

СУЛЕЕВ Д.К., УТЕПОВ Т.Е., УРИКБАЕВА Г.А., УТЕПОВА Г.Е.

**ПРИМЕНЕНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ
НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В
ТЕХНИКЕ БОРЬБЫ С ШУМОМ И ВИБРАЦИЕЙ**

СУЛЕЕВ Д.К., УТЕПОВ Т.Е., УРИКБАЕВА Г.А., УТЕПОВА Г.Е.

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕХНИКЕ БОРЬБЫ С ШУМОМ И ВИБРАЦИЕЙ

Под общей редакцией академика НАН РК, доктора технических наук,
профессора Сулеева Д.К.

АЛМАТЫ 2008

УДК 628.517
ББК 31.2
А 44

Рецензент: доктор технических наук М.М. Хакдодов

Сулеев Д.К., Утепов Т.Е., Урикбаева Г.А., Утепова Г.Е.

Под общей редакцией академика НАН, доктора технических наук,
профессора Сулеева Д.К.

- А 44 Применение демпфирующих наноструктурных материалов в технике борьбы с шумом и вибрацией. – Алматы: «КазНТУ имени К.И. Сатпаева», 2008. - 62 с.
ISBN 9965-01-575-9

В монографии представлен материал по исследованию демпфирующих свойств металлических материалов, в том числе с нанопокрывом Al-Ti-N. Приведены сведения о нанотехнологии, классификация наноструктурных материалов, результаты исследования акустических свойств инструментальных сталей, способ получения наноструктурных покрытий, экспериментальные данные по исследованию демпфирующих и акустических свойств металлических материалов. Показаны сравнительные характеристики инструментальных сталей У7, У8А, У9А до и после нанесения нанопокровов.

Показаны графики зависимости уровней звукового давления от модуля Юнга, уровней виброускорения от удельного электросопротивления и др.

Монография представляет интерес для ученых, специалистов (материаловеды, инженеры-механики, акустики, инженеры по ТБ), и магистрантов, студентов высших технических учебных заведений.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Шум и вибрация – вредные факторы производства	7
1.1 Воздействие производственного шума и вибрации на работающих	7
1.2 Известные способы гашения шума ударного происхождения	12
1.3 Использование демпфирующих металлических материалов в технике борьбы с производственным шумом	13
1.4 Задачи исследования	15
2 Нанотехнология в промышленности	17
2.1 Формирование нанотехнологии	17
2.2 Возникновение и развитие нанотехнологии	18
2.3 Классификация наноструктурных материалов	20
2.3.1 Общая характеристика	20
3 Получение нанопокровов на поверхности инструментальной стали	26
3.1 Процессы физического осаждения покровов (PVD)	26
3.2 Анализ возможностей совершенствования процессов (PVD)	27
3.3 Оборудование для нанесения наноструктурных ионноплазменных покровов и стадии осуществления процесса	30
3.3.1 Установка ионноплазменного нанесения покровов	30
3.4 Стадии процесса синтеза наноструктурных покровов	32
4 Изготовление образцов из инструментальной стали и исследование демпфирующих и акустических свойств	35
4.1 Материал и его обработка	35
4.2 Исследование акустических свойств сталей	35
4.3 Определение внутреннего трения	37
5 Экспериментальные результаты по исследованию акустических свойств наноструктурных материалов	40
5.1 Исследование акустических свойств инструментальных сталей	40
5.2 Механизмы затухания колебаний в инструментальных сталях	46
5.2.1 Механизмы демпфирования в инструментальных сталях	47
5.3 Характеристики диссипации инструментальных сталей	50
Заключение	56
Список использованных источников	58

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня нанотехнология – это одно из новых направлений в науке и инженерии, которое может стать основным локомотивом конкурентоспособной промышленности, особенно если будут созданы условия для оперативного внедрения нанотехнологий с целью создания высококачественного рынка новых товаров и услуг.

Нанотехнологии – одно из ключевых направлений развития промышленности и прогресса общества. Их развитие – это путь к управляемому синтезу молекулярных структур, который призван обеспечить получение объектов любого назначения не из обычных сырьевых ресурсов, а непосредственно из атомов и молекул с помощью машин-сборщиков, оборудованных системами искусственного интеллекта. По оценкам экспертов нанотехнологии стали важнейшим направлением технологического развития лидирующих мировых держав XXI века. Будучи возведенными в ранг приоритетных национальных задач, эти принципиально новые технологии создают общий импульс для развития других отраслей промышленности по пути существенного улучшения характеристик и миниатюризации изделий.

Общемировые затраты на нанотехнологические проекты сейчас составляют несколько миллиардов долларов в год. В развитых странах осознание ключевой роли, которую уже в недалеком будущем будут играть результаты работ по нанотехнологиям, привело к разработке широкомасштабных программ по их развитию и государственной поддержке. Так, в 2000г в США принята приоритетная долгосрочная комплексная программа, названная Национальной нанотехнологической инициативой и рассматриваемая как эффективный инструмент, способный обеспечить лидерство США в первой половине текущего столетия. Бюджетное финансирование Национальной нанотехнологической инициативы в 2004 г. достигло 889 млн. долларов, а на четыре года, начиная с 2005 г., планируется выделить еще 3.7 млрд. долларов.

Страны Европейского Союза пошли по пути развития научно-технического потенциала путем интеграции усилий всех стран-участников ЕС. Механизмом интеграции стала 6-я Рамочная программа, в бюджете которой на нанотехнологии и близкие к ним по тематике биотехнологии на период 2003-2006 гг. выделено 3.55 млрд. евро. В последние годы в лидеры нанотехнологий стремительно выходит Китай. В пятилетнем плане на 2001-2005 гг. китайское правительство выделило на становление нанонауки 300 млн. долларов США. В стране быстро увеличивается количество патентов, относящихся к сфере нанотехнологий. Уже в 2000г по этому показателю Китай занял 3-е место в мире, уступая лишь США и Японии. В настоящее время Китай по целому ряду разработок в области нанотехнологий приблизился или достиг передового мирового уровня. В ожидании громадного рынка в

мире резко возросла инвестиционная активность крупных корпораций. К научным и прикладным разработкам в области нанотехнологий подключились все ведущие мировые университеты.

По существующим прогнозам, в период 2010-2015 гг. мировой науке и промышленности потребуется не менее 2-3 млн. специалистов в области нанотехнологий. Подготовка таких специалистов в технологически продвинутых странах ведется уже давно и полным ходом.

Одной из новых сфер использования наноструктурных материалов является техника борьбы с шумом и вибрацией. Использование демпфирующих металлических и неметаллических материалов для снижения шума и вибрации работающей машины уже недостаточно для обеспечения нормальных условий труда, поэтому у авторов появилась идея (впервые в СНГ) использование нанотехнологии в технике борьбы с шумом.

В работе стальные образцы подвергались процессу физического осаждения, (PVD) который основан на генерации вещества катодным пятном вакуумной дуги сильноточного, низковольтного разряда, развивающегося в парах (Ti-N-Al) материала катода в вакуумной камере, металлический корпус которой служит анодом.

Исследования показали, что образцы с нанопокрытием (Ti-N-Al) обеспечивают не только повышение прочностных свойств инструментальной стали, но и улучшение демпфирующих свойств.

