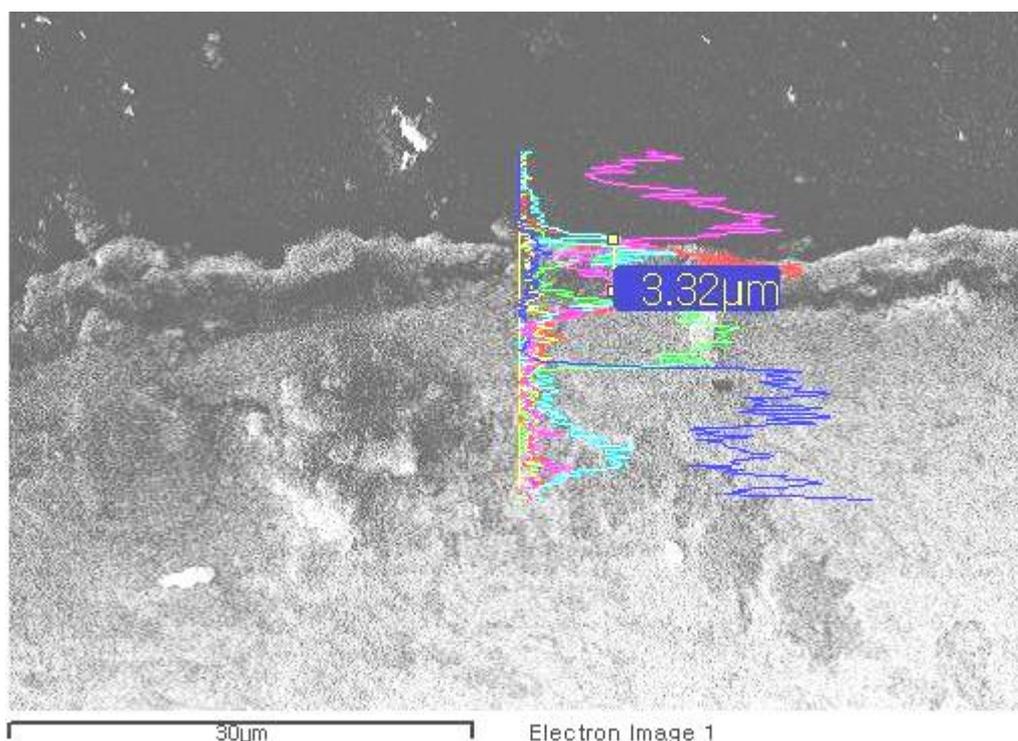


Рисунок 38 - Снимок стали 3М(НС) в разрезе

На устройстве для комплексного исследования акустических и вибрационных свойств пластинчатых образцов, описанного во второй главе, с помощью осциллографа PCS-500 записаны осциллограммы затухания звукового импульса от соударения образцов с шарами-ударниками. По этим осциллограммам определены такие демпфирующие свойства, как логарифмический декремент, относительное рассеяние и внутреннее трение.

На рисунках 39-42 представлены осциллограммы затухания звукового импульса от соударения легированных сталей с шарами-ударниками.

На рисунке 39 представлена осциллограмма затухания звукового импульса от соударения стандартной легированной стали (марки 20ХНР) с шаром-ударником. По полученной осциллограмме определены демпфирующие характеристики легированной стали 20ХНР, которые равны $\delta=0,0085$; $\psi=0,0169$; $Q^{-1}=0,0266$.

На рисунке 40 представлена осциллограмма затухания звукового импульса от соударения разработанной легированной стали (литое состояние) 1М с шаром-ударником, по которой определены демпфирующие характеристики стали 1М, которые равны $\delta=0,0127$; $\psi=0,0255$; $Q^{-1}=0,0401$. Значения, которые намного выше, чем у стандартных легированных сталей.

На рисунке 41 представлена осциллограмма затухания звукового импульса от соударения разработанной легированной стали (литое состояние) 2М с шаром-ударником, где были определены демпфирующие характеристики демпфирующей легированной стали 2М, равные $\delta=0,0134$; $\psi=0,0268$; $Q^{-1}=0,0422$.

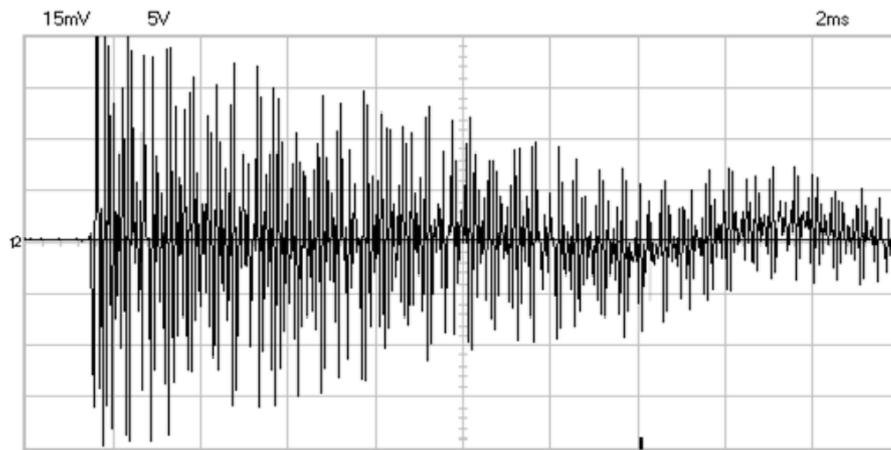
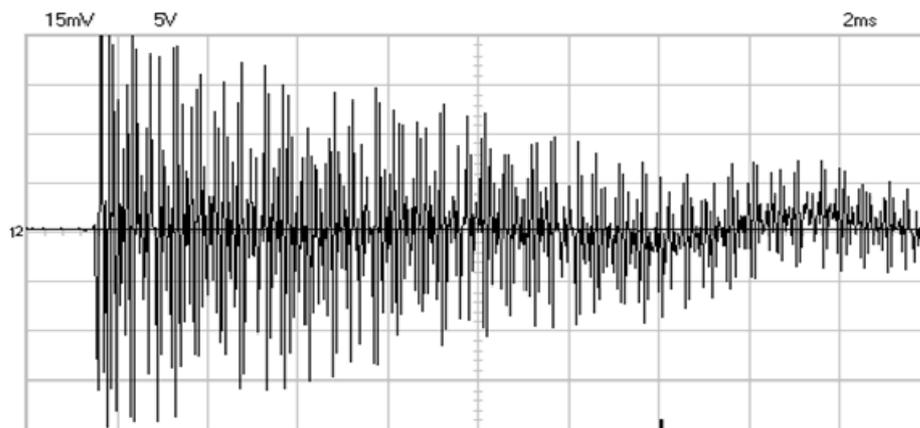
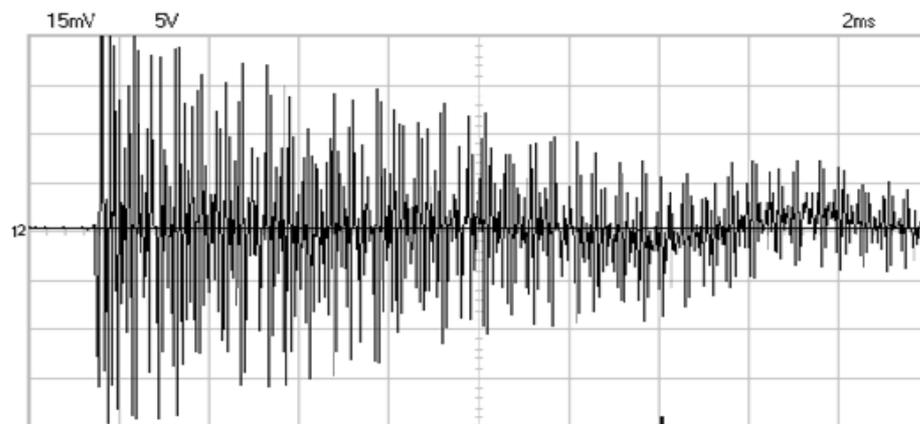


Рисунок 39 – Осциллограмма затухания звукового импульса от соударения легированной стали 20XHP с шаром-ударником



$$\delta=0,0127; \psi=0,0255; Q^{-1}=0,0401$$

Рисунок 40 – Осциллограмма затухания звукового импульса от соударения легированной стали 1М с шаром-ударником

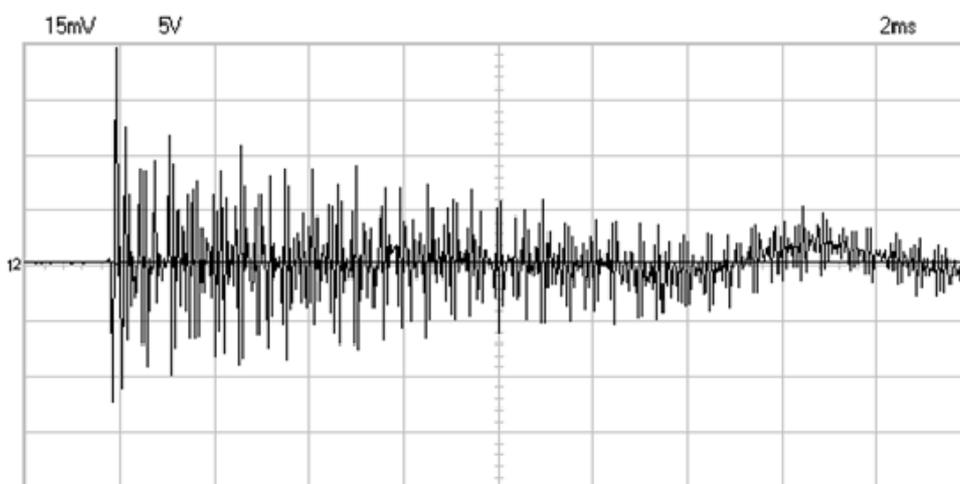


$$\delta=0,0134; \psi=0,0268; Q^{-1}=0,0422$$

Рисунок 41 – Осциллограмма затухания звукового импульса от соударения легированной стали 2М (литое состояние) с шаром-ударником

На рисунке 42 представлена осциллограмма затухания звукового импульса от соударения разработанной легированной стали (литое состояние) 3М с шаром-ударником. Были получены значения, которые выше по сравнению со стандартной легированной сталью 20ХНР и с разработанными легированными сталями 1М и 2М.

В соответствии с рисунками 44-47 на приведенных осциллограммах видно, что разработанная легированная сталь 3М имеет повышенные значения скорости затухания и демпфирующих характеристик ($\delta=0,0146$; $\psi=0,0291$; $Q^{-1}=0,0458$) по сравнению со стандартной легированной сталью 20ХНР, а также с вновь разработанными легированными сталями 1М, 2М.



$$\delta=0,0146; \psi=0,0291; Q^{-1}=0,0458$$

Рисунок 42 – Осциллограмма затухания звукового импульса от соударения легированной стали 3М (литое состояние) с шаром-ударником

4.5 Диссипативные и акустические свойства сталей

Причиной диссипации звуковой и вибрационной энергии в исследованных металлических материалах (широко известные стали, легированные бором, никелем и ванадием, а также разработанные 1М, 2М, 3М) является бездиффузионное обратимое фазовое превращение - мартенситное превращение [144].

Под «бездиффузионным обратимым фазовым превращением» понимают обычное обратимое мартенситное превращение или обратимый переход одной модификации мартенсита в другую по бездиффузионному механизму, как это наблюдается, например, в сплавах системы никель-титан. В сплавах с обратимым мартенситным превращением при охлаждении от M_n до M_k происходят появление и рост так называемых термоупругих кристаллов мартенсита, а при последующем нагреве в диапазоне температур обратного перехода ($A_n - A_k$) – уменьшение и исчезновение последних. Вследствие того, что мартенситное превращение обычно сопровождается изменением размеров твердого тела, оно может в значительной степени инициироваться

напряжениями, вызванными внешним нагружением. Мартенситное превращение, вызванное приложением нагрузки, подобно превращению, вызванному изменением температуры, может быть необратимым и обратимым. В последнем случае целесообразно использовать термин механоупругое мартенситное превращение. Сплавы с термоупругим мартенситным превращением в некотором диапазоне температур способны и к механоупругому мартенситному превращению. При образовании мартенсита при охлаждении в поликристаллических металлах вследствие разноразмерности ориентировок, соответствующих кристаллографическим соотношениям исходной и мартенситной фаз, изменения формы образца обычно не наблюдается. Изменяются только общие размеры вследствие объемных изменений.

Образование «наведенного» мартенсита, т.е. мартенсита, образующегося путем механического нагружения, в отличие от «термического» мартенсита, получаемого при охлаждении, имеет направленный характер. В первую очередь образуются и растут мартенситные кристаллы с благоприятной по отношению к направлению прикладываемой силы ориентировкой. Формирование такой ориентированной структуры приводит к анизотропному изменению формы образца. На диаграмме напряжение–деформация, если испытания проводятся в области температур описанного мартенситного превращения, это отражается в значительном приращении деформации при непропорционально малом увеличении нагрузки.

Образованию мартенсита под действием нагрузки при температурах выше начала образования мартенсита в случае охлаждения и увеличения количества мартенсита при приложении внешней нагрузки в области температур термически активируемого мартенситного превращения приводят к смещению термической кривой прямого мартенситного превращения в сторону повышенных температур.

Аналогичный процесс образования высокотемпературной фазы сдвигает кривую обратного мартенситного превращения в сторону пониженных температур.

Как было отмечено, высокое рассеяние энергии в сплавах указанного класса обусловлено механоупругим мартенситным превращением. С этих позиций при разработке сплавов высокого демпфирования следует стремиться к уменьшению гистерезиса обратимого мартенситного превращения $M_H - M_C$ и, наконец, к значительному градиенту механоупругости мартенситного превращения, характеризующего интенсивность превращения в результате приложения механической нагрузки. Градиент механоупругости мартенситного превращения определяется отношением $dV_M/V_0 d\sigma$, где dV/V_0 – относительное количество приращения мартенсита при увеличении прикладываемого напряжения на $d\sigma$ [145].

Измерение характеристик диссипации (логарифмический декремент) исследованных материалов осуществляли одновременно с исследованием параметров звукоизлучения.

При соударении в твердом материале возникают процессы, тесно связанные со структурой. Структура твердого материала насыщена дефектами кристаллической решетки (дислокации всех разновидностей).