1 ШУМ И ВИБРАЦИЯ – ВРЕДНЫЕ ФАКТОРЫ ПРОИЗВОДСТВА

1.1 Воздействие производственного шума и вибрации на работающих

Уровень производственного шума и вибраций вырос в связи с ростом мощностей и скоростей машин и механизмов. Шум находится в числе лидирующих факторов загрязнения окружающей среды, при этом уровень шума, воздействующий на человека, удваивается каждые 10 лет [1].

Источником шума является любой процесс, вызывающий местное изменение давления или механические колебания в твердых, жидких или газообразных средах. Действие его на организм человека связано главным образом с применением нового, высокопроизводительного оборудования, с механизацией и автоматизацией трудовых процессов, переходом на большие скорости при эксплуатации различных станков и агрегатов. Источниками шума могут быть двигатели, насосы, компрессоры, турбины, пневматические и электрические инструменты, молоты, дробилки, станки, центрифуги, бункеры и прочие установки, имеющие движущиеся детали. Кроме того, за последние годы в связи со значительным развитием городского транспорта возросла интенсивность шума и в быту, поэтому как неблагоприятный фактор он приобрел большое социальное значение.

Обзор современных работ показывает, что шум в окружающей среде – это очень большая проблема [2,3].

Уровень промышленных шумов, дБ, характеризуется ориентировочно следующими величинами [2];

Ударный шум

Кузнечный цех	98
Обрубочное отделение литейного цеха	99-115
Очистные барабаны литейного цеха	108-113
Галтовочные барабаны	120
Штамповочный цех	112
Клепальный цех	117

Механический шум

Станок:

токарный	93-96
обдирочный	93-105
строгальный	97
шлифовальный	05
ткацкий.....	102-105

Аэродинамический шум

Центробежные вентиляторы	105
Турбокомпрессорный вал	118
Компрессорная станция	110
Реактивные двигатели (на расстоянии 2-3 м от выхлопа).....	140

Шум в 130 дБ вызывает у человека болевые ощущения, а в 150 дБ становится невыносимым. Шум в 180 дБ вызывает усталостное разрушение металлов, а в 190 дБ вырывает заклепки из конструкций.

Статистика показывает, что около 80% поломок и аварий в машиностроении являются следствием резонансных колебаний. Значительно возрос в последние годы уровень промышленных шумов и вибраций.

Борьба с шумами и вибрациями в технике является сейчас одной из самых актуальных проблем. Решение задачи снижения уровня шумов и вибраций важно для всех отраслей народного хозяйства и в первую очередь – общего и специального машиностроения.

Основными методами борьбы с шумами и вибрациями в промышленности являются: 1) изоляция источника вибраций от основной конструкции; 2) увеличение жесткости конструкции с целью уменьшения амплитуды вибрации; 3) расстройка системы резонанса; 4) применение специальных демпферных устройств; 5) использование конструкционных материалов с высокой демпфирующей способностью.

Каждый из перечисленных методов имеет преимущества и недостатки, которые и определяют область оптимального использования конкретного метода.

Метод изоляции источника вибрации от основной конструкции весьма эффективен, однако требует увеличения ее габаритов, что обычно приводит в противоречие с условием компактности.

Повышение жесткости приводит к нежелательному, а в ряде случаев и недопустимому увеличению габаритов и массы конструкции.

Расстройка системы от резонанса осуществима только в том случае, когда источник колебаний имеет весьма узкий, ограниченный диапазон частот и есть возможность спроектировать машину (конструкцию) так, что ее собственные частоты будут значительно выше или ниже резонансных. В большинстве же случаев диапазон частот возбуждения так велик, что резонансные частоты в машине (конструкции) или невозможно или просто невыгодно отстраивать.

Применение специальных демпферных устройств ограничено сложностью их конструкции и трудностью встраивания в машину.

В последнее время для деталей машин и механизмов, работающих в режиме циклического нагружения, все больше применяют материалы с высокой демпфирующей способностью; их использование становится одним из основных способов эффективного снижения вредных шумов и вибраций. Этому в значительной мере способствует прогресс в создании подобных материалов. Основным ограничением широкого использования указанных материалов с высокой демпфирующей способностью в промышленности является дороговизна некоторых материалов, их малый ассортимент, а также не всегда удовлетворяющий конструкторов комплекс физико-механических характеристик, в первую очередь прочностных. Наиболее, известными сплавами высокого демпфирования, нашедшими промышленное применение

в мировой практике, являются сплавы на марганцевомедной и никель-кобальтовой основах, а также сплавы магния.

До сих пор нет исследований, направленных на разработку новых демпфирующих материалов, использующих наноструктурные композиции. Наноструктурные материалы начинают широко использовать в радиоэлектронике, металловедении, машиностроении, однако отсутствуют сведения об их использовании при диссипации звуковой и вибрационной энергии.

Шум оказывает негативное действие на организм работающего. При воздействии шума на окружающую среду выделяют медицинский, социальный, экономический аспекты, которые следует рассматривать во взаимосвязи друг с другом [4]. Шум вызывает следующие нарушения в организме человека:

- снижение слуховой чувствительности;
- изменение функции пищеварения;
- сердечно-сосудистая недостаточность;
- нейроэндокринное расстройство;
- нарушение сна;
- повышение кровяного давления;
- повышение заболеваемости при родах;
- уменьшается продолжительность жизни на 8-10 лет;
- снижается трудоспособность на 10%;
- поражается нервная система;
- ухудшается работа внутренних органов;
- повышается усталость [5-9].

Для оценки вредного влияния производственного шума использовали частотный и статистический анализ [10].

На основе гигиенической оценки шума, вибрации, микроклимата, пыли и газов в новом отделении шлакопереработки металлургического комбината «Азовсталь» установлено, что при больших уровнях этих факторов больший удельный вес переболевших болезнями костно-мышечной, сердечно-сосудистой системы, органов дыхания и пищеварения в более ранние сроки (на 2,1-2,8 лет) диагностируются хронические заболевания сердечно-сосудистой системы и органов дыхания [11].

Предприятия тяжелой промышленности (металлургия, энергетика, машиностроение, полиграфия и др.) характеризуются большим числом и разнообразием источников шума. Среди них наиболее высокие уровни звукового давления (УЗД) характерны для ударного шума.

Уровень звуковой мощности металлургического оборудования, генерирующего ударный шум, характеризуется величинами, приведенными в таблице 1[12].

Таблица 1 – Уровни звуковой мощности металлургического оборудования [12]

Наименование оборудования	Уровни звуковых давлений, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровень звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Молотковая дробилка ДР-10	106	108	107	106	102	98	95	87	108
Дробилка четырехвалковая (УЗТМ)	11	115	114	112	110	108	101	94	115
Инерционный грохот коксовый	112	111	106	109	109	107	103	96	115
Пластинчатый конвейер	106	104	101	99	100	99	92	91	104
Молот ковочный (Q=5 т)	110	113	96	114	110	109	107	101	115
Участок штамповки труб	100	99	96	95	104	106	102	101	105
Горная промышленность	110	115	106	108	106	112	117	120	127
Погрузочная машина	102	104	100	98	101	98	102	103	106

Авторами установлено, что снижение слуха вызывается воздействием импульсов, имеющих очень высокие пики звукового давления и достигающие 140 дБ [13].

Наиболее шумными считаются трубопрокатные цеха, в которых уровни звука достигают 120 дБ [14].