Связь дислокаций с диссипацией энергии в твердом теле известна ранее. Теоретических работ, объясняющие дислокационный характер внутреннего трения достаточно, однако наиболее приемлемой является теория Гранато и Люкке. Теория основана на предположении, что дислокация ведет себя подобно натянутой струне. Под действием внешнего приложенного напряжения дислокации могут колебаться и, таким образом, рассеивать энергию. При изменении приложенных напряжений дислокации могут частично отрываться, стягиваться упруго и вновь закрепляться. Потеря энергии может происходить двумя путями. Потери первого типа обусловлены демпфирующим механизмом, противодействующим движению дислокаций, вызванному внешним напряжением. В результате имеет место фазовый сдвиг между приложенным внешним напряжением и упругой деформацией. Это приводит к появлению эффекта внутреннего трения и изменению модуля упругости. Такие потери носят резонансный характер и зависят от частоты. Потери второго типа имеют гистерезисный характер. Это обусловлено тем, что кривая деформации при увеличении и уменьшении приложенного напряжения идет разными путями, образуя петлю гистерезиса. Потери этого типа являются частотно-независимыми [146].

Затухание звука от соударении в исследованных сталях можно объяснить влиянием внутреннего трения. Внутреннее трение – очень чувствительный механизм.

Внутреннее трение быть двух разновидностей – амплитуднозависимое и амплитуднонезависимое. Амплитуднонезависимое внутреннее трение это когда соударение испытуемого образца разными по массе ударниками практически не изменяет параметры диссипации, в том числе образце отсутствует затухание. Такой материал представляет интерес специалистам создающим устройства с длительным звучанием (колокола, музыкальные инструменты).

Амплитуднозависимая область внутреннего трения – это когда с ростом амплитуды удара, образец отвечает повышенным затуханием звуковой и вибрационной энергии. Причиной этого может быть отрыв дислокаций от закрепленных дефектов и движение в новые положения.

Если проанализировать таблицу 28, то видно, что у стали 20ХНР внутреннее трение в диапазоне амплитуд деформации $(6,9-13,8)10^{-6}$ практически не меняется $(2,66-2,85) \cdot 10^{-2}$, а уже при амплитуде деформации $16,1 \cdot 10^{-6}$ внутреннее трение начинает расти и наблюдается отрыв дислокаций с $3,14 \cdot 10^{-2}$ до $3,95 \cdot 10^{-2}$. Но в целом можно сказать, что наблюдаем незначительный уровень амплитуднозависимого демпфирования.

Таблица 28 – Амплитудная зависимость внутреннего трения исследованных сталей после нормализации

Название сплава	Амплитуда деформации	Внутреннее трение, $Q^{-1} \times 10^{-2}$	Дисперсия, $S^2 \times 10^{-3}$
20ХНР	6,9	2,66	0,011
	9,2	2,68	0,056
	11,5	2,71	0,068
	13,8	2,85	0,088
	16,1	3,14	0,110
	18,4	3,26	0,222
	20,7	3,75	0,091
	23,0	3,85	0,060
	25,3	3,86	0,264
	27,6	3,90	0,155
	29,9	3,95	0,166
1М	6,9	4,01	0,015
	9,2	4,22	0,185
	11,5	4,25	0,313
	13,8	4,65	0,064
	16,1	5,22	0,055
	18,4	6,33	0,115
	20,7	7,24	0,118
	23,0	8,15	0,225
	25,3	8,25	0,156
	27,6	8,34	0,754
	29,9	8,48	0,454
2М	6,9	4,22	0,165
	9,2	4,24	0,389
	11,5	4,35	0,014
	13,8	4,60	0,202
	16,1	4,85	0,202
	18,4	4,90	0,414
	20,7	5,02	0,212
	23,0	5,24	0,425
	25,3	6,33	0,525
	27,6	7,55	0,564
	29,9	7,98	0,624
3М	6,9	4,58	0,265
	9,2	4,59	0,315
	11,5	4,61	0,310
	13,8	4,63	0,288
	16,1	4,68	0,254
	18,4	5,88	0,948
	20,7	6,24	0,108
	23,0	6,44	0,088
	25,3	7,51	0,858
	27,6	7,88	0,589
	29,9	8,64	1,954

У опытной стали 3М картина несколько иная. Амплитуднонезависимая область $(6,9-16,1) \cdot 10^{-6}$ характеризуется повышенным значением внутреннего трения $(4,58-4,61) \cdot 10^{-2}$ затем идет интенсивный рост значений внутреннего трения с $4,68 \cdot 10^{-2}$ до $8,64 \cdot 10^{-2}$. Если сравнить со сталью 20ХНР, то уровень внутреннего трения вырос почти втрое. Здесь наблюдается заметный отрыв дислокаций от мест закрепления и стремительное движение к новым местом закрепления. От этого и происходит повышенное демпфирование и снижение звукоизлучения.

Аналогичная картина наблюдается у сталей 1М и 2М: Амплитуднонезависимая область в диапазоне амплитуд деформации $(6,9-11,5) \cdot 10^{-6}$ у стали 2М, затем быстрый рост внутреннего трения от $4,35 \cdot 10^{-4}$ до $7,98 \cdot 10^{-4}$. У стали 1М амплитуднонезависимая область внутреннего трения с $6,9 \cdot 10^{-6}$ до $11,5 \cdot 10^{-6}$, а после начинается рост до амплитуды деформации $29,9 \cdot 10^{-6}$.

Анализ рисунка 43 по характеристикам амплитудно-зависимого демпфирования показывает, что сплав 3М обладает повышенными демпфирующими свойствами по сравнению со сплавами 1М, 2М и 20ХНР.

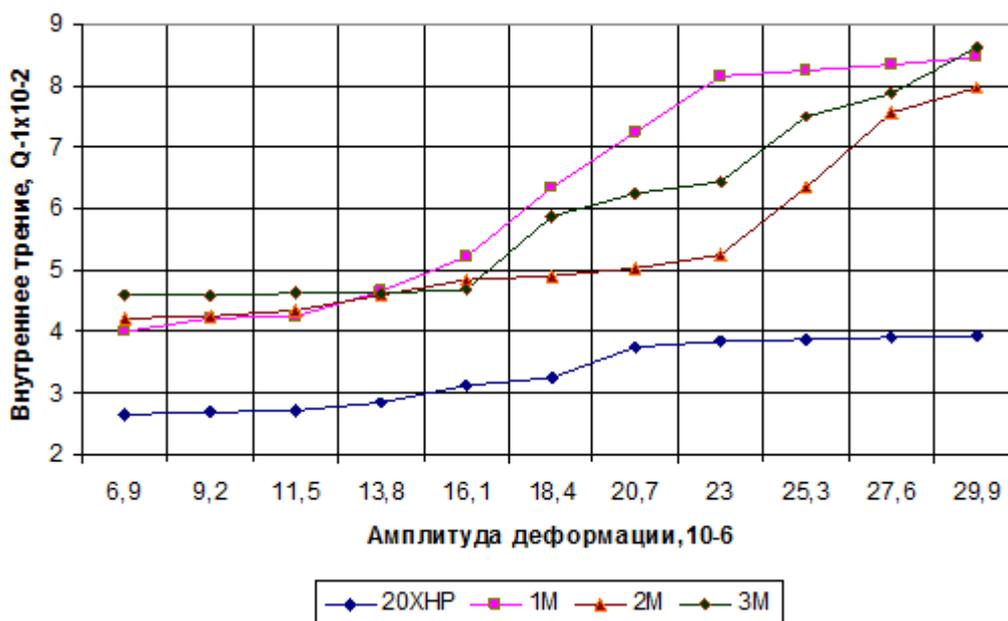


Рисунок 43 – Амплитудная зависимость внутреннего трения исследованных сталей после нормализации

Рисунок 48 показывает, что амплитуда мало влияет на демпфирование стали 20ХНР, т.к. уровень его внутреннего трения низок. Высокий уровень внутреннего трения сталей 1М и 3М объясняется дислокационной структурой. Следует отметить что при амплитуде деформации $13,8 \cdot 10^{-6}$ начинается рост внутреннего трения у сплавов 1М, 2М, 3М.

Высокое значение внутреннего трения у сплава 1М характеризует о более спонтанном срыве дислокаций. Вероятно, в этом интервале амплитуд деформаций, рассеяние энергии колебаний также связано с освобождением

дислокаций от атмосфер из атомов внедрения под действием приложенного напряжения.

Установлена зависимость уровня звукового давления от внутреннего трения, измеренного методом крутильных колебаний в низкочастотном диапазоне (4 Гц).

На рисунке 44 представленная зависимость еще раз подтверждает полученные ранее результаты, что с увеличением внутреннего трения возрастает способность материала к релаксации энергии звуковых волн. Изменение внутреннего трения от $0,5$ до $1,7 \times 10^{-3}$ вызывает изменение уровня звука на 10 дБА [145].

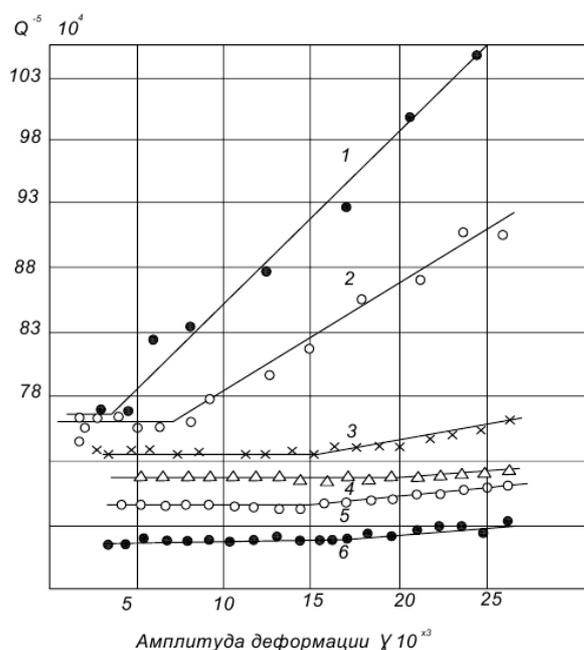


Рисунок 44 – Амплитудная зависимость внутреннего трения железа при различных температурах, °C: 1-470; 2-450; 3-400; 4-70; 5-350; 6-100 [145]

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что данные о внутреннем трении вполне могут быть использованы для оценки демпфирующей способности исследуемых сталей. Между уровнем звука и внутренним трением существует обратно пропорциональная связь.

4.6 Влияние термообработки на демпфирующие и акустические свойства сталей

Для оценки влияния термообработки на акустические свойства исследуемых сталей проведены следующие виды термической обработки: отжиг, нормализация, закалка с низким и высоким отпуском (таблица 29).

Таблица 29 - Зависимость акустических характеристик сталей от вида термической обработки

Сталь	Уровни звука при соударении, дБА				
	Вид термической обработки				
	Отжиг	Нормализация	Закалка	Закалка, низкий отпуск	Закалка, высокий отпуск
20ХНР	73	70	64	65	66
30ХН2МФА	75	73	67	68	70
38ХН3МФА	78	76	70	71	73
1М	68	68	62	63	64
2М	70	70	64	65	67
3М	58	58	51	52	54

Как видно из таблицы, после отжига уровни звука максимальны (61-73) дБА. Это понятно, так как отжиг - аннигилирует дислокации, несовершенства кристаллической решетки, все преграды на пути звуковой волны, что и вызвало рост звукоизлучения при соударениях. Хотя иногда отжиг обеспечивает рост зерна - утолщение границ зерен, что незначительно обеспечивает рост демпфирования [146]. Нормализация аналогично действует как и отжиг, но степень аннигиляции ниже, поэтому не все барьеры перед звуковой волной ликвидируются, поэтому уровни звука несколько ниже, чем после отжига (58-76) дБА.

Проведены следующие виды термообработки:

- отжиг (нагрев до температуры $A_{c3}+50^{\circ}C$, выдержка 0,5 часа, охлаждение с печью);

- нормализация (нагрев до температуры $A_{c3}+50^{\circ}C$, выдержка 0,5 часа, охлаждение на воздухе);

- закалка (нагрев до температуры $A_{c3}+50^{\circ}C$, выдержка 0,5 часа, охлаждение в воде);

- отпуск низкий (нагрев закаленной стали до температуры $250^{\circ}C$, охлаждение на воздухе);

- отпуск высокий (нагрев закаленной стали до температуры $680^{\circ}C$, охлаждение на воздухе);

Критическая точка A_{c3} для исследуемых сталей представлена в таблице 30.

Таблица 30 - Критические точки для исследуемых сталей

Сталь	Критическая точка A_{c3} , $^{\circ}C$
20ХНР	790
30ХН2МФА	810
38ХН3МФА	800
1М	840
2М	830
3М	830

Закалка (без отпуска) обеспечило создание мартенситной структуры с максимальным значением деформации кристаллической решетки, что и обеспечивает самые низкие уровни звука сталей в настоящем исследовании.

Последующий отпуск (250°C) повышает звукоизлучение за счет аннигиляции некоторых областей деформации кристаллической решетки.

Высокий отпуск (680°C) обеспечивает оптимальное сочетание прочностных и акустических характеристик исследуемых сталей. Полученная троостобейнитная структура в стали 3М обеспечило эффективное гашение шума соударений и высокие диссипативные свойства (таблица 31).

Таблица 31 - Влияние вида термической обработки на демпфирующие свойства исследуемых сталей

Сталь	Внутреннее трение, Q^{-1}					
	Вид термической обработки					
	Ковка	Отжиг	Нормализация	Закалка	Закалка, низкий отпуск	Закалка, высокий отпуск
20ХНР	0,0266	0,0201	0,0275	0,0322	0,0301	0,0293
30ХН2МФА	0,0135	0,0162	0,0198	0,0311	0,0278	0,0207
38ХН3МФА	0,0171	0,0195	0,0210	0,0338	0,0279	0,0255
1М	0,0401	0,0215	0,0322	0,0391	0,0310	0,0454
2М	0,0422	0,0261	0,0317	0,0568	0,0502	0,0478
3М	0,0458	0,0424	0,0502	0,0685	0,0614	0,0575

Как видно из таблицы 31, диссипативные свойства существенно зависят от вида термической обработки. Виды термической обработки (отжиг, нормализация, отпуск), аннигилирующие несовершенства кристаллической решетки, снижают демпфирующие свойства. Закалка значительно повысило диссипативные характеристики до значений 0,0322 - 0,0685.

Микроструктура стали 20ХНР (0,16 % С; 0,7 % Мn; 0,9 % Ni; 0,8 % Cr; 0,002% В, ост. – Fe) представлена на рисунках 44 и 45. Она представляет собой феррит с перлитной структурой.

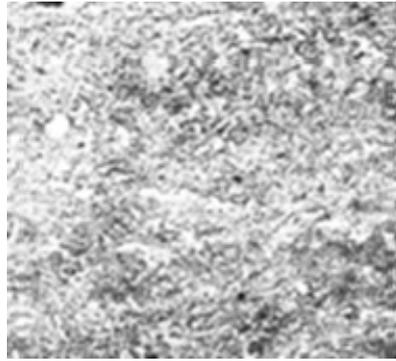


Рисунок 44 - Микроструктура стали 20ХНР (прокатка) (увеличение 300)

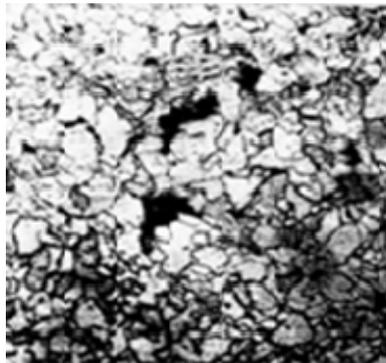


Рисунок 45 - Микроструктура 20ХНР (литье+ковка) (увеличение 400)

Микроструктура сплава 30ХН2МФА (0,3% С; 0,5% Мn; 2,1% Ni; 0,11% V; ост.– Fe) представляет собой феррито-перлитную смесь. Светлые участки на травленных образцах представляют феррит, темные – перлит (рисунки 46, 47).



Рисунок 46 - Микроструктура 30ХН2МФА.(увеличение 300)

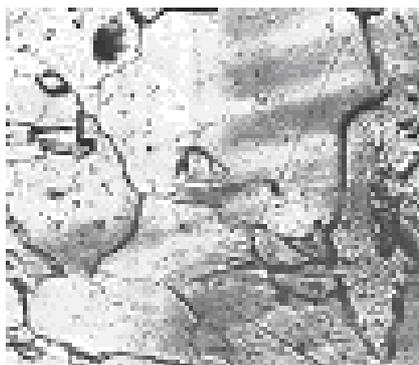


Рисунок 47 - Микроструктура 30XН2МФА.(увеличение 400)

Микроструктура стали 38XНЗМФА (0,38% С, 0,4% Мо, 0,35% Мп, 1,4 %Cr, 3,2 % Ni, 0,15% V, остальное - Fe) представлена на 48 и 49. Сталь подвергнута горячей прокатке после литья в кокиль. Затем проведена нормализация. Структура сплава представляет феррито-перлитную смесь.

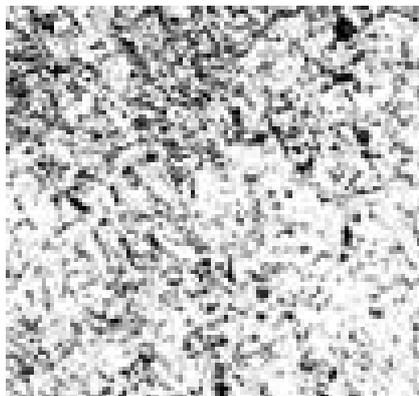


Рисунок 48 - Микроструктура стали 38XНЗМФА до нормализации (увеличение 300)



Рисунок 49 - Микроструктура стали 38XНЗМФА (литье+ковка+нормализация), (увеличение 300)

Микроструктура сплава 1М (0,21 % С; 0,8 Мп; 0,9% Cr, 0,5 % Ni; 0,21% V; 0,0001 % В, 0.02% Се; ост. – Fe) после литья и горячейковки представляет

структуру феррита и перлита (рисунок 50). На образце обнаружено незначительное количество неметаллических включений.



Рисунок 50 - Микроструктура сплава 1М (литье+ковка+закалка)
(увеличение 500)

На рисунках 51 и 52 представлена микроструктура образца 2М.



Рисунок 53 - Микроструктура сплава 2М (литье+ковка+нормализация)
(увеличение 300)

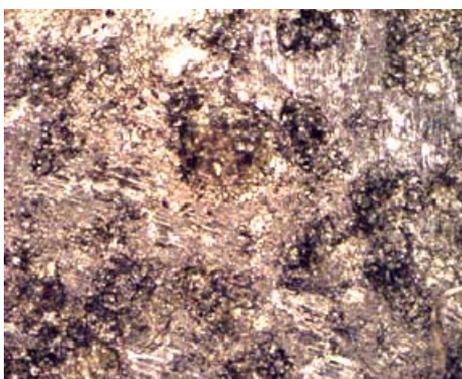


Рисунок 54 - Микроструктура сплава 2М (литье+ковка)(увеличение 1000)

Микроструктура сплава 3М представлена на рисунке 55. Сплав 3М (0,40 % С; 0,005 % В; 0,50 % Мп; 3,5 % Ni; 0,25% V, 1,76 % Cr; ост. – Fe) после литья

подвергнут горячей ковке, и его структура представляет после травления феррито-перлитную смесь с неметаллическими включениями. Нормализация измельчила зерно, укрупнила неметаллические включения (силикатные включения).

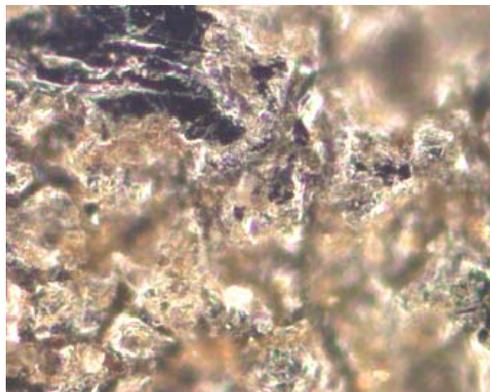


Рисунок 55 - Микроструктура сплава 3М (литье+ковка+нормализация) (увеличение 1500)

Для сравнения демпфирующих свойств исследованных сталей были исследованы диссипативные характеристики порошковых металлических материалов ПММ на основе железа. Демпфирование в ПММ осуществляется эффективнее, так как имеются поры (рисунок 56). Плотность у них ниже, чем у литых сталей. Механические свойства так же не высоки и они не способны заменить борванадийникелевые стали.

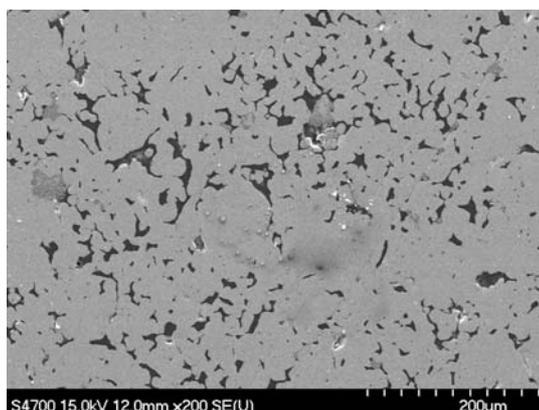


Рисунок 56 - Микроструктура порошкового материала

4.7 Расчет социально-экономического эффекта

Применение вибродемпфирующих сплавов является эффективным способом снижения шума на производстве. Их использование не только показывает улучшение условий труда, но и гарантирует экономический эффект за счет снижения уровня заболеваемости.

Промышленное испытание сплавов высокого демпфирования дает следующие результаты: амплитуды резонансных колебаний уменьшаются в два-три раза, что соответствует снижению уровня шума на 6-10 дБ.

Результаты снижения уровня шума получены на основе расчета ожидаемого годового социально-экономического эффекта. В результате внедрения втулки направляющей трубы токарного автомата ТОО «КазТоргПромКомпании» произведен расчет ожидаемого годового социально-экономического эффекта (Приложение В). Кроме того, разработанные стали были использованы в учебном процессе КазНТУ имени К.И. Сатпаева (приложение Г).

Расчет проводили в соответствии с рекомендациями по определению эффективности мероприятий по улучшению условий труда согласно «Инструкции по проектированию и расчету шумоглушения строительно-акустическими методами на предприятиях черной металлургии» [147].

Социальная эффективность мероприятий по борьбе с шумом определяется по формуле 39 [148]:

$$C = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n D_i' P_i'}{\sum_{i=1}^m D_i P_i} \right) \times 100\%, \quad (39)$$

где D_i, D_i' - число работников i -ой профессии, соответственно, до и после изменения уровня звука на рабочих местах:

P_i, P_i' - расчетная вероятность повреждения слуха у работников i -ой профессии, соответственно, до и после изменения уровня звука.

m, n – число профессий, рабочие которых находились под воздействием шума, соответственно, до и после изменения уровня звука.

Социальному эффекту соответствуют значения $C > 0$.

Расчет экономической эффективности охватывает мероприятия по снижению шума, уровни которого превышают 80 дБА. При расчете учитываются экономические потери, возникающие при повышенном производственном шуме и связанные с ростом числа дней временной нетрудоспособности, частичной стойкой утратой общей трудоспособности, снижением трудоспособности здоровых работников.

Годовой экономический эффект (в тг/год), усредненный за нормативный срок окупаемости капитальных вложений (8 лет) следует определять по формуле [148]:

$$\Xi = 1,1 \sum_{i=1}^m \Delta T(L_{AЭi}) \frac{3_i D_i}{100} - 1,1 \sum_{i=1}^n \Delta T(L'_{AЭi}) \frac{3_i D_i}{100} - (0,12 K_D + CЭ), \quad (40)$$

где $\Delta T(L_{AЭi}), \Delta T(L'_{AЭi})$ - ежегодные трудовые потери в процентах, усредненные за 8 лет, у работников i -ой профессии при работе в условиях

шума с эквивалентными, уровнями звука на рабочих местах $L_{AЭi}$ и $L'_{AЭi}$ соответственно до и после проведения мероприятий по снижению шума;

Z_i – средняя за нормативный срок окупаемости капитальных вложений годовая заработная плата с начислениями рабочего i -ой профессии, тг.;

D_i , D'_i - число работников i -ой профессии соответственно до и после снижения шума;

K_d – дополнительные капитальные вложения в мероприятия по снижению шума;

C_3 – среднегодовые эксплуатационные расходы на шумовую защитную конструкцию, тг.

При $\Delta > 0$ мероприятия по борьбе с шумом дают не только оздоровительный эффект, но являются экономически целесообразными.

Значение Z_i определяется по формуле:

$$Z_i = Z_{oi} \left(1 + \frac{4,2 \cdot \alpha}{100} \right),$$

где Z_{oi} – среднегодовая заработная плата с начислениями рабочего i -ой профессий в первый год после снижения шума, тг.;

α - темпы роста производительности труда, %.

На основе расчетов социально-экономической эффективности, с использованием новых демпфирующих материалов, получены акты внедрения, которые приведены в Приложениях Д, Е.

Социально-экономическая эффективность от внедрения втулки направляющей трубы токарной установки.

Внедрение внедрения втулки направляющей трубы токарной установки из сплава с повышенными демпфирующими характеристиками 3М (0,4% С; 0,5% Mn; 1,76% Cr; 3,5% Ni; 0,25% V; 0,005% В; остальное – железо) обеспечивает в цеху получение стабильной прибыли вследствие экономии затрат, связанных со снижением заболеваемости работников, уменьшение числа дней нетрудоспособности (Приложение Д).

Социальная эффективность:

$$C = \left(1 - \frac{0,05 \cdot 20}{0,11 \cdot 20} \right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1,0}{2,2} \right) \cdot 100\% = 55\%$$

Далее определяем трудовые потери до и после снижения шума, используя данные из [158], при смене состава работников через $t_c=5$ лет:

$$\Delta T (L_{AЭ1}=98 \text{ дБА})=5,5\%$$

$$\Delta T (L'_{AЭ1}=85 \text{ дБА})=2,2\%$$

Средняя за нормативный срок окупаемости капитальных вложений годовая заработная плата с начислениями рабочих групп будет:

$$З = 1630434,8 \cdot \left(1 + \frac{4,2 \cdot 20}{100}\right) = 3000000 \text{ тг./год};$$

Экономическая эффективность от внедрения вала муфты сцепления:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= 1,1 \cdot 7,0 \cdot \frac{300000 \cdot 20}{100} - 1,1 \cdot 2,2 \cdot \frac{3000000 \cdot 20}{100} - 0,12 \cdot (700000 + 918406,17) = \\ &= 4620000 - 1452000 - 1781000 = 1387000 \text{ тг} \end{aligned}$$

Социально-экономическая эффективность от внедрения правильной плиты для рихтовки в слесарно-сварочном цехе.

Внедрение внедрения правильной плиты для рихтовки в слесарно-сварочном цехе ТОО Завод «КВоиТ» из сплава с повышенными демпфирующими характеристиками 3М (0,4% С; 0,5% Мн; 1,76% Cr; 3,5% Ni; 0,25% V; 0,005% В; остальное – железо) обеспечивает в цеху получение стабильной прибыли вследствие экономии затрат, связанных со снижением заболеваемости работников, уменьшение числа дней нетрудоспособности (Приложение Е).

Социальная эффективность:

$$C = \left(1 - \frac{0,03 \cdot 20}{0,12 \cdot 20}\right) \cdot 100\% = 75\%$$

Далее определяем трудовые потери до и после снижения шума, используя данные из [158], при смене состава работников через $t_c=5$ лет:

$$\Delta T (L_{AЭ1}=96 \text{ дБА})=1,1\%$$

$$\Delta T (L'_{AЭ1}=85 \text{ дБА})=2,3\%$$

Средняя за нормативный срок окупаемости капитальных вложений годовая заработная плата с начислениями рабочих групп будет:

$$З = 19022173,9 \cdot (1 + 0,84) = 3500000 \text{ тг/год};$$

Экономическая эффективность от внедрения вала муфты сцепления:

$$\mathcal{E} = 1,1 \cdot 6,5 \cdot \frac{350000 \cdot 20}{100} - 1,05 \cdot 2,2 \cdot \frac{3500000 \cdot 20}{100} =$$

$$= 5005000 - 1617000 = 3388000 \text{ тг},$$

$$3388000 - (0,92 \cdot 275869,5) = 850000 \text{ тг/год.}$$

Выводы по четвертому разделу

1 Исследованы вибрационные характеристики стандартных сталей 20ХНР, 30ХН2МФА и 38ХН3МФА и вновь выплавленных 1М, 2М, 3М. Виброускорение стандартных сталей оценивается в диапазоне 59-121 дБ. Виброускорение выплавленных сталей оцениваются в диапазоне 55-121 дБ. Общие уровни виброускорения сплава 3М соответствуют минимальному значению 89 дБ, что на 12 дБ ниже, чем у стали 20ХНР (наиболее оптимальный из группы стандартных сталей). Причиной пониженной виброактивности сплавов 1М, 2М и 3М является оригинальный химический состав и структурное демпфирование.