Исследованы уровни шума методом звуковой интенсивности в горнорудной промышленности [15].

В практике борьбы с производственным шумом имеется определенный опыт. Наиболее часто используемые способы борьбы с шумом [16-18]:

- рациональное расположение оборудования;
- звукоизоляция;
- звукопоглощение;
- вибропоглощение;
- увеличение жесткости конструкции;
- использование демпфирующих устройств;
- применение средств индивидуальной защиты;
- организационные мероприятия;
- использование демпфирующих материалов;

- использование глушителей.

Для сравнительного изучения реакции людей, находящихся внутри помещений на шум взрывов и звуковых ударов, предусмотрена стандартная методика измерений ударных импульсов взрывного типа в условиях открытого поля на оценку восприятий их уровней внутри помещений. Для этой цели проведен комплекс объективных измерений и дана субъективная оценка ударных звуков внутри помещений трех типов: деревянный дом, кирпичный дом и передвижной офис на трейлере. Испытания проводились на 232 субъектах двух типов, при возбуждении 30 взрывов и 20 звуковых ударов от пролета самолетов [19].

Результаты измерений показали: 1) измерения уровней ударных звуков внутри помещений недостаточно показательны для их объективной оценки; 2) оценка восприятия ударных импульсов по измерениям уровней с весовой характеристикой «С» примерно одинакова для звуков двух типов.

При стрессе возникают слуховые и внеслуховые явления [20].

Шум возникает, прежде всего, там, где изменяются направления движений и где происходит изменение сил, будь то ускорение или торможение. Ни одно из движений не происходит на нашей планете равномерно и постоянно, так что шум является постоянным сопутствующим движению.

Причины, вызывающие шум: удар; потоки газа, включая турбулентности и завихрения; возмущения в потоке текущей среды; горение; трение, включая непрерывное и скачкообразное трение; динамическое равновесие; электромагнитное возбуждение.

При этом для одного источника может быть характерно несколько вышеуказанных явлений [21].

Среди разновидностей производственного шума наиболее вредный – импульсный шум [22].

В горном деле, кроме шума на человека оказывает влияние вибрация, запыленность, ограниченность производственного пространства [23].

Шум и вибрация характерны для мощных индукционных нагревателей, предназначенных для нагрева заготовок [24].

Методами энергетического анализа исследовали механизмы возникновения шума [25].

Механический шум наиболее распространен на производстве. Ударный шум механического происхождения подробно описан в работах отечественных и зарубежных ученых (Бринза В.Н., Москалева Л.Н., Сулеев Д.К., Лагунов Л.Ф., Осипов Г.Л., Заборов В.И., Клячко Л.Н., Росин Г.С., Парфенов А.А., Працюк В.А., Фавстов Ю.К., Хохлов П.П., Актаев Б.Г., Заликанова И.П., Утепова А.Б., Утепов Т.Е., Ерконыр А.К., Hasimoto T., Price G., Toshiba M., Igarashi T., Arimoto T., Stiles G.T., Hanson W. I., Nashi F., Изак Г.Д., Никифоров А.С. и др.) [26-27].

Преимущества использования демпфирующих металлических материалов для снижения шума: не загромождается рабочее пространство,

отсутствуют температурные ограничения; высокая прочность, технологичность, дешевизна.

1.2 Известные способы гашения шума ударного происхождения

Аналитический обзор и патентный поиск по проблеме снижения ударного шума позволили выявить недостатки известных методов гашения шума соударений.

К известным способам снижения производственного шума ударного происхождения относятся: увеличение жесткости и металлоёмкости конструкции; увеличение демпфирования за счет гасителей колебаний; звукоизоляция; звукопоглощение; исключение вибрации отдельных элементов; замена изношенных деталей (подшипников, шестерен и других вращающихся, соударяющихся механизмов); систематическая смазка для снижения трения; точная сборка узлов и своевременная замена их; уменьшение силы удара; индивидуальная защита слуха; организационные мероприятия; применение малошумных неметаллических материалов; изменение конструкции [28-31].

Недостатки известных методов снижения производственного шума следующие:

- снижение производительности труда;
- дороговизна демпфирующих устройств;
- загромождение рабочего пространства;
- пожароопасность (звукопоглощающие материалы зачастую возгораемы);
- взрывоопасность материалов звукоизоляции;
- низкая эффективность.

За счет установки глушителей на всасывающих каналах компрессоров снизили уровни шума на 10-15 дБ [33].

Рассмотрены современные методы снижения шума [34-38].

Следует отметить, что производственный шум оказывает на человека различное действие.

Наиболее эффективными методами снижения шума являются способы гашения шума в источнике возникновения, при этом использование недолговечных материалов (неметаллов) недостаточно эффективно.

Использование металлических материалов с повышенными диссипативными свойствами для техники борьбы с шумом актуально по причинам простоты конструкции (не требуются дорогостоящие демпфирующие механизмы), высокие физико-механические характеристики (все-таки, сталь намного прочнее неметаллов, цветных металлов, чугунов и др.).

При этом основное оборудование промышленности, изготовленное из черных металлов, не имеет характеристик демпфирования, т.к. у конструкторов и технологов отсутствуют данные по диссипативным и акустическим свойствам сталей и сплавов.

1.3 Использование демпфирующих металлических материалов в технике борьбы с производственным шумом

Известны опытные работы, в которых для снижения производственного шума и вибрации использовали демпфирующие металлические материалы с высокими физико-механическими характеристиками, низкой себестоимостью и высокой технологичностью [26].

Фавстовым Ю.К. приведена классификация сплавов высокого демпфирования (медноалюминиевые, меднонооловянистые, никель-титановые, железные, никель-кобальтовые сплавы; чугуны, свинцовистые бронзы, сплавы алюминия, сплавы алюминия с оловом и цинком).

Данная классификация в определенной степени условна, поскольку в некоторых сплавах уровень демпфирования вызывается действием нескольких механизмов.

Способность материалов и сплавов излучать звук при колебаниях используется в большом числе физических экспериментов. Примерами излучателей звука являются камертоны, мембраны, стержни, пластины, струны.

Сплавы на основе железа с высоким значением внутреннего трения исследованы Масумото Хакару, Саватани Акихати (1978-1979).

Демпфирующие сплавы были объектом исследования в работах Amano K., Sahashi M., Tokoro A.A., Nakagawa M. (1977 г.), Москалевой Л.Н., Парфенова А.А. (1981г.), Працюка В.А. (1981), Белова А.В. (1981 г.), Утепова Е.Б. (1980-1998 гг.), Сулеева Д.К. (2000-2005 гг.), Хохлова П.Л. (1995-1998 гг.), Бодяко М.Н., Гордиенко А.И., Мещерекова В.П. (1978 г.), Ueda Shoji, Daikoku Takashi, Takeda Yorimasa, Hiromoto Akira (1980 г.), Marimoto Syogo, Shimaguchi (1980 г.), Дриц М.Е., Рохлина Л.Л. (1983 г.) [26].

Литературные данные о влиянии химического состава и термообработки на диссипативные свойства сплавов свидетельствуют о том, что химический состав оказывает влияние на демпфирующие свойства. Основная часть работ посвящена сплавам на железной основе, которые характеризуются низкой стойкостью при повышенных температурах, высокой стоимостью и дефицитностью базовых компонентов.