2 Исследованы акустические свойства (уровни звука и уровни звукового давления) сталей. Уровни звука сталей 20ХНР, 30ХН2МФА и 38ХН3МФА оцениваются в диапазоне 64-81 дБА, у сплавов 1М, 2М и 3М эти же параметры оцениваются в диапазоне 51-76 дБА. Причиной пониженного звукоизлучения сплавов 1М, 2М, 3М являются повышенные демпфирующие свойства (магнитомеханический гистерезис).

3 Нанесение послойного наноструктурного покрытия обеспечивает снижение шума на 2-3 дБА. Послойное наноструктурное покрытие по 30 нм, общей толщиной в 3×10^{-6} м из Ti-Al-N демпфирует звуковые волны в высокочастотном диапазоне, что существенно снижает общий уровень звука.

4 Внутреннее трение в исследованных сплавах оценивается в диапазоне 0,0171-0,0458, при этом диссипативные свойства сталей 1М (0,0401), 2М (0,0422), 3М (0,048) значительно выше, чем у сталей 20ХНР (0,0266), 30ХН2МФА (0,0135), 38ХН3МФА (0,0171). Это объясняется тем, что оригинальное легирование церием обеспечивает повышенное демпфирование за счет дислокационного рассеивания энергии.

5 Влияние термической обработки на звукоизлучение и диссипативные свойства весьма существенно. Виды термической обработки (отжиг, нормализация, отпуск) аннигилирующие несовершенства кристаллической решетки, снижают демпфирующие свойства. Закалка значительно повышает диссипативные характеристики до значений (0,0322 - 0,0685). Отжиг - аннигилирует дислокации, несовершенства кристаллической решетки, все преграды на пути звуковой волны, что и вызвало рост звукоизлучения при соударениях. Нормализация аналогично действует как и отжиг, но степень аннигиляции ниже, отсюда не все барьеры перед звуковой волной ликвидируются, отсюда уровни звука несколько ниже, чем после отжига (58-76) дБА. Закалка (без отпуска) обеспечивает создание мартенситной структуры с максимальным количеством деформации кристаллической решетки, что и обеспечивает самые низкие уровни звука сталей в настоящем исследовании. Последующий отпуск (250°C) повышает звукоизлучение за счет аннигиляции некоторых областей деформации кристаллической решетки. Высокий отпуск (680°C) обеспечивает оптимальное сочетание прочностных и акустических

характеристик исследуемых сталей. Полученная троостобейнитная структура в стали 3М после закалки и высокого отпуска обеспечивает эффективное гашение шума соударений, повышенные диссипативные свойства и достаточную прочность.

6 Опытно-промышленная проверка на предприятиях «КВОбТ» и ТОО «КазТоргПромСотрану» стали 3М (0,4% С, 3,5% Ni, 0,25% V, 0,005% В, остальное железо) обеспечила экономический эффект на 2237000 (два миллиона двести тридцать семь тысяч) тенге в год за счет снижения заболеваемости работающих при воздействии производственного шума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научно-технической задачи снижения шума в источнике возникновения за счет создания демпфирующих сплавов на основе железа, легированных никелем, бором и ванадием.

Основные результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1 Дана оценка акустическим, демпфирующим свойствам сталей (20ХНР, 30ХН2МФА и 38ХН3МФА), легированных никелем, ванадием и бором, используемые в промышленности для изготовления ответственных деталей, работающих в условиях ударных нагрузок (зубчатые колеса, червяки, валы-шестерни, кулачковые муфты, валики, пальцы, втулки и др.).

2 На основе проведенных исследований, получены стали, легированные никелем (0,5-3,5)%, ванадием (0,21-0,32)%, бором (0,001-0,005)%, обладающие повышенными демпфирующими свойствами, из которых можно изготавливать детали, работающие в режиме ударных нагрузок.

3 Установлено влияние легирующих элементов (бора, никеля, ванадия и церия) на акустические свойства сталей.

4 Использование метода математического планирования экспериментов позволило резко сократить число экспериментов и оценить влияние каждого легирующего элемента в звукоизлучение при соударении. Получено уравнение регрессии МПЭ, с помощью коэффициентов которой оценены семь переменных факторов (содержание углерода, никеля, бора, ванадия, церия; величина наноструктурного покрытия, вида термообработки), влияющих на уровень звука при соударении: $y=62,30X_0-2,02X_1-0,841X_2+0,755X_3+0,451X_4+0,321X_5+0,888X_6+1,112X_7$. При этом, максимальное влияние на уровень звука оказывает содержание углерода (-2,02), вид термообработки (1,112), наноструктурное покрытие (0,888), содержание никеля (-0,841).

5 Исследовано влияние церия на демпфирующие свойства сталей (при использовании метода МПЭ). Влияние церия сопоставимо с влиянием ванадия.

6 Троостобейнитная структура вибродемпфирующей стали характеризуется подвижными межфазными границами, перемещения которых при приложении внешней нагрузки приводит к рассеянию энергии.

7 Выплавлена легированная сталь 3М (0,4% С; 0,5% Мн; 1,76% Сг; 3,5% Ni; 0,25% V; 0,005% В; остальное – железо), обладающая повышенными демпфирующими свойствами ($Q^{-1}=0,0458$), пониженным звукоизлучением при соударении ($L_A=52$ дБА) и оптимальными физико-механическими характеристиками: $\sigma_T=825$ МПа, $\sigma_B=990$ МПа, $\delta_5=13\%$, $\psi=45\%$, $KCU=55$ кДж/м².

8 Наноструктурное покрытие на поверхности стали 3М (послойно по 30 нм, общей толщиной 3×10^{-6} м) обеспечило дополнительное повышение демпфирующих свойств и снижение уровня звука на 2-3 дБ.

9 Влияние термической обработки на звукоизлучение и диссипативные свойства весьма существенно. Закалка и высокий отпуск (680°C) обеспечивают оптимальное сочетание прочностных и акустических характеристик исследуемых сталей. Полученная троостобейнитная структура в стали 3М обеспечивает эффективное гашение шума соударений, высокие диссипативные свойства и достаточную прочность.

10 Опытно-промышленная проверка на предприятиях «КВОбТ» и ТОО «КазТоргПромСотрапу» стали 3М обеспечила экономический эффект на 2237000 тенге в год за счет снижения заболеваемости работающих при воздействии производственного шума. Были изготовлены правильная плита для рихтовки в слесарно-сварочном цехе и втулка в направляющей трубе токарного автомата. Снижение шума составило 4-12 дБА по сравнению со сталью 40.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Буторина М. В., Иванов Н. И., Куклин Д. А. и др. Исследования шума поездов //Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – №8. – С.25-29.
- 2 Иванов Н.И., Тюрина Н.В. Проблема снижения шума железнодорожного транспорта //Доклады Международной научно-практической конференции "Применение акустических экранов для снижения шума и увеличения безопасности движения поездов". – М.; СПб, БГТУ, 2006, декабрь. – С. 2–28.
- 3 Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: Учебник. – М.: Университетская книга, Логос, 2008. – 424 с.
- 4 HandBook of noise and Vibration control // Edited by MalkolmJ. Crocker: NY, John Wiley and Sons Inc., 2007. – 1569 p.
- 5 СН. 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. – №36. – Введ. 1996-10-31. – М.: Минздрав РФ. – 27 с.
- 6 О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения. Закон РК от 03.01.2002 г. – № 1.
- 7 Об охране атмосферного воздуха. Закон РК от 11.03.1999 г. – № 302.
- 8 Инженерная и санитарная акустика: Сборник нормативно-методических документов. – СПб: Компания "Интеграл", 2008. – Т. 1. – 820 с.
- 9 Снижение уровня шума на железнодорожном транспорте Европы // ЖДМ. – 2008. – № 3. – С. 62–66.
- 10 ГОСТ Р 51943–2002. Экраны акустические для защиты от шума транспорта. Методы экспериментальной оценки эффективности. – Введ. 2003-07-01. – М.: Госстандарт Россия: Изд-во стандартов, 2002 – 11 с.
- 11 Мурзинов П. В. Методика выбора листовых материалов для высокоэффективных звукозащитных панелей //Безопасность жизнедеятельности. –2011. –№3. – С. 20-23.
- 12 Заборов В. И., Лалаев Э. М., Никольский В. Н. Звукоизоляция в жилых и общественных зданиях. – М.: Стройиздат, 1979. – 254 с.
- 12 Гоголев И.Г., Николаева Т. А., Дроконов А. М. Генерация и методы снижения вибрации в турбомашинах //Безопасность жизнедеятельности. – 2011. – №4. – С. 11-21.
- 13 Гоголев И. Г., Дроконов А. М., Зарянкин А. Е. Аэродинамические факторы и надежность турбомашин. – Брянск: Изд-во Грани, 1993. – 168 с.
- 14 Юдин Е. Я. Справочник проектировщика. Защита от шума. – М.: Стройиздат, 1974. – 201 с.
- 15 Кирпичников В.Ю., Дроздова Л.Ф., Яковлева Е.В. и др. Исследование вибрационных и шумовых характеристик междуэтажного перекрытия жилого здания //Безопасность жизнедеятельности. –2009. – №8. – С. 15-21.
- 16 Осипов Г. Л., Коробков В. Е., Климухин А. и др. Защита от шума в градостроительстве: справочник проектировщика. – М.: Стройиздат, 1993. – 134с.
- 17 Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций.

Справочник. – Л.: Судостроение, 1990. – 198 с.

18 Котляр Р.Г., Могилевский М. И. Рекомендации по расчету структурного шума от вентиляторов, установленных на перекрытиях, и методы его снижения – М.: ГПИ Сантехпроект. – 1982. – 176 с.

19 Крейтан В. Г. Защита от внутренних шумов в жилых домах. – М.: Стройиздат, 1990. – 260 с.

20 Заборов В. И., Могилевский М. И., Мякшин В. Н. и др. Справочник по защите от шума и вибрации жилых и общественных зданий. – Киев: Будивэльнык, 1989. – 160 с.

21 Ретлинг Э. В. Исследование звукоизоляции ограждающих конструкций зданий и ее повышение: дисс. ... докт. техн. наук. – Нижний Новгород, 1999. – 215 с.

22 Пособие к МГСН 2.04–97. Проектирование защиты от шума и вибрации оборудования в жилых и общественных зданиях. – М.: ГУП "НИИЦ", 1998. – 15 с.

23 Боголепов И. И. Промышленная звукоизоляция. – Л.: Судостроение, 1986.

24 Cremer L., Heckl M. Körperschall: Physicalische Grundlagen und technische Anwendungen. – Berlin.: Springer Verlag, 1967. –178 p.

25 Юдин Е.Я., Борисов Л. А., Горенштейн И. В. и др. Борьба с шумом / Под ред. Е. Я. Юдина. – М.: Стройиздат, 1964. – 400 с.

27 Тэйлор Р. Шум. – М.: Мир, 1978. – 308 с.

28 Хекл М., Мюллер Х.А. Справочник по акустике. – Л.: Судостроение, 1980. – 400 с.

29 Вибрации в технике: Справочник в 6 т. / Под ред. В. В. Болотина. Т. 1 – Колебания линейных систем. – М.: Машиностроение, 1978. – 352 с.

30 Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний. – М.: Мир, 1988. – 448 с.

31 Лепендин Л. Ф. Акустика: учеб. пособ. для вузов. – М.: Высш. школа, 1978. – 448 с.

32 Пат. 96884 РФ, МПК7 E04B 1/82, E04C 2/36. Звукоподавляющая структурированная панель / Мурзинов П.В., Асминин В. Ф.; опубл. 20.08.2010, Бюл. № 23.

33 Алешков Д.С., Бедрина Е.А. Оценка шумового загрязнения окружающей среды на примере города Омска //Безопасность жизнедеятельности. – 2010.–№4. – С. 43-45.

34 Сулеев Д.К., Утепов Е.Б., Кожыхан А.К. и др. Проблемы снижения шума транспортных машин // Материалы второй Международной научно-практической конференции молодых ученых. Ч.2. – Алматы: КазНТУ, 2002. — С. 214-217.

35 Barthod M, Hayne B. Experimental study of dynamic and noise produced by a gearing excited by a multi-harmonic excitation // Tebec J.-L., Pin J.-C., Appl Acoust. 2007. – Vol. 68, № 9. – P. 982-1002.

36 Исаков В.И. Экология. Военная экология: учебник для высших учебных

заведений Министерства обороны Российской Федерации. – Изд. 2, перераб. и доп. – Смоленск. – 2006. – 724 с.

37 Старжинский В.Н., Гагарин Д.Р. К расчету излучения шума обрабатываемой заготовкой при пилении древесины круглыми пилами //Безопасность жизнедеятельности. – 2010. – №11. – С. 20-24.

38 Месхи Б.Ч. Улучшение условий труда операторов металлорежущих и деревообрабатывающих станков за счет снижения шума в рабочей зоне. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2003. –130 с.

39 Любченко В. И. Резание древесины и древесных материалов. – М: МГУЛ, 2004. – 309 с.

40 Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. – М.: Мир, 1971. – 560 с.

41 Тюлин В. Н. Введение в теорию изучения и рассеяния звука. – М.: Наука, 1976. – 253 с.

42 Справочник по технической акустике: Пер. с нем. / Под ред. М. Хекла и Х. А. Мюллера. – Л: Судостроение, 1980. – 438 с.

43 Hui C.K. Low frequency sound insulation using stiffness control with honeycomb panels // J. Appl. Acoust., 2008. – Vol. 69, № 4. – P. 293-301.

44 Ajdler Thibaul, Sbaiz Luciano, Vetterli Martin. Dynamic measurement of room impulse responses using a moving microphone // Acoust. Soc. Amer., 2007. – Vol. 122, № 3. – P. 1636-1645.

45 Утепов Е.Б., Сулеев Д.К., Бисакаев С.Г. и др. Научные основы создания «тихих» сплавов (проблемы акустической экологии). – Алматы: ТОО «Принт», 2000. – 332 с.

46 Dieroff H.G. Der Unterschiedliche Schadmechanismus bei Dauer- und Impulslarmlastung in der Industrie und seine Bedeutung für die Praxis. Zeitschrift für die gesamte Hygiene und ihre Grenzgebiete. – 1979. – Bd.25, No.2. – S. 143-147.

47 Mounet F., Guilhot J.P., Arais C. Modelling of industrial noise sources using acoustical holography and optimization procedures //Acustica. – 1996. – №82. – p. 178.

48 Утепов Е.Б., Сулеев Д.К., Бисакаев С.Г. и др. Акустическая экология: демпфирующие материалы и конструкции. – Алматы: ТОО «ПРИНТ». – 330 с.

49 Москалева Л.Н., Працюк В.А. Исследование акустических свойств сталей, легированных титаном // Проблемы инженерной охраны труда. Науч. тр. Моск. института стали и сплавов. – М.: Металлургия, 1981. – №127. – С. 69–75.

50 Омирбай Р.С., Батесова Ф.К. Исследование вибрационных свойств образцов из стали //Наука и образование Южного Казахстана. Республиканский научный журнал. – 2006. – №7(56). – С.73-76.

51 Батесова Ф.К., Нюсупова А.Б. и др. Снижение шума в источнике возникновения //Вестник Казахского национального технического университета имени К.И.Сатпаева. – 2007. – №1/1 (58). – С.99-105.

52 Муравьев В.А. Затухание звуковых колебаний металлов//

Металловедение и термическая обработка металлов. – 1975. – №3. – С 63–64.

53 Мулов Д.В. Экспериментальные исследования упруго- демпфирующих свойств кольцевых канатных виброизоляторов.–Наукові праці ДонНТУ. – Випуск 16(142). –2009. – С. 198-203.

54 Тимофеева И.Г.. Безопасность труда на виброопасных технологических процессах. – Улан- Удэ, Изд-во ВСГТУ. –2003. – 95с.

55 Чегодаев Д.Е., Пономарев Ю.К. Демпфирование. – Самара: Изд-во СГАУ, 1997. – 334 с.

56 Рутковський О.Ю., Мулов Д.В. Использование кольцевых канатных виброизоляторов в системах виброзащиты ручных машин ударного действия// Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2008». – Дніпропетровськ, 2008. – С. 212-217.

57 Осмоловский Д.С., Асминин В.Ф. Экспериментальное исследование диссипативных свойств вибродемпфирующих прокладок с фрикционным трением для снижения шума от круглопильных деревообрабатывающих станков. – ИВУЗ. – «Лесной журнал». – 2011. – № 5. – С. 59-63.

58 Рогов В.А., Горбани С. Исследование демпфирующего свойства сборного токарного резца с применением композиционного материала в его конструкции. – Fundamental research. –№4. – 2013. – С. 1094-1099.

59 Злобинский В.М., Муравьев В.А. Звукоизлучение металлов // Металловед. и терм. обработка металлов. 1974. №1. – С.56–57.

60 Гуляев А.П., Писаревский Л.Ш., Гурина Б.Я., Бунеева В.М. Акустические свойства стальной проволоки // Металловед. и терм. обработка металлов. 1972. – №3. – С. 64–65.

61 Парфенов А.А. К методике определения акустических характеристик металлических материалов Проблемы инженерной охраны труда. Науч. тр. МИСиС. № 127. – М.: Металлургия, 1981. – С.75–79.

62 Бринза В.Н., Москалева Л.Н., Працюк В.А. Исследование влияния карбидообразующих элементов в низколегированной стали на ее акустические свойства // Проблемы инженерной охраны труда. Науч. тр. МИСиС. № 105. – М.: Металлургия, 1977. – С. 53-58.

63 Ильяшук Ю.М., Слободкин Х.Д., Трандина З.В. и др. Исследование акустической эффективности малозумных направляющих труб токарных автоматов // В кн.: Науч. работы инс-тов охраны труда ВЦСПС. – М.: Профиздат, 1973. – Вып. 82. – С. 60–64.

64 Утепов Е.Б., Актаев Б.Г., Хохлов П.П., Утепов Б.Б. Разработка малозумных сплавов. – Алматы: ТОО «Принт», 2000. – 114 с.

65 Утепов Е.Б., Актаев Б.Г., Актаева Д.У. и др. Применение «тихих» сплавов в технике борьбы с шумом. – Алматы: ТОО «Принт», 1998. – 78 с.

66 Uteпов E.B., Lidtke V.U., Myakotin V.N., Uteпов T.E. Reduction of noise in directing pipes of turning automatohs – Almaty: "Print", 2000. – p.76.

67 Uteпов E.B., Aktaev B.G., Aktaeva D.U., Khohlov P.P. Application of "Silent" alloys in engineering of struggle with noise. – Almaty: Shevehenko Small Enterprise, 1999. – p. 79.

68 Сулеев Д.К., Утепов Е.Б., Заликанова И.П. и др. Сплавы с повышенными демпфирующими свойствами для борьбы с шумом соударений; Монография. – Алматы, КазНТУ, 2006. – 311 с.

69 Иванов Н.И., Никифоров А.С. Основы виброакустики. Учебник для вузов – Политехника, Спб., 2000. – 482 с.

67 Алимов Н.П., Васильев Ю.М., Князев А.С., Рыбаков А.Н. Уменьшение шума трубопроводов, возбуждаемых ударными нагрузками. В сб.: Борьба с шумом и звуковой вибрацией – М.: МДНТП им. Ф.Э. Дзержинского, 1974. – С. 164-166.

68 Луканин В.Н. Шум автотракторных двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1971. – 272 с.

69 Siudyla G., Zabawa M. Vibroacustical model of a plate driven by an impulse force. Noise control conference, Warsaw, October 13-15, 1976. – P. 365-368.

70 Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. – Киев: Наукова думка, 1971. – С.104-105.

71 Яковлев А.П., Матвеев В.В. К методике экспериментального изучения демпфирующих свойств материалов при изгибных колебаниях. Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. – Киев: Наукова думка, 1974. – С. 135-139.

72 Патент 1718023 СССР. Способ исследования демпфирующих свойств материалов/ Корягин С. И., Буйлов С. В.; опубл. 07.03.92, Бюл. № 9, – 4 с: ил.

73 Сулеев Д.К., Утепов Е.Б. Демпфирование. Акустика. Колебания: Энциклопедический словарь. – Алматы: Ғылым. – 2002. – 340 с.

74 Москалева Л.Н., Працюк В.А. Исследование акустических свойств сталей, легированных титаном // Проблемы инженерной охраны труда.: сб. науч. тр. Моск. института стали и сплавов, – М.: Metallurgia, 1981. – № 127. – С. 69-74.

75 Акелис М.Э., Бразджионис А.Т., Валангаускас Ю.Д. и др. Акустическая диагностика процессов соударения твердых тел // Кибернетическая диагностика механических систем по виброакустическим процессам: Материалы Всесоюзного симпозиума. – Каунас, 1972. – С. 273-275.

76 Парфенов А.А. К методике определения акустических характеристик металлических материалов // Проблемы инженерной охраны труда.: сб. науч. тр. Моск. института стали и сплавов. – М.: Metallurgia, 1981. – № 127. – С. 75-79.

77 Booth M.L. Materials and methods for noise reduction // Chartered Mechanical Engineering. – 1976. – V. 23. – pp.71–79.

78 Бринза В.Н., Москалева Л.Н., Парфенов А.А. и др. Исследование акустических свойств листовой стали // Изв. Вузов. Черная металлургия. – 1980. – №5. – С. 94-98.

79 Crocker M., Price A. Damping in Plates // Journal Sound and Vibration. – 1969. – IX, N.3. – P. 501-504.

80 Злобинский Б.М., Муравьев В.А. Звукоизлучение чугунов // Метал-

ловед. и терм. обработка металлов. – 1971. – № 11. – С. 49–51.

81 Алиманова М.У., Утепов Е.Б., Кульдеев Е.И., Оржанова Ж.К., Разработка вибродемпфирующих сталей для деталей металлургического оборудования // Металлург. – 2013. – №8. – С. 54-58.

82 Болатбаева Т.А., Утепов Е.Б., Сыдыкова А.Б. и др. Применение биметаллов в промышленности // Десятая Международная научно-техническая конференция «Новое в безопасности жизнедеятельности» (охрана труда, экология, защита человека в ЧС, экономические, правовые аспекты БЖД, логистика). – Алматы: КазНТУ, 2008. – С. 420-422.

83 Bolatbaeva T.A., John J. More, Suleyev D.K., Zhumadilova Zh.O. Characteristics of internal friction of the developed alloys // Вестник КазНТУ. – 2009. – № 1(71). – Р. 46-49.

84 Журавлев В.Н., Николаева О.Н. Машиностроительные стали. Справочник. изд.3-е. Перераб.и доп. – М.:Машиностроение, 1981. – 391 с.

85 Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов: учебник для металлургических специальностей. – М.: Машиностроение, 1983. – 359 с.

86 Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлург,1978. – 648 с.

87 Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.

88 Ю.И.Матросов, Н.И. Карчевская и др. Карбонитриды ниобия и ванадия в малоперлитных сталях // Известия АН СССР: Металлы. – 1975. – №3. – С. 151-155.

89 Большаков В.И., Аскеров Х.А. Карбидообразование и упрочнение строительных сталей с ванадием //Перспективные задачи инженерной науки.GAUDEMUS. – 2001. – С. 115-118.

90 НиТ. Раритетные издания, 1998. Электронная версия. <http://n-t.ru/ri/ps/pb023.htm>.

91 Потапов А.И., Семин А.Е. Технологические особенности легирования стали бором // Известия высших учебных заведений Черная металлургия. – 2012. – № 9. – С. 9-10.

92 Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Лаппо С.И. Борсодержащие стали и сплавы. - М.: Металлургия, 1986, с.72-73.

93 Пат. 2375486 РФ. Лигатура для микролегирования стали бором /Шатохин И.М., Манашев И.Р., Зиатдинов М.Х.; опубл. 10.12.09, Бюл. № 34. – 8с.

94 Химические и физические свойства, применение никеля и никелевых сплавов // <http://www.alfametal.ru/?id=chnik>.

95 Сулеев Д.К., Утепова А.Б., Нурулдаева Г.Ж. Влияние легирующих элементов на демпфирующие свойства сплавов на основе железа. Безопасность жизнедеятельности (охрана труда, защита в чрезвычайных ситуациях, экология) // Сб. науч. публ. – Алматы: КазНТУ, 2005. – С. 4–8.

96 Бондаренко А.П., Калиева А.А.. Биогеохимический потенциал и здоровье: учебно-методическое пособие.– Павлодар, 2007. – Ч.2. – 179 с.

97 Любимов И. М. Редкие элементы и их география. – М.: Просвещение, 1977г. – 110 с.

98 Редкоземельные элементы. Технология и применение / под ред. Виллани Ф. Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1985. – 375 с.

99 Тэн Э.Б., Алиманова М.У., Утепов Е.Б. и др. Демпфирующая легированная сталь // XIV Межд. науч.-техн. конф. «Безопасность техносферы» (охрана труда, защита в ЧС, БЖД, экология, материаловедение демпфирующих сплавов, общетехнические вопросы, экономические и юридические аспекты БЖД) – М.:НИТУ МИСиС, 2013. – Т 1. – С. 56-63.

100 Коваленко И.Н., Филиппова А.А. теория вероятностей и математическая статистика – М.:Высшая школа, 1982. – 256 с.

101 Керженцев В.В., Диденко Л.Г. Математическая обработка и оформление результатов эксперимента – М.: МГУ, 1971. – 110 с.ил.

102 Скороходов Е.А., Законников В.П., Пакнис А.Б. и др. Общетехнический справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 512 с.

103 Утепов Е.Б., Калдыбаева С.Т., Алиманова М.У. Шойындардын демпфирлік және акустикалық қасиетін зерттеу әдістемесі // Вестник КазНТУ – 2011г. – №3(85) – С. 89-93.

104 Утепов Е.Б., Калдыбаева С.Т., Алиманова М.У. Шуды төмендетуге арналған демпфирлік балқымалар // Вестник КазНТУ. – 2011г. – №3(85) – С. 85-89.

105 Утепов Е.Б., Калдыбаева С.Т., Алиманова М.У. Исследование демпфирующих алюминиевых чугунов // Журнал «Ізденіс». – 2011г. – №3. – С. 299-303.

106 Утепов Е.Б., Калдыбаева С.Т., Алиманова М.У. Чугуны с повышенным демпфированием звуковой энергии. Университет еңбектері // Труды университета. – 2011. – №3. – С. 18-20.

107 Утепов Е.Б., Койшигарина Д.Ж., Алиманова М.У. и др. Исследование демпфирующих свойств биметаллов //XIV Межд. науч.-техн. конф. «Безопасность техносферы» (охрана труда, защита в ЧС, БЖД, экология, материаловедение демпфирующих сплавов, общетехнические вопросы, экономические и юридические аспекты БЖД) – М.:НИТУ МИСиС, 2012. – Т 1. – С. 21-23.

108 Утепов Е.Б., Алиманова М.У., Ким Йонг-Иль и др. Демпфирующие биметаллы // XIV Межд. науч.-техн. конф. «Безопасность техносферы» (охрана труда, защита в ЧС, БЖД, экология, материаловедение демпфирующих сплавов, общетехнические вопросы, экономические и юридические аспекты БЖД) – М.:НИТУ МИСиС, 2012. – Т 1. – С. 23-24.

109 Алиманова М.У. Влияние термообработки на эффект затухания шума в структуре сплава // XIV Межд. науч.-техн. конф. «Безопасность техносферы» (охрана труда, защита в ЧС, БЖД, экология, материаловедение демпфирующих сплавов, общетехнические вопросы, экономические и юридические аспекты БЖД) – М.:НИТУ МИСиС, 2012. – Т 1. – С. 27-28.

110 Алиманова М.У. Исследование акустических свойств

коррозионностойких сталей // XIV Межд. науч.-техн. конф. «Безопасность техносферы» (охрана труда, защита в ЧС, БЖД, экология, материаловедение демпфирующих сплавов, общетехнические вопросы, экономические и юридические аспекты БЖД) – М.:НИТУ МИСиС, 2012. – Т 1. – С. 102-104.

111 Алиманова М.У. Математическое моделирование процесса соударения металлических материалов // XIV Межд. науч.-техн. конф. «Безопасность техносферы» (охрана труда, защита ЧС, БЖД, экология, материаловедение демпфирующих сплавов, общетехнические вопросы, экономические и юридические аспекты БЖД) – М.:НИТУ МИСиС, 2012. – Т 1. – С. 104-106.

112 Сулеев Д.К., Утепов Е.Б., Алиманова М.У., Калдыбаева С.Т. Создание демпфирующих сплавов для зубчатых передач // Вестник КазНТУ. – 2012г. – №3(91). – С. 178-184.

113 Сулеев Д.К., Утепов Е.Б., Алиманова М.У., Калдыбаева С.Т. Снижение шума кузнечнопрессового оборудования // Вестник КазНТУ. – 2012г. – №3(91). – С. 184-188.