Имеющиеся сведения о сплавах на основе железа характерны тем, что в качестве критерия оценки зачастую использованы логарифмический декремент, внутреннее трение, относительное рассеяние. Крайне редко используется уровень звука при соударении.

Имеющиеся сведения о влиянии химического состава и термообработки на демпфирующие свойства сплавов при соударении охватывают или сложнолегированные или стандартные марки стали [26].

Решение проблемы снижения 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 зависит от множества факторов, таких как соотношение компонентов структуры, вид технологической обработки и т.д. Данные о влиянии химического состава сплавов на их демпфирующие свойства позволяют сделать предположение о возможности разработки составов низколегированных сталей с высокими демпфирующими свойствами.

Исследовали демпфирующие свойства пяти групп сталей: углеродистая сернистая (A11, A12, A20, A30, A35 и A40); углеродистая свинецсодержащая и сернистомарганцовистая, свинецсодержащая (AC14, AC35Г, AC45Г2, AC40), углеродистая, хромистая, сернистоселенистая (A 35E, A 45E и 40XE). Разработаны новые демпфирующие стали ОРС-1, ОРС-2, ОРС-3, ОРС-4, ОРС-5 и ОРС-6 [38]. Химический состав вновь разработанных сталей марок ОРС отличается от стандартных содержанием серы (увеличено содержание на 0,04%) и фосфора (содержание 0,02-0,2%). Исследование логарифмического декремента показало, что у сплава ОРС-4 диссипативные свойства в 2-8 раз выше, чем у стандартных сталей A11, A12, AC14 и др. к демпфирующим сталям относятся ОРС-3, ОРС-4, ОРС-6. Авторы исследовали акустические свойства стали после трех видов термической обработки: нормализации, отжига и закалки. Все опытные слитки подвергались горячей прокатке после гомогенизации при температуре около 1200°C, с промежуточными подогревами заготовок перед последующим обжатием. Температура конца пластической деформации была 900-950 °C. После чего заготовки охлаждались на воздухе. Микроструктурный анализ выявил, что во всех образцах прошел процесс рекристаллизации с образованием, как правило, мелкого зерна (до 10 балла). После горячей прокатки и нормализации проводили испытания акустических и физико-механических свойств. Акустические свойства характеризовали уровнем звука (дБА) и скоростью его затухания (дБА/с), а также уровнем звукового давления (дБ) в октавных полосах среднегеометрических частот от 0,5 до 16 кГц. Так как в основу выбора состава сплавов был положен метод математического планирования эксперимента при крайних значениях планируемых факторов, то сплавы, особенно первой матрицы, резко различные по содержанию углерода (0,06 и 1,10%) и другим легирующим элементам, имели специфические структуры, как по фазовому составу, так и по величине зерна. Поэтому представляло определенный интерес изучение структуры и физико-механических свойств сталей, уровней звукового давления этих сплавов в зависимости от шести факторов эксперимента, в том числе от отжига. Величина зерна этих сплавов колеблется от 2 до 8 балла (0,02-0,0007 мм²). Структура сплавов T3 и T5 представлена практически чистым ферритом с величиной зерна 4,8 балла. Заэвтектоидная сталь (сплав T2) характеризуется крупным перлитным зерном 2 балла (0,02 мм²) с тонкой цементитной сеткой по границам зерна. В сплавах T4 и T7 имеет место выделение свободного углерода в форме графита, окруженного мелкими зернами феррита. Сплавы, составы которых были заданы двумя

последующими матрицами при довольно суженных интервалах варьирования по легирующим элементам, после нормализации и отжига имели типичную ферритоперлитную структуру. Часть сплавов имело явно выраженную полосчатость. Величина зерна этих сплавов 3-10 баллов. Вид кривых, характеризующих зависимость уровня звукового давления от частоты, типичен для всех сплавов. Однако, в зависимости от содержания углерода и его формы, величины зерна и фазового состава в большинстве случаев отмечены некоторые особенности.

В работах д.т.н. Хакдодова М. М. исследовали СМК (слоистые металлические композиции), полученные путем сварки и прокатки конструкционных материалов со сплавами, обладающими сверхпластичностью (СПС). В качестве сверхпластичных сплавов использовали сплав Zn-40% Al, обладающий сверхпластичностью в температурном диапазоне 200...300°C. Были изготовлены следующие слоистые металлические композиции: сталь 45 – СПС – сталь 45 и СПС – сталь 45 – СПС. Исследовали демпфирующие и механические свойства слоистых металлических композиций в зависимости от объемной доли сверхпластичных сплавов, степени пластической деформации микротвердости слоев, температуры и длительности отжига. Для определения демпфирующей способности слоистых металлических композиций проводили измерения скорости затухания звука, пропорциональной коэффициенту потерь при ударном возбуждении образца. Анализ результатов исследования показал, что полученные слоистые металлические композиции обладают повышенными демпфирующими свойствами при комнатной температуре. Это свидетельствует о том, что благодаря использованию в составе СМК сверхпластичных сплавов, демпфирующая способность которых намного превышает демпфирующие свойства стали, возможно создание композиционных конструкционных материалов, обладающих высокой демпфирующей способностью при повышенных температурах.

1.4 Задачи исследования

Проблема снижения производственного шума ударного происхождения за счет демпфирующих материалов весьма актуальна.

Шум в промышленности достигает уровней, значительно выше допустимых. Оборудование из сталей и сплавов излучает шум высокой интенсивности. Большинство металлов и сплавов, используемых для деталей машин и механизмов, не обладают демпфирующими свойствами. В марочниках сталей и сплавов отсутствуют сведения об их виброакустических, демпфирующих свойствах. Известны работы по разработке сплавов с повышенными демпфирующими свойствами на основе цветных металлов, но эти металлы очень дороги, дефицитны и обладают низкими прочностными свойствами.

Хотя большинство деталей оборудования изготавливается из черных металлов, работ по исследованию их демпфирующих свойств немного, отсутствуют сведения о демпфирующих свойствах известных сталей.

В настоящей работе поставлены следующие задачи:

- исследовать акустические, вибрационные и демпфирующие характеристики стандартных инструментальных сталей, широко используемых в промышленности;
- создать наноструктурные материалы (нанопокрывание на поверхности известных стандартных сталей) и исследовать их акустические, демпфирующие и физико-механические характеристики;
- осуществить полупромышленные и промышленные испытания по внедрению наноструктурных материалов в технике борьбы с шумом и вибрацией.

2 НАНОТЕХНОЛОГИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

2.1 Формирование нанотехнологии

В настоящее время мы являемся свидетелями формирования и развития новой междисциплинарной области знаний — нанотехнологии. Термин «нанотехнология» объединяет разнородные представления и подходы, а также разные методы воздействия на вещество. Название новой науки возникло в результате добавления к общему понятию «технология» приставки «нано», означающей уменьшение масштаба в 1 миллиард раз, т.е. 1 нанометр равен 10^{-9} м. Насколько это мало - можно судить на примере атома водорода, диаметр которого равен 1 ангстрему (1 А), что составляет 0.1 нм

В таблице -2 для сравнения приведены размеры некоторых естественных и искусственных объектов окружающего нас мира от 10 м до 1 А.