114 Утепов Е.Б., Нукушова Л.Б., Алиманова М.У. и др. Применение диссипативных металлических материалов // Труды XIV Межд. науч.-техн. конф. “Безопасность техносферы” (охрана труда, защита ЧС, БЖД, экология, материаловедение демпфирующих сплавов, общетехнические вопросы, экономические и юридические аспекты БЖД) – М.:НИТУ МИСиС, 2012. – Т 2. – С. 148-153.

115 Сулеев Д.К., Утепов Е.Б., Алиманова М.У. и др. Направляющая труба токарного автомата с пониженным звукоизлучением // XIV Межд. науч.-техн. конф. “Безопасность техносферы” (охрана труда, защита в ЧС, БЖД, экология, материаловедение демпфирующих сплавов, общетехнические вопросы, экономические и юридические аспекты БЖД) – М.:НИТУ МИСиС, 2012. – Т 3. – С. 135-145.

116 Утепов Е.Б., Алиманова М.У., Тен Э.Б. Снижение шума кулачковых механизмов за счет демпфирующих сплавов // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических прикладных исследований-2013». – Одесса: КУПРИЕНКО, 2013 – Выпуск 1. Том 6 – 134 с.

117 Alimanova Madina, Young-II Kim. Damping Steel Alloyed with Vanadium and Chromium for Reducing noise in Mechanical Engineering // Modern Challenges and Decisions of Globalization. International Conference. – New York, USA, 2013. – Part 2. – P. 20-23.

118 Бернштейн М.Л., Займовский В.А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 494 с.

119 Блюменауэр Х., Ворх Х., Гарц И. и др. Испытание материалов. Справочник. – М.: Металлургия, 1979. – 448 с.

120 Сулеев Д.К., Утепов Т.Е., Урикбаева Г.А., Утепова Г.Е. Применение демпфирующих наноструктурных материалов в технике борьбы с шумом и вибрацией. – Алматы: "КазНТУ имени К.И.Сатпаева", 2008. – 76с.

121 Андреев А.А., Саблев Л.П., Шулаев В.М. и др. Вакуумно-дуговые

- устройства и покрытия. Монография. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.
- 122 Anders A. Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition//John Wiley & Sons, New York. – 2000. – P. 435.
- 123 Аксенов И.И., Белоус В.А., Падалка В.Г. и др. Перемещение плазменных потоков в криволинейных плазмооптических системах // Физика плазмы. – 1978. – № 4. – С. 425-428.
- 124 Aksenov I.I., Andreye A.A., Bren V.G. and others. Vacuum Coating Obtained by Condensation of Plasma Flows in Vacuum: The Method of Condensation with Ionic Bombardement // Украинский физический журнал. – 1979. – № 24. – С. 108-114.
- 125 Огородников А.С. Моделирование в среде Matlab-COMSOL 3.5a. Часть 1: учеб. пос. – Томск: Изд-во ТГУ, 2012. – 310 с.
- 126 Егоров В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности: учеб. пос. – М.: СПб ГУ ИТМО, 2006. – С.4.
- 127 Хикс Ч. Основные принципы планирования эксперимента. – М.: Мир, 1967. – 406 с., ил.
- 128 Люмарок Е.Н., Новик Ф.С., Повар В.И., Погодина-Алексеева К.М. Математико-статистический метод для изучения влияния легирования на свойства цементуемых сталей // Металловед. и терм. обр-ка металлов. – 1977. – №1. – С.27-32.
- 129 Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металлведении. Раздел III. Выбор параметров оптимизации и факторов. – М.: Моск. ин-тут стали и сплавов, 1971. – 106 с.
- 130 Переверзев В.М., Колмыков В.И. Влияние режимов цементации и последующей закалки на склонность к разрушению стали ХВГ // Металловед. и терм. обработка металлов. – 1979. – №1. – С. 16-18.
- 131 Адлер Ю.И., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1971. – 284 с.
- 132 Корилов А.М. Математические методы планирования эксперимента. – Томск: Изд-во Томский университет, 1973. – 281 с.
- 133 Колобнев Н.И., Дольжанский Ю.М., Хохлатова Л.Б. и др. Исследования особенностей кинетики старения методами планирования эксперимента // Металловед. и терм. обр-ка металлов. – 1980. – № 2. – С. 53-55.
- 134 Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследование многокомпонентных систем. – М.: Наука, 1976. – 390 с., ил.
- 135 Должанский Ю.М. Использование метода симплексных решёток при выборе оптимальных режимов термической обработки // Металловед. и терм. обр-ка металлов. – 1977. – № 8. – С. 13.
- 136 Челышев Н.А., Щекурская Л.В., Ардовский Ф.П. Изменение модуля упругости и внутреннего трения графитизированной стали в зависимости от температуры // Металловед. и терм. обр-ка металлов. – 1978. – № 11. – С. 60-62.
- 137 Шефтель Б.Т., Липский Г.К., Ананов П.П. и др. Исследование шума в зубчатых передачах методом математического планирования экспериментов // Кибернетическая диагностика механических систем по виброакустическим

процессам: Материалы всесоюзного симпозиума, под ред. К.М. Рагульскис, Каунас, 1972. – с.108-110.

138 Большев Л.Н., Смирнов К.В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1968. – 464 с.

139 Гудремон Э. Специальные стали. – М.: Металлургиздат, 1959-1960. – Т. 1, 2. – 938 с.

140 Моисеев В.Н., Должанский Ю.М., Захаров Ю.И. и др. Исследование структуры и свойств титанового сплава системы Ti-Al-Mo-V-Fe-Cu-Zr-Sn // Металловед. и терм. обр-ка металлов. –1979. – № 11. – С. 59-61.

141 Кондратов В.М., Семеновских В.М., Скворцов А.И. Применение метода математического планирования эксперимента при разработке графитизированных сталей с повышенными демпфирующими свойствами // Физика металлов и металловедение. – 1979. – Т. 48, вып. 6. – С. 1197-1200.

142 Лоули Д., Максвелл А. Факторный анализ как статистический метод. – М.: Мир, пер. с англ. Ю.Н. Благовещенского, 1967. – 144 с.

143 Бринза В.Н., Москалева Л.Н., Утепов Е.Б. Исследование акустических характеристик конструкционных сталей // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1981. – № 7. – С. 94-96.

144 Фавстов Ю.К., Шульга Ю.Н. Сплавы с высокими демпфирующими свойствами. – М.: Металлургия, 1973. – 256 с.

145 Фавстов Ю.К., Шульга Ю.Н., Рахштадт Г.М. Металловедение высокодемпфирующих сплавов. – М.: Металлургия, 1980. – 272 с.

146 Утепов Е.Б., Утепова Г.Е., Заликанова И.П. и др. Изучение акустических и диссипативных свойств новой демпфирующей стали марки КК – 4 // Безопасность жизнедеятельности (охрана труда, защита человека в ЧС, экономические, правовые и психологические аспекты БЖД, экологии): сб. науч. публ. Выпуск 3. – Алматы: КазНТУ, 2007. – С. 49-52.

147 Определение эффективности мероприятий по улучшению условий труда. Межотраслевые методические рекомендации. Научно-исследовательский институт труда Государственного комитета по труду и социальным вопросам. – М.: 1979. – 60 с.

148 Методика (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. – М.: Экономика, 1977. – 56 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 - Обработка экспериментальных данных акустических характеристик стали 20ХНР при соударении с шаром-ударником $d_1=9,5$ мм

Частоты, Гц	Эксперименталь- ные данные УЗД, дБ	Среднее значение \bar{X}	Отклонение каждого наблюдени d_i	Дисперсия опыта S	Средне квадратичное отклонение \bar{S}^2	Коэффициент вариации v
1000	46	45	+1	6,76	2,6	0,03
	45		0			
	47		+2			
	44		-1			
	43		-2			
2000	46	48	-2	0,72	0,85	0,034
	48		0			
	49		+1			
	49		+1			
	48		0			
4000	61	62	-1	1,96	1,4	0,028
	63		+1			
	62		0			
	62		0			
	63		+1			
8000	59	60	-1	1,96	0,4	0,015
	61		+1			
	60		0			
	61		+1			
	60		0			
16000	55	56	-1	0,14	0,38	0,02
	57		+1			
	54		-2			
	58		+2			
	56		0			
31500	48	48	0	0,12	0,35	0,018
	51		+3			
	49		+1			
	45		-3			
	47		-1			
А	63	66	-3	1,21	1,1	0,012
	65		-1			
	68		+2			
	70		+4			
	64		-2			

Таблица А.2 - Обработка экспериментальных данных акустических характеристик стали 20ХНР соударении с шаром-ударником $d_2=12,7$ мм

Частоты, Гц	Эксперименталь- ные данные УЗД, дБ	Среднее значение \bar{X}	Отклонение каждого наблюдени d_i	Дисперсия опыта S	Средне квадратичное отклонение \bar{S}^2	Коэффициент вариации v
1000	50 48 45 47 45	47	+3 +1 -2 0 -2	0,5	0,7	0,0154
2000	55 53 52 54 51	53	+2 0 -1 +1 -2	0,2	0,4	0,03
4000	64 68 66 61 66	65	-1 +3 +1 -4 +1	1,7	1,3	0,028
8000	68 66 69 67 65	67	+1 -1 +2 0 -2	0,09	0,3	0,011
16000	65 67 66 64 68	66	-1 +1 0 -2 +2	2,24	1,2	0,012
31500	45 43 44 46 47	45	0 -2 -1 +1 +2	2,61	1,6	0,04
A	67 65 69 70 69	68	-1 -3 +1 +2 +1	1,87	1,4	0,03

Таблица А.3 - Обработка экспериментальных данных акустических характеристик стали 20ХНР при соударении с шаром-ударником d=15,2 мм

Частоты, Гц	Эксперименталь- ные данные УЗД, дБ	Среднее значение \bar{X}	Отклонение каждого наблюдени d_i	Дисперсия опыта S	Средне квадратичное отклонение \bar{S}^2	Коэффициент вариации ν
1000	44 43 47 45 46	45	+1 +1 +2 -2 -2	3,2	1,8	0,02
2000	65 64 65 63 63	64	-1 -2 -3 +3 +3	5,4	2,3	0,03
4000	76 73 74 74 73	74	-1 +1 0 +1 -1	0,6	0,77	0,01
8000	73 71 72 70 74	72	+1 -1 0 -2 +2	2,1	1,45	0,02
16000	65 68 67 66 69	67	-2 +1 0 -1 +2	2,3	1,5	0,03
31500	49 47 48 46 50	48	+1 -1 0 -2 +2	1,8	1,34	0,02
A	74 75 73 70 73	73	+1 +2 0 -3 0	1,1	1,05	0,02

Таблица А.4 - Обработка экспериментальных данных акустических характеристик стали 20ХНР при соударении с шаром-ударником d=18,3 мм

Частоты, Гц	Эксперименталь- ные данные УЗД, дБ	Среднее значение \bar{X}	Отклонение каждого наблюдени d_i	Дисперсия опыта S	Средне квадратичное отклонение \bar{S}^2	Коэффициент вариации v
1000	53	54	-1	1,33	1,15	0,01
	53		-1			
	54		0			
	54		0			
	56		+2			
2000	67	68	-1	3,6	1,89	0,04
	69		+1			
	68		0			
	70		+1			
	66		-2			
4000	77	79	-2	0,98	0,99	0,02
	79		0			
	80		+1			
	79		0			
	80		+1			
8000	76	77	-1	1,5	1,22	0,01
	79		+2			
	76		-1			
	77		0			
	77		0			
16000	66	67	-1	0,8	0,89	0,05
	68		+1			
	67		0			
	68		+1			
	66		-1			
31500	66	66	0	0,9	0,95	0,01
	65		-1			
	67		+1			
	67		+1			
	65		-1			
А	77	77	0	2,1	1,45	0,04
	79		+2			
	76		-1			
	76		-1			
	77		0			

Таблица А.5 - Обработка экспериментальных данных акустических характеристик стали 3М при соударении с шаром-ударником d=9,5 мм

Частоты, Гц	Эксперименталь- ные данные УЗД, дБ	Среднее значение \bar{X}	Отклонение каждого наблюдени d_i	Дисперсия опыта S	Средне квадратичное отклонение \bar{S}^2	Коэффициент вариации v
1000	46	47	-1	0,38	0,62	0,03
	45		-2			
	47		0			
	49		+2			
	50		+1			
2000	48	50	-2	4,45	2,11	0,04
	50		0			
	51		+1			
	51		+1			
	50		0			
4000	51	51	0	7,02	2,65	0,04
	52		+1			
	51		0			
	49		-2			
	52		+1			
8000	57	55	+2	1,23	1,11	0,01
	56		+1			
	53		-2			
	55		0			
	54		-1			
16000	51	50	+1	0,6	0,77	0,02
	48		-2			
	51		+1			
	49		-1			
	51		+1			
31500	50	51	-1	0,9	0,95	0,01
	51		0			
	48		-2			
	54		+3			
	51		0			
A	55	54	+1	0,1	1,02	0,01
	52		-2			
	57		+3			
	54		0			
	52		-2			

Таблица А.6 - Обработка экспериментальных данных акустических характеристик стали 3М при соударении с шаром-ударником d=12,7 мм

Частоты, Гц	Эксперименталь- ные данные УЗД, дБ	Среднее значение \bar{X}	Отклонение каждого наблюдени d_i	Дисперсия опыта S	Средне квадратичное отклонение \bar{S}^2	Коэффициент вариации v
1000	56	56	0	0,41	0,64	0,25
	54		-2			
	59		+3			
	54		-2			
	57		+1			
2000	55	54	+1	0,05	0,22	0,01
	55		+1			
	55		+1			
	53		-1			
	52		-2			
4000	62	60	+2	0,42	0,65	0,03
	58		-2			
	61		+1			
	60		0			
	59		-1			
8000	71	68	+3	4,45	2,11	0,04
	67		-1			
	68		0			
	67		-1			
	67		-1			
16000	72	71	+1	6,01	2,45	0,03
	69		-2			
	73		+2			
	71		0			
	70		-1			
31500	53	55	-2	2,76	1,66	0,03
	56		+1			
	56		+1			
	55		0			
	55		0			
А	67	69	-2	1,46	1,21	0,05
	69		0			
	71		+2			
	68		-1			
	70		+1			

Таблица А.7 - Обработка экспериментальных данных акустических характеристик стали 3М при соударении с шаром-ударником d=15,2 мм

Частоты, Гц	Эксперименталь- ные данные УЗД, дБ	Среднее значение \bar{X}	Отклонение каждого наблюдени d_i	Дисперсия опыта S	Средне квадратичное отклонение \bar{S}^2	Коэффициент вариации v
1000	50	52	-2	1,96	1,4	0,04
	55		+3			
	51		-1			
	53		+1			
	51		-1			
2000	61	60	+1	0,42	0,65	0,02
	61		+1			
	58		-2			
	59		-1			
	61		+1			
4000	68	66	+2	2,02	1,42	0,02
	66		0			
	65		-1			
	64		-2			
	65		+1			
8000	75	75	0	0,42	0,65	0,01
	74		-1			
	76		+1			
	76		+1			
	74		-1			
16000	68	70	-2	0,66	0,81	0,01
	72		+2			
	70		0			
	71		+1			
	69		-1			
31500	57	57	0	2,72	1,65	0,03
	55		-2			
	58		+1			
	58		+1			
	57		0			
A	71	72	-1	1,14	1,07	0,02
	71		-1			
	73		+1			
	73		+1			
	72		0			

Таблица А.8 - Обработка экспериментальных данных акустических характеристик стали 38ХНЗМФА при соударении с шаром-ударником d=18,3 мм

Частоты, Гц	Эксперименталь- ные данные УЗД, дБ	Среднее значение \bar{X}	Отклонение каждого наблюдени d_i	Дисперсия опыта S	Средне квадратичное отклонение \bar{S}^2	Коэффициент вариации v
1000	52	54	-2	0,38	0,62	0,02
	55		+1			
	55		+1			
	55		+1			
	53		-1			
2000	62	62	0	0,56	0,75	0,03
	64		+2			
	63		+1			
	60		-2			
	61		-1			
4000	66	65	+1	0,26	0,51	0,04
	64		-1			
	65		0			
	63		-2			
	67		+2			
8000	75	78	-3	0,41	0,64	0,01
	77		-1			
	80		+2			
	78		0			
	80		+2			
16000	67	69	-2	0,1	0,34	0,04
	71		+2			
	70		+1			
	68		-1			
	69		0			
31500	59	59	0	0,72	0,85	0,01
	60		+1			
	57		-2			
	58		-1			
	61		+2			
A	78	75	+3	0	0	0,01
	74		-1			
	74		-1			
	76		+1			
	73		-2			

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



Рисунок Б1 - Постановка задачи моделирования цилиндрического образца (втулки) опытного сплава ЗМ

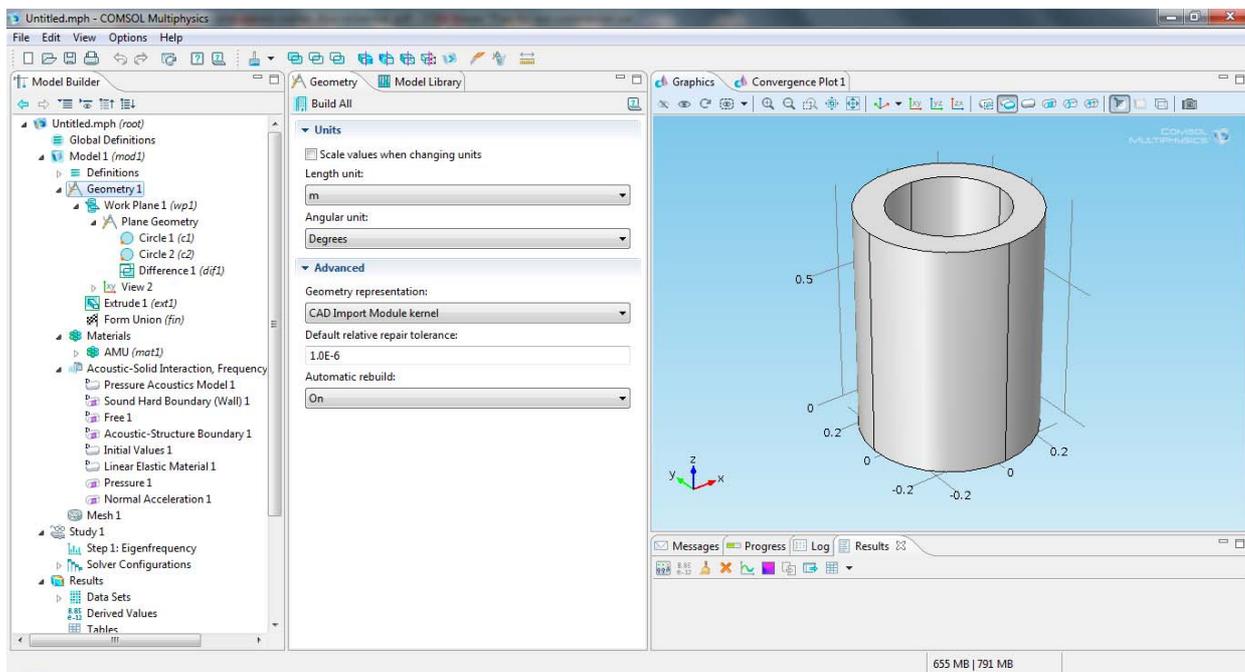


Рисунок Б2 - Задание параметров образца для начала моделирования

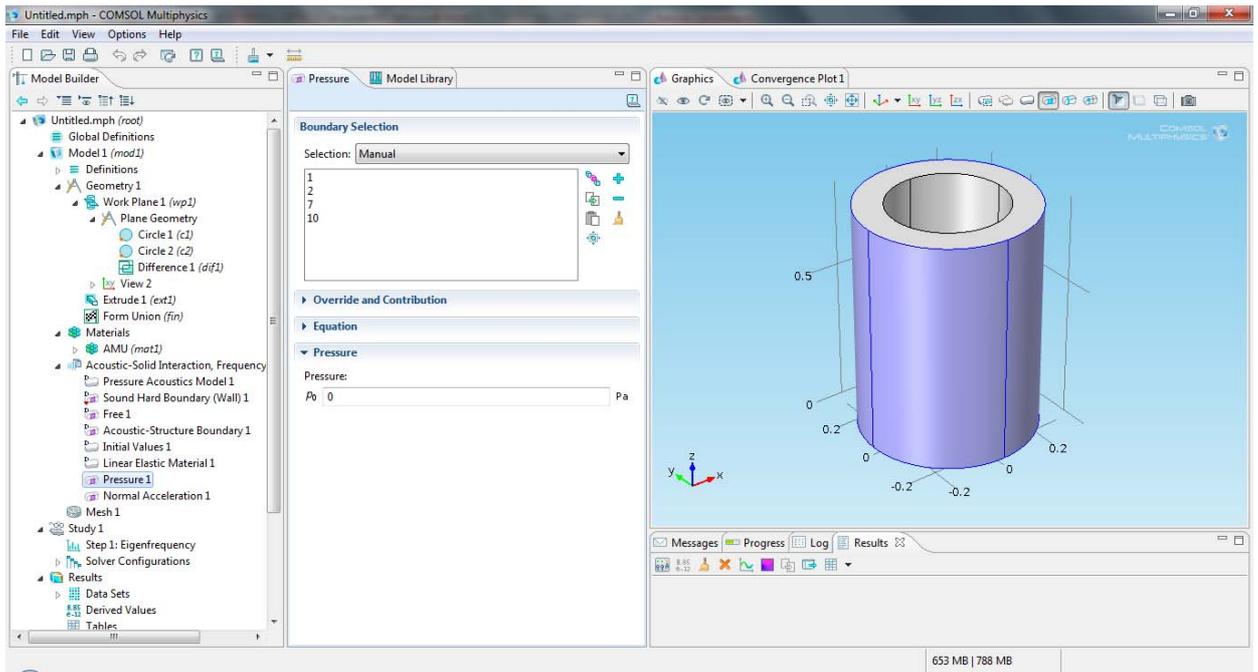


Рисунок Б3 - Задание начальных условия численного моделирования

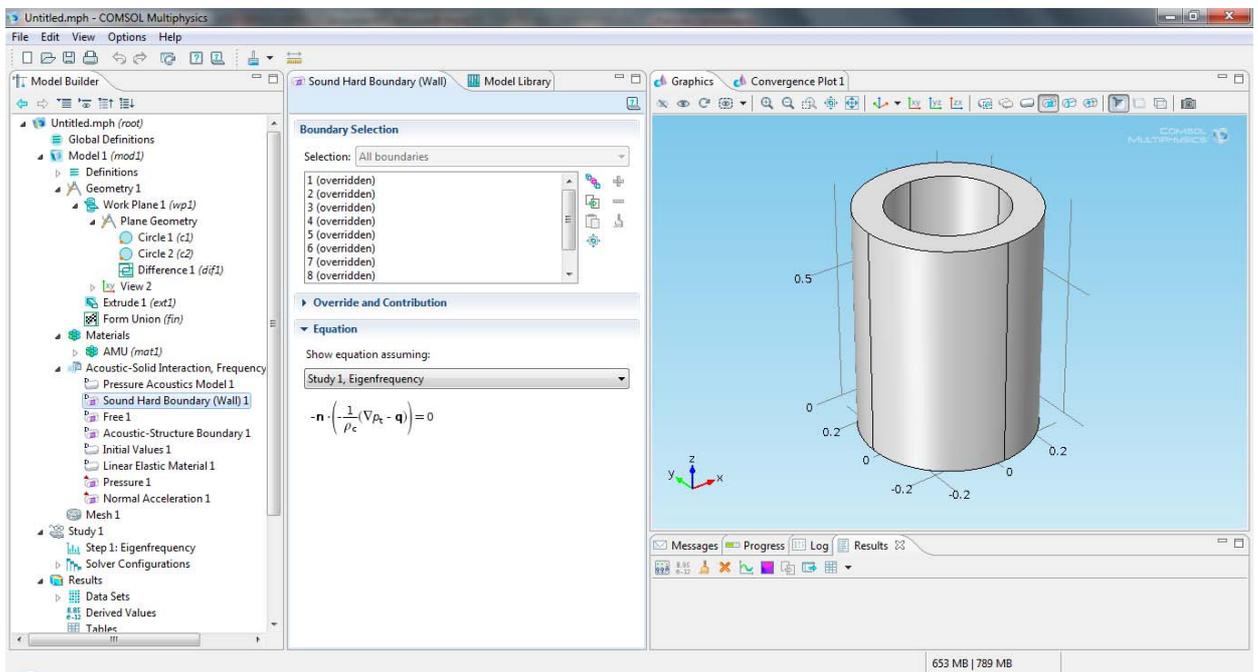


Рисунок Б4 - Задание граничных условия численного моделирования

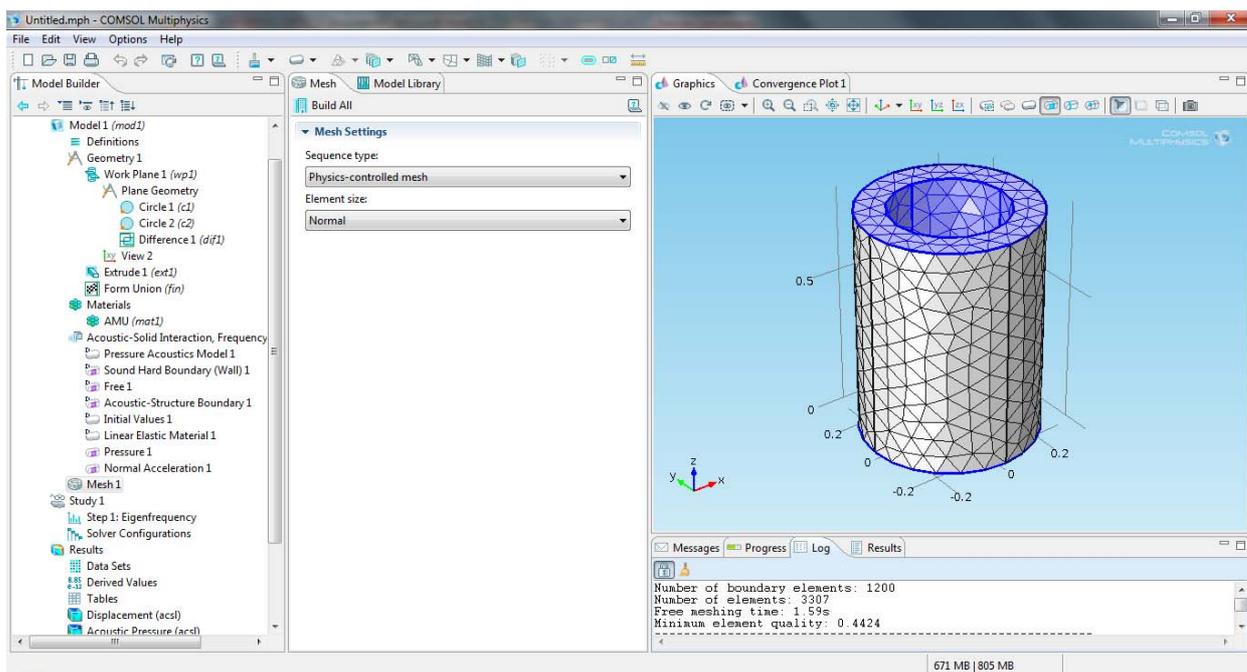


Рисунок Б5 - Разбитие образца на сетку

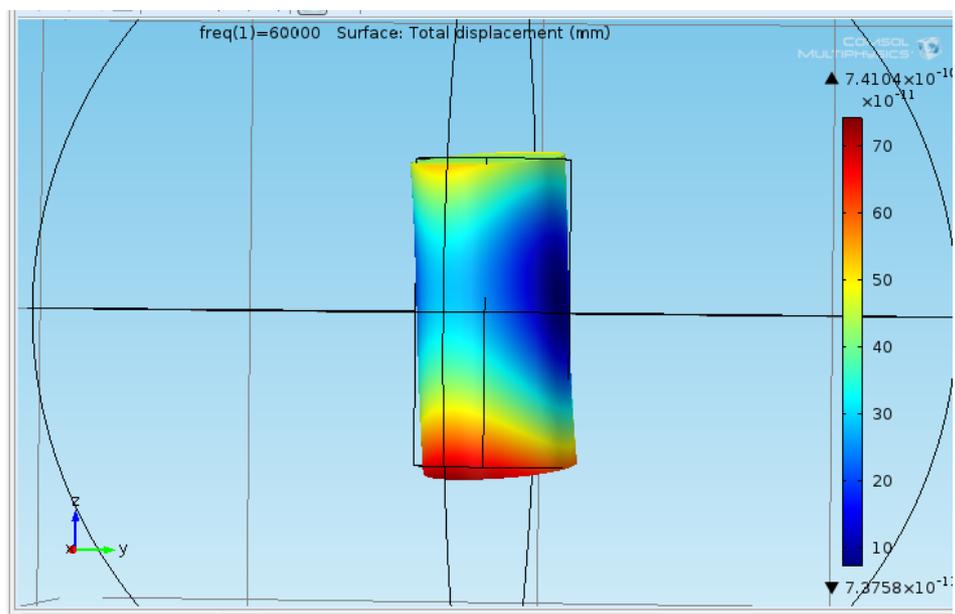


Рисунок Б6 - Имитационная модель образца (втулки)