Таблица 2 - Место объектов нанометрического масштаба в окружающем нас мире [57]

Уровень	Объект	Характерный размер
макроуровень	Дерево	10 м
	Человек	1.7 м
	Стрекоза	10 см – 10^{-1} м
мезоуровень	Таракан	1 см = 10^{-2} м
	Муравей, песчинка	1 мм = 10^{-3} м
	Толщина листа бумаги, яйцеклетка	100 мкм = 10^{-4} м
микроуровень	Толщина человеческого волоса, биоклетка	10 мкм = 10^{-5} м
	Эритроцит крови, кишечная палочка	1 мкм = 10^{-6} м
	Минимальный размер элементов ВИС (больших интегральных схем)	100 нм – 10^{-7} м
наноуровень	Вирус, углеродная нанотрубка	10 нм = 10^{-8} м
	Белковая молекула, диаметр спирали ДНК	1 нм = 10^{-9} м
	Диаметр атома углерода	1 А = 10^{-10} м

К макроуровню относятся объемы, которые видны невооруженным глазом.

Мезоуровень введен для описания объектов, размер которых находится на пределе возможностей невооруженного глаза (0,2-1 мм).

Микроуровень охватывает объекты, размер которых лежит в диапазоне 1-100 мкм.

К наноуровню относятся объекты субмикронного размера 1-100 нм.

Под термином нанотехнология понимают создание и использование материалов, устройств и систем, структура которых регулируется в нанометровом, т. е. в диапазоне размеров атомов, молекул и надмолекулярных образований. Нанотехнология подразумевает умение работать с такими объемами и создавать из них более крупные структуры, обладающие принципиально новой молекулярной (точнее надмолекулярной) организацией. Такие наноструктуры, построенные «из первых принципов», с использованием атомно-молекулярных элементов, представляют собой мельчайшие объекты, которые могут быть созданы искусственным путем. Они характеризуются новыми физическими, химическими и биологическими свойствами и связанными с ними явлениями. В связи с этим возникли понятия нанонауки, нанотехнологии и наноинженерии. Нанонаука занимается фундаментальными исследованиями свойств наноматериалов и явлений в нанометровом масштабе, нанотехнология - созданием наноструктур, наноинженерия - поиском эффективных методов использования наноструктур.

С учетом вышеизложенного, нанотехнология может быть определена, как совокупность технических процессов, связанных с манипуляциями молекулами и атомами в масштабах 1 - 100 нм.

2.2 Возникновение и развитие нанотехнологии

Нанотехнология сформировалась на основе революционных изменений в компьютерных технологиях. Электроника как целостное направление возникло около 1900 г. и продолжала бурно развиваться в течение всего прошлого столетия. Исключительно важным событием в ее истории стало изобретение транзистора в 1947 г. После этого началась эпоха расцвета полупроводниковой техники, при которой размеры создаваемых кремниевых устройств постоянно уменьшались. Одновременно с этим непрерывно возрастали быстродействие и объем магнитных и оптических запоминающих устройств.

Однако по мере приближения размеров полупроводниковых устройств к 1 микрону в них начинают проявляться квантово-механические свойства вещества, т.е. необычные физические явления. Можно с уверенностью предположить, что при сохранении нынешних темпов развития мощности компьютеров вся полупроводниковая технология примерно через 5-10 лет столкнется с проблемами фундаментального характера, так как быстродействие и степень интеграции в ЭВМ достигнут некоторых «принципиальных» границ, определяемых известными нам законами физики. Таким образом, дальнейший процесс науки и техники требует от исследователей существенного «прорыва» к новым принципам работ и новым технологическим приемам.

Такой прорыв может быть осуществлен только за счет использования нанотехнологии, которые позволят создать целый ряд принципиально новых производственных процессов, материалов и устройств.

Однако нанотехнологию не стоит сводить только к локальному революционному прорыву в электронике и компьютерных технологиях. Уже сейчас получен ряд исключительно важных результатов, позволяющих надеяться на существенный процесс в развитии других направлений науки и техники.

На многих объектах в физике, химии и биологии показано, что переход на наноуровень приводит к появлению качественных изменений в физико-химических свойствах отдельных соединений и получаемых на их основе систем. Речь идет о коэффициенте оптического сопротивления, электропроводности, магнитных свойствах, прочности, термостойкости. Более того, согласно наблюдениям новые материалы, получаемые с использованием нанотехнологий, значительно превосходят по своим физическим, механическим, термическим и оптическим свойствам аналоги микрометрического масштаба.

В таблице 3 представлены некоторые примеры практического применения нанотехнологий.

Таблица 3 - Некоторые примеры практического применения нанотехнологии

Область	Примеры	Результаты
Компьютерные технологии	Полупроводниковые устройства Запоминающие устройства	Устройства с очень малым энергопотреблением "Карманные" суперЭВМ Повышение характеристик ЭВМ и в 1000 раз
Медицина, биология	Биодатчики «Адресная доставка» лекарств	Диагностика раковых заболеваний Новые методы введения лекарств
Экология, энергетика	Использование солнечной энергии. Топливные элементы Экологически чистые материалы	Борьба с «парниковым эффектом» Создание общества «гармонии с природой»

На основе материалов с новыми свойствами уже сейчас создаются новые типы солнечных батарей, преобразователей энергии, экологически безопасных продуктов и многое другое. Уже созданы высокочувствительные биологические датчики (сенсоры) и другие устройства, позволяющие говорить о возникновении новой науки - нанобиотехнологии и имеющие огромные перспективы практического применения, что будет рассмотрено ниже. Нанотехнология предлагает новые возможности микрообработки материалов и создания на основе новых производственных процессов и новых изделий,

что должно оказать революционное воздействие на экономическую и социальную жизнь будущих поколений.

2.3 Классификация наноструктурных материалов

В нанохимии возникают вопросы, связанные с понятиями и терминами. Термин кластер используется для частиц, включающих небольшое число атомов ($2-10^3$). Термином наноструктурные материалы называются материалы, обладающие упорядоченной структурой нанометрического масштаба.

7-я Международная конференция по наноструктурным материалам (г Висбаден, 2004) предложила следующую их классификацию:

- нанопористые твердые вещества,
- наночастицы,
- нанотрубки и нановолокна,
- нанодисперсии,
- наноструктурные поверхности и пленки,
- нанокристаллические материалы.

2.3.1 Общая характеристика

Свойства наноматериалов, в том числе эксплуатационные характеристики, определяются их структурой; изучение последней является одной из важных задач наноструктурного материаловедения.

Классификация Г. Глейтера, характеризует основные типы структур неполимерных наноматериалов.

По химическому составу и распределению фаз можно выделить четыре типа структуры: однофазные, статистические многофазные с идентичными и неидентичными поверхностями раздела и матричные многофазные. Также выделяют три типа структуры.

Таблица 4 - Классификация консолидированных наноматериалов по составу, распределению и форме структурных составляющих[57]

Форма	Однофазный состав	Многофазный состав		
		Статистическое распределение		Матричное распределение
		Идентичные границы	Неидентичные границы	
Пластиначатая				
Столбчатая				
Равноосная				

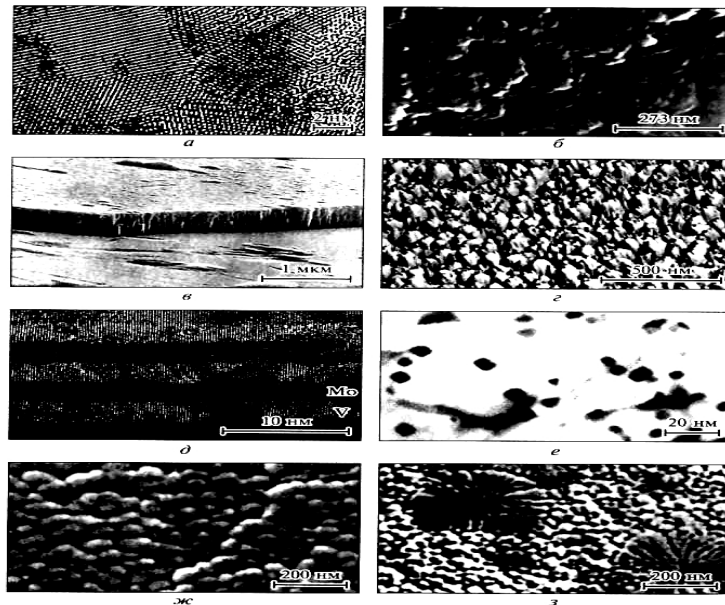


Рисунок 1- Микрофотографии наноструктур[57]: *a* — компакт *Pd*; *б* — компакт *TiN*; *в* — излом пленки *TiN*; *г* — поверхность пленки *TiN*; *д* — многослойная пленка (сверхрешетка) *Mo—V*; *е* — закаленный из жидкого состояния сплав *Al — Pb* (10%); *ж, з* — соответственно ячеистая и дендритно-ячеистая структура сплава *Fe—Si*, закаленного из жидкого состояния.

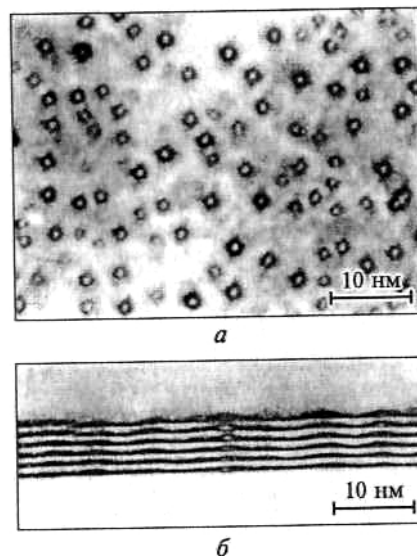


Рисунок 2 - Электронно-микроскопическое изображение квантовых точек[57] *InGaAs* (*a*), сформированных на поверхности эпитаксиальных слоев *GaAs* (*б*) по форме: пластинчатая, столбчатая и содержащая равноосные включения

Эта классификация учитывает возможность сегрегаций на межкристаллитных границах (идентичные и неидентичные поверхности раздела). Однако реальное разнообразие структурных типов может быть и более широким за счет смешанных вариантов, наличия пористости, трубчатых и луковичных структур, полимерных составляющих и т.д. Наиболее распространенными являются одно- и многофазные матричные и

статистические объекты, столбчатые и многослойные структуры; последние характерны в большинстве случаев для пленок.

На рисунке 1, 2 показаны типичные структуры консолидированных наноматериалов. Эти снимки получены с помощью высокоразрешающих и обычных просвечивающих электронных микроскопов (ПЭМ) (рисунок 1, а, д—з; рисунок 2), высокоразрешающего сканирующего электронного микроскопа (рисунок 2, б, в) и атомно-силового микроскопа (рисунок 1, г) с увеличением в 20 000 — 3 500 000 раз. Столбчатая и пластинчатая структуры пленок представлены на рисунке 1, в-д, однофазные структуры — на рисунке 1, а-г, ж; многофазные — на рисунке 1, д, е, з.

В целом для структуры наноматериалов характерно обилие поверхностей раздела (межзеренных границ и тройных стыков — линий встречи трех зерен).

На рисунке 3, а показана схема тройного стыка, образованного зернами в виде тетраэдрических додекаэдров; на рисунке 3, б представлена зависимость общей доли поверхностей раздела, а также доли собственно межзеренных границ и доли тройных стыков от размера зерен. График на рисунке 3, б построен на основании простых геометрических соображений. Так, общая доля поверхностей раздела составляет:

$$V_{п.р} = 1 - [(L - s)/L]^3 \sim 3s/L, \quad (1)$$

доля собственно межзеренных границ

$$V_{м.г} = [3s(L - s)^2]/L^3 \quad (2)$$

и соответственно доля тройных стыков

$$V_{т.с} = V_{п.р} - V_{м.г}. \quad (3)$$

Здесь L - размер зерна; s — ширина границы (приграничной зоны).

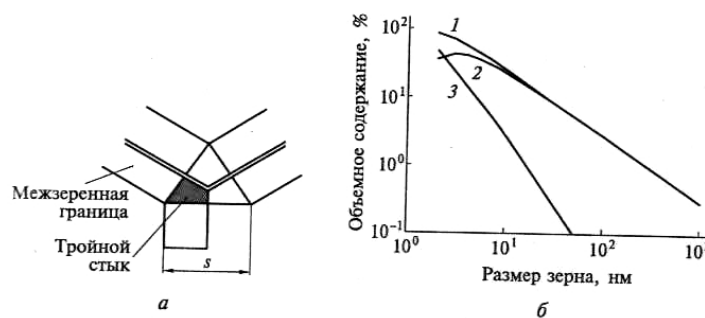


Рисунок 3 – Схема тройного стыка (а) и влияние размера зерна (б) на общую долю поверхностей раздела (1), долю межзеренных границ (2) и тройных стыков (3) при $s = 1$ нм

Из данных рисунка 3, б следует, что существенная доля поверхностей раздела (несколько процентов) отвечает размеру зерен $L < 10$ нм; при $L < 10$ нм доля $V_{п.р}$ составляет уже несколько десятков процентов,

причем в этом интервале значений L доля тройных стыков стремительно растет. Доля поверхностей раздела в общем объеме материала приблизительно равна $3s/L$, где при $j \ll 1$ нм доля $V_{п-р} = 50\%$ достигается при $L \approx 6$ нм.

Таким образом, если твердое тело состоит из кристаллитов размером несколько нанометров (< 10 нм), то доля поверхностей раздела или доля областей с разупорядоченной структурой весьма велика.

Хотя данные рисунка 3, б дают лишь приблизительную оценку, поскольку получены с использованием грубых моделей, но, в принципе, они правильно характеризуют долю поверхностей раздела в структуре наноматериалов. Рост этой доли с уменьшением размер зерен — один из факторов, определяющих неравновесное состояние наноматериалов за счет увеличения избыточной свободной поверхностной энергии. Отметим также, что значения межфазной и граничной поверхностной энергии наноматериалов могут отличаться от таковых для обычных крупнокристаллических материалов. Надежные опытные данные об энергетических характеристиках поверхностей раздела в наноматериалах практически отсутствуют.

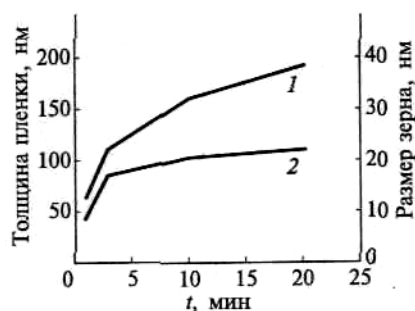


Рисунок 4 – Влияние продолжительности осаждения пленок CdS на толщину пленки (1) и размер зерен (2)[57]

Следует также иметь в виду, что для пленок (в том числе столбчатых и многослойных) нужно принимать во внимание не только их общую толщину, но и диаметр столбов и толщину отдельных слоев, а также наличие нанозерен внутри пленок, столбов и слоев.