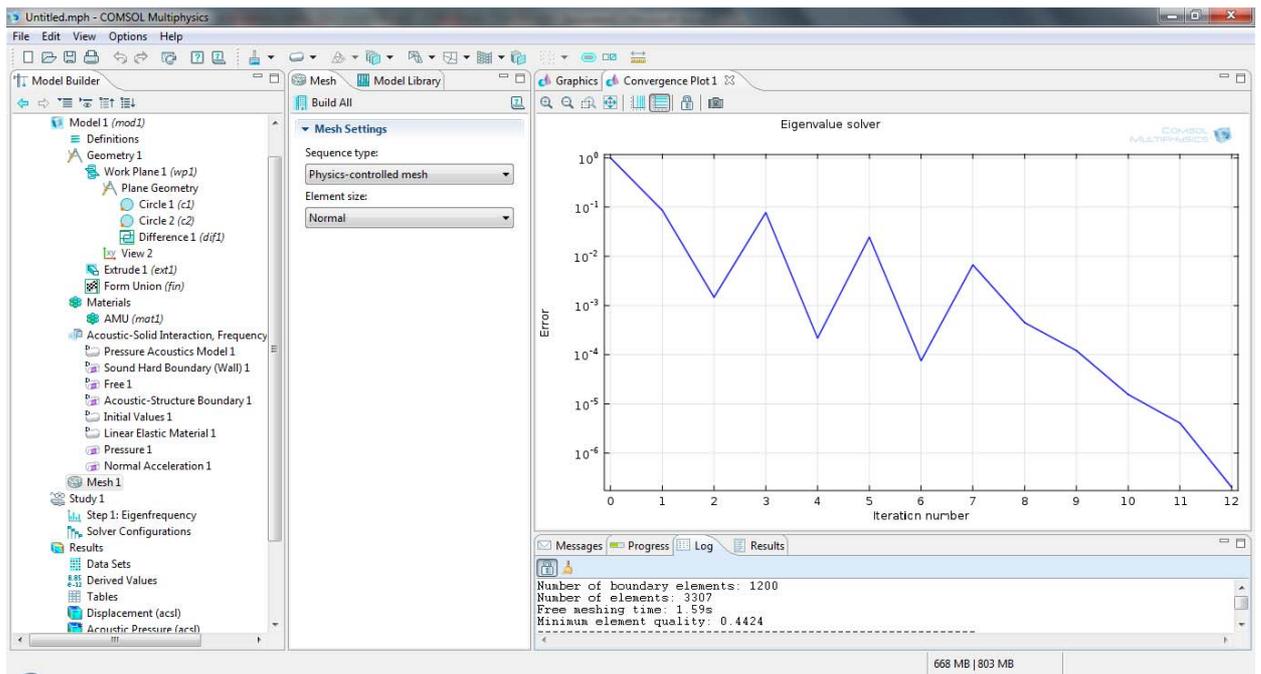


Рисунок Б7 - Кривая итерации вычислений, где количество итеративного вычисления равно 12, а ошибка значений павна 10^{-6}

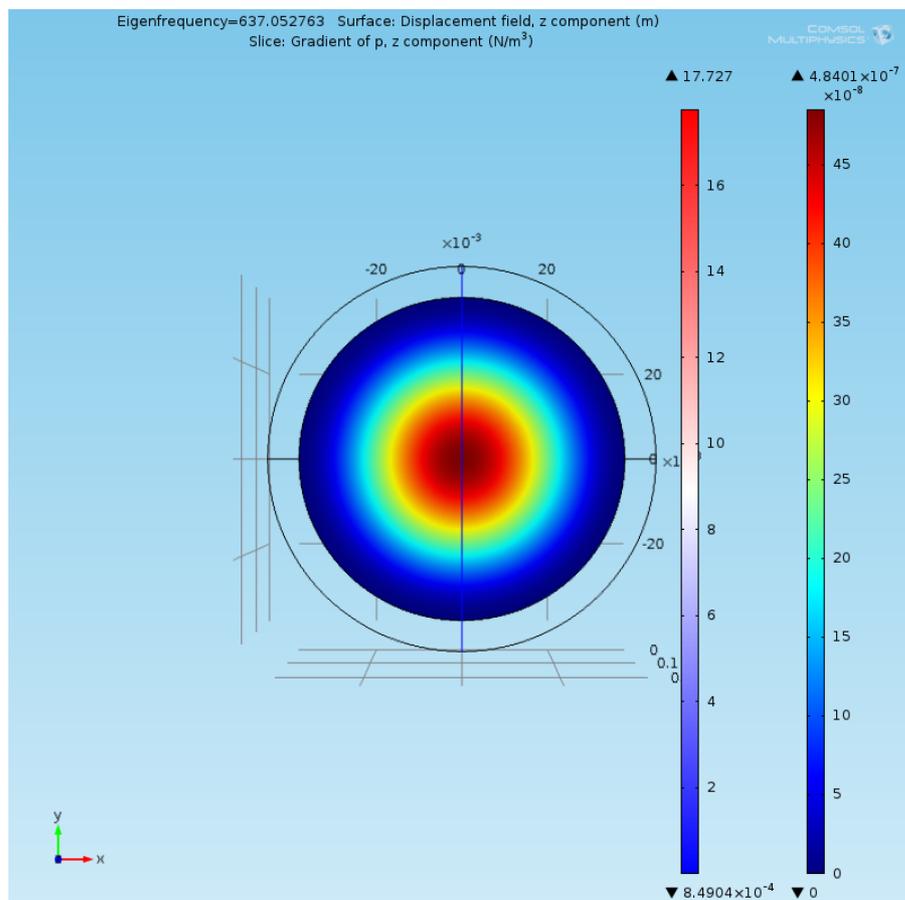


Рисунок Б8 - Процесс полного вибропоглощения в полости образца (втулки)

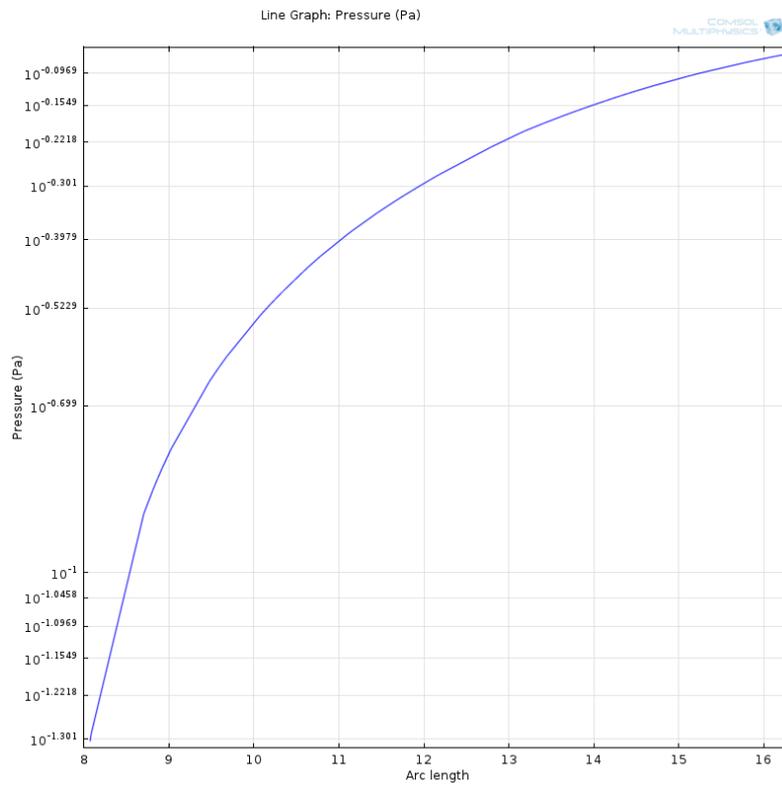


Рисунок Б9 - Кривая воздействия звукового давления на образец (втулку)

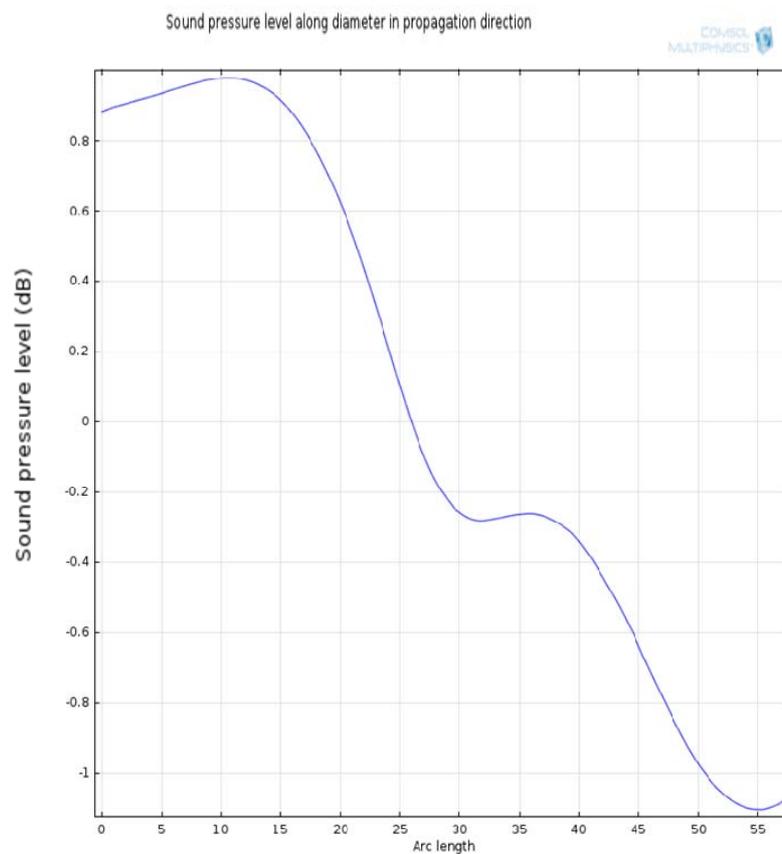


Рисунок Б10 - Кривая затухания звуковой волны в образце (втулке)

ПРИЛОЖЕНИЕ В

УТВЕРЖДАЮ

Директор ТОО

«Стройтехносервис LTD»

Кравцова В.А.

«01» августа 2013 г.

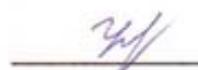


АКТ

О внедрении в производство результатов научной работы докторанта Алимановой М.У.

Мы, нижеподписавшиеся, представитель ТОО «Стройтехносервис LTD» – инженер, Калдин А.Н. и представители Казахского национального технического университета имени К.И. Сатпаева доктор технических наук, профессор Утепов Е.Б. и докторант PhD Алиманова М.У. составили настоящий акт о том, что разработанные сплавы АМУ1 (0,21% С; 0,8% Мп; 0,055% Мо; 0,9% Cr; 0,5% Ni; 0,21 % V; 0,002% В; остальное – железо) и АМУ2 (0,31% С; 0,43% Мп; 0,7% Cr; 2,8% Ni; 0,32 % V; 0,002% В; остальное – железо), были испытаны на производстве, и детали из этих сплавов обеспечили снижение шума на 5-8 дБА (втулки направляющей трубы токарного автомата).

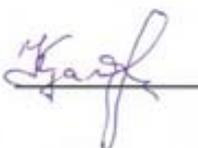
Представители
КазНТУ имени К.И. Сатпаева:
д.т.н., профессор

 Утепов Е.Б.

докторант

 Алиманова М.У.

Представитель
«Стройтехсервис LTD»,
инженер

 Калдин А.Н.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной и
инновационной деятельности
КазНТУ имени К.И. Сатпаева
Кульдеев Е.И.
2013 г.



«УТВЕРЖДАЮ»

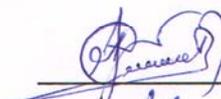
Директор Института
промышленной инженерии
имени А. Буркитбаева
Гурдалиев А.Т.
2013 г.

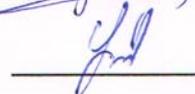


АКТ

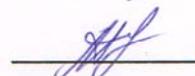
О внедрении в учебный процесс результатов научной работы докторанта Алимановой М.У.

Мы, нижеподписавшиеся, представители Института промышленной инженерии КазНТУ имени К.И. Сатпаева – зав.каф. «СМиТМП», А.Р. Сейткулов; д.т.н., профессор Е.Б. Утепов; ст. преподаватель А.Т. Мадиджанова и докторант PhD М.У. Алиманова, составили настоящий акт о том, что разработанные сплавы 1М (0,21% С, 0,8% Mn, 0,9% Cr, 0,5% Ni, 0,005% В, остальное – железо) и 3М (0,4% С; 0,5% Mn; 1,76% Cr; 3,5% Ni; 0,25 % V; 0,005% В; остальное – железо) использованы при проведении занятий по дисциплине «Механические и физические свойства материалов» для студентов 2 курса специальности 5В0710 – Материаловедение и технология новых материалов.

 А.Р. Сейткулов

 Е.Б. Утепов

 А.Т. Мадиджанова

 М.У. Алиманова

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Генеральный директор
ТОО «КазТоргПром Company»
Потинга С. М.
«25» мая 2013 г.



АКТ

О внедрении в производство результатов научной работы докторанта Алимановой М.У.

Мы, нижеподписавшиеся, представитель ТОО «КазТоргПром Company» – генеральный директор Потинга С.М. и представители Казахского национального технического университета имени К.И. Сатпаева доктор технических наук, профессор Утепов Е.Б. и докторант PhD Алиманова М.У. составили настоящий акт о том, что разработанный сплав 3М (0,40% углерода; 3,5% никеля; 0,5% марганца; 1,76% хрома; 0,25% ванадия; 0,005% бора, остальное – железо) был испытан на производстве, и детали из этого сплава обеспечили снижение шума на 6-10 дБА (втулки направляющей трубы токарной установки).

Ожидаемый годовой экономический эффект составил 1 387 000 (один миллион триста восемьдесят семь тысяч) тенге.

Представители
КазНТУ имени К.И. Сатпаева:
д.т.н., профессор


Утепов Е.Б.

докторант


Алиманова М.У.

Представитель
ТОО «КазТоргПром Company»


Потинга С. М.