На рисунке 4 показано влияние продолжительности осаждения пленок CdS из аммиачного раствора, содержащего ацетат кадмия, тиомочевину и триэтоксисамин, при температуре 75 °C на толщину пленки и размер зерен.

Согласно данным рисунка 1, по существу, все пленки (даже толщиной более 100 нм) являются наноструктурными. Для пленок Al – N и Ti – N, полученных соответственно электроннолучевым и дуговым методом, кристаллиты размером примерно 100 нм наблюдались в пленках толщиной около 700 нм.

Наиболее полно особенности структуры наноматериалов изучены применительно к консолидированным объектам и далее будут обсуждаться

в основном эти объекты, хотя и остальным наноматериалам также будет уделено внимание.

Основные технологические приемы получения консолидированных наноматериалов перечислены в таблице 5. Здесь приведены также наиболее часто используемые варианты этих методов. Разумеется, эта классификация условна, поскольку границы между отдельными методами, как правило, размыты. Так, при проведении интенсивной пластической деформации или при нанесении покрытий часто в виде исходного сырья используют порошки, т.е. эти методы могут быть отнесены и к порошковой технологии. Стоит также упомянуть такие методы получения наноструктур, как облучение большими дозами нейтронов и ионов, интенсивную деформацию при трении и др.

Понятно, что каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Например, приемы порошковой технологии не всегда обеспечивают получение беспористых наноматериалов, однако они более универсальны применительно к изготовлению изделий различного размера и состава.

Применение контролируемой кристаллизации из аморфного состояния, обеспечивающей получение беспористых образцов, ограничено составами, доступными для амортизации. Перечисленные в таблице 5 методы не конкурируют, а скорее дополняют друг друга, существенно расширяя спектр структур, их свойств и практических приложений. Разнообразие методов получения наноматериалов — одно из достоинств этих объектов.

Таблица 5 – Основные методы получения консолидированных наноматериалов[57]

Метод	Вариант метода	Объекты
1	2	3
Порошковая технология	Газофазное осаждение и компактирование (метод Глейтера). Обычное прессование и спекание. Электроразрядное спекание. Горячая обработка давлением (горячее прессование, ковка, экструзия)	Металлы, сплавы, соединения
Интенсивная пластическая деформация	Деформация кручением при высоких давлениях. Равноканальное угловое прессование. Обработка давлением многослойных композитов. Фазовый наклеп	Металлы и сплавы

Продолжение таблицы 5

1	2	3
Контролируемая кристаллизация из аморфного состояния	Кристаллизация при обычном давлении. Кристаллизация при повышенном давлении	Аморфные вещества
Технология пленок и покрытий	Химическое осаждение из газовой фазы. Физическое осаждение из газовой фазы. Электроосаждение. Золь-гель-технология	Металлы, сплавы, соединения

3 ПОЛУЧЕНИЕ НАНОПОКРЫТИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ

3.1 Процессы физического осаждения покрытий (PVD)

Процессы PVD основаны на генерации вещества в вакуумное пространство камеры с подачей реакционного газа (N_2 , O_2 , CH_4 и др.). Различие технологий PVD состоит в принципах генерации вещества, различной степени ионизации паро-ионного потока, конструкциях и технологических особенностях установок. Наибольшее применение в практике производства инструмента покрытием нашли системы низковольтного вакуумно-дугового испарения, получившие наименование arc-PVD (КИБ – наименование процесса в странах СНГ).

Процессы КИБ основаны на генерации вещества катодным пятном вакуумной дуги сильноточного, низковольтного разряда, развивающегося исключительно в парах материала катода в вакуумной камере, металлический корпус которой служит анодом [39]. Характерной особенностью процессов КИБ является высокая химическая активность испаряемого вещества, состоящего из высокоионизированного потока низкотемпературной плазмы (степень ионизации может достигать 90÷95 %). Субстрат и осаждаемый конденсат подвергается интенсивной бомбардировке ионами испаряемого металла, что приводит к частичному распылению приповерхностных слоев субстрата и повышению температуры в зоне формирования покрытия. В результате резко возрастает подвижность атомов на поверхности субстрата, происходит дополнительная активация осаждаемого конденсата, формируется прочная адгезионная связь между покрытием и субстратом.

Процессы КИБ отличаются высокой производительностью в десятки раз превышающей производительность процессов CVD, что связано с возможностью существенного ускорения высоко ионизированного потока ионов путем приложения отрицательного потенциала (относительно корпуса камеры) к субстрату или значительного повышения его плотности и гомогенности путем применения специальных плазмо-оптических магнитных систем. Процессы КИБ позволяют осаждать покрытия при существенно относительно низких температурах (до 600-700 °C), что в сочетании с высокой скоростью и уменьшенным временем осаждения конденсата позволяет избежать или существенно заблокировать интердиффузионные процессы на границах раздела «покрытие-субстрат», предельно снизить вероятность разупрочнения субстрата. Кроме того, процессы КИБ являются экологически безопасными [40, 41].

Процесс КИБ включает в себя следующие этапы:

- нагрев субстрата (термоактивация) посредством электронной и ионной бомбардировки;
- химико-термическое плазменное азотирование субстрата (для инструментов из быстрорежущей стали);
- ионная обработка (очистка поверхности путем распыление);

- ионно-ассистированное осаждение функциональных слоев покрытия.

Все эти процессы последовательно протекают в одной вакуумной камере [42,43,39], корпус которой служит анодом. При вакуумно-дуговом испарении средняя энергия бомбардирующих субстрат ионов составляет 1..6 кэВ [47,50], при имплантации с ускоряющим напряжением от 50 до 200 кэВ. Атомы на поверхности субстрата постоянно получают большую энергию, посредством чего активируется химическая реакция с компонентами реакционного газа. Кроме того, ионная бомбардировка сильно воздействует на структуру покрытия и граничной зоны. Поверхностные атомы при ионной бомбардировке получают достаточно энергии для термоактивации, последующего зарождения центров конденсации и роста покрытий. На граничных поверхностях под действием ионной бомбардировки происходит смешивание граничных слоев покрытия. Возникшие при этом дефекты и локальные повышения температуры на поверхности субстрата ускоряют диффузионные процессы. Этот эффект используется как для процессов КИБ, так и процессов ION-BOND для формирования адгезионного слоя на поверхности субстрата, а также для улучшения адгезии между покрытием и субстратом и между слоями покрытия.

Вместе с тем для вакуумно-дуговых процессов КИБ характерны и органические недостатки, связанные с генерацией микрокапельной составляющей паро-ионного потока, особенно для металлов с относительно небольшим атомным весом и плотностью (Ti, Al, Cr и др.). Микрокапельная составляющая является опасным дефектом покрытия, особенно если она расположена на границе раздела «субстрат-покрытие» или на поверхности покрытия, так как снижает эксплуатационную эффективность инструмента [40, 43]. Кроме того, стандартные технологии КИБ обычно не разделяют процессы термоактивации и очистки инструмента перед нанесением покрытия, что, с одной стороны, может привести к электроэрозии его режущих кромок особенно для инструмента с невысоким значением радиуса округления режущего клина, с другой - к резкому ухудшению качества поверхности покрытия.

Таким образом, процессы arc-PVD (КИБ) требуют дальнейшего совершенствования и развития.

3.2 Анализ возможностей совершенствования процессов КИБ

Для устранения недостатков процессов КИБ разработаны различные аппаратно-технические средства и технологии. Для лучшего использования катодов и повышения гомогенности разряда разработаны электромагнитные управляющие модули и специальная геометрия катода, которые позволяют преобразовывать случайные дуговые разряды (random arcs) в управляемые (steered arcs) [43].

Большой проблемой при вакуумно-дуговом испарении является образование макро-частиц, особенно при испарении материалов с низкой

температурой плавления: например Al, TiAl-сплавы. Схема формирования микрокапель представлена на рисунок 5.

Не касаясь механизма формирования микро-капель, которые достаточно хорошо описаны в [42-44], кратко рассмотрим лишь последствия их формирования.

Внедрение в покрытие микро-капель, размер которых может варьировать от 0,5 до 100 мкм [42,44], может стать причиной гаммы дефектов покрытия, которые резко отрицательно влияют на работоспособность инструмента особенно при использовании многослойных систем.

Капли различного размера, располагаясь на поверхности, в объеме покрытия и на границах его раздела с субстратом могут служить причиной отрицательных эффектов, имеющих различную природу. Например, капли металла в объеме покрытия могут стать причиной возникновения механических деформаций и снижения твердости покрытия. Капли, сформированные на границах раздела «покрытие-субстрат» часто являются причиной отслоения покрытия вследствие формирования микропор и возникновения микротрещин и резкого снижения прочности адгезии с субстратом. Наконец, капли, формируемые на поверхности покрытия, могут привести к резкому инициированию адгезии между обрабатываемым материалом и покрытием, что является причиной существенного повышения интенсивности изнашивания инструмента, снижению эффектов покрытия.

Анализ результатов исследований, проведенных в бывшем СССР (Физико-технический институт АН УССР, МГТУ «СТАНКИН», ВНИИТС, МИСиС и др.) и ряде университетов ФРГ, США, Японии, Китая и других технологически развитых стран показал, что микрокапельная оставляющая покрытий является достаточно опасным дефектом покрытия и для повышения качества инструмента подлежит устранению в процессе формирования покрытий [42,45, 46-51].

В качестве наиболее эффективного метода уменьшения капельной составляющей считается применение электромагнитных фильтров в виде модифицированных источников плазмы. Впервые успешное применение магнитных катушек для фокусировки и сепарации потока плазмы было описано Аксеновым И.И. [44]. Применение таких фокусирующих и стабилизирующих электромагнитных полей, концентрических к катоду, в источнике вакуумной дуги является в настоящее время актуальным технологическим уровнем [42,46]. Посредством модифицирования электромагнитного поля в поле с формой бутылочного горлышка (фирма Multi-Arc Scientific Coatings, США) было достигнуто значительное уменьшение капельной составляющей [49].

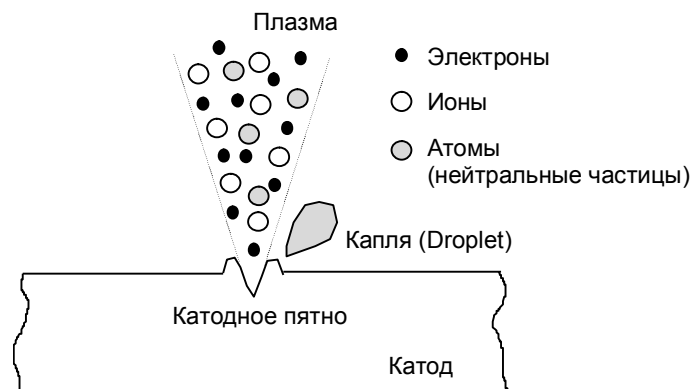


Рисунок 5— Схема формирования микро-капельной составляющей паро-ионного потока для процесса КИБ [57]

Вторая возможность уменьшения эмиссии макро-капель состоит в использовании тороидальных электромагнитных полей. В этом случае ионы так отклоняются магнитным полем, что они достигают субстрата, в то время как неподверженные влиянию магнитного поля нейтральные и макро частицы осаждаются на внутренней стенке тороидального корпуса катушки. На базе этого принципа было разработано много модифицированных источников плазмы, которые с успехом применялись для сепарации плазменного потока от капельной составляющей при осаждении металлов, сплавов и аморфных углеродных покрытий. Благодаря применению этого метода удалось уменьшить эмиссию капельной фазы до уровня 10 % [39,50,51].

Разработка источников пульсирующего напряжения (источники импульсов высокого напряжения) для применения в установках для нанесения покрытий была связана, во-первых: стремлением подавить паразитные дуговые разряды при тлеющем разряде и, во-вторых: реализовать ионную бомбардировку ионами с высокой энергией при как можно более низкой температуре субстрата. Принцип состоит в том, чтобы вместо постоянного напряжения подавать на субстрат импульсное постоянное напряжение. В зависимости от выбранной длительности импульса и амплитуды напряжения подавляется образование нежелательных микродуг. Другое преимущество применения пульсирующей плазмы состоит в возможности независимого друг от друга управления энергией ионов и температурой субстрата. Этот принцип пульсирующего напряжения используется в Puls-Plasma-CVD-процессе [52] и Plasma-Immersion-Implantation-процессе с микроволновым возбуждением плазмы ECR [53]. Для вакуумно-дуговых испарителей пульсирующее напряжение используется с целью уменьшения размеров и количества микро-капель.

Детальные исследования процессов нанесения покрытия при низких температурах субстрата с применением пульсирующего напряжения смещения проводились в ряде исследовательских центров СНГ, Германии и

ряда других стран. При этом благодаря наложению высокого пульсирующего напряжения смещения с низким основным постоянным напряжением было достигнуто снижение температуры субстрата на 50 К без снижения качества покрытия [42, 54-56].

Таким образом, совершенствование процессов вакуумно-дугового синтеза покрытий связано с разработкой устройств и технологических принципов фильтрации микро-капельной составляющей, гашения микродуг, разделения процессов термоактивации и очистки поверхности, подбора режимов формирования наноструктурных покрытий.

3.3 Оборудование для нанесения наноструктурных ионноплазменных покрытий и стадии осуществления процесса

3.3.1 Установка ионноплазменного нанесения покрытий

Для реализации основных положений по формированию многофункциональных покрытий на рабочих поверхностях режущего инструмента, оснащенного твердым сплавом (ТС), была разработана специальная установка на основе модернизированного вакуумно-дугового агрегата ННВ-6.6-ИЗ.

В частности, установка позволяет сепарировать нейтральные частицы (микрокапельная фаза). Сепарация капельной составляющей производится в результате отклонения заряженных частиц ионного потока (ионы, электроны) мощным магнитным полем. Кроме того, сепаратор может выполнять роль ускорителя плазменного потока, служить источником электронов для термоактивации инструмента и источником высокозаряженных ионов газа (например, азота) для стимулированной химико-термической обработки инструмента.

Схема сепаратора-ускорителя показана на рисунке 6.

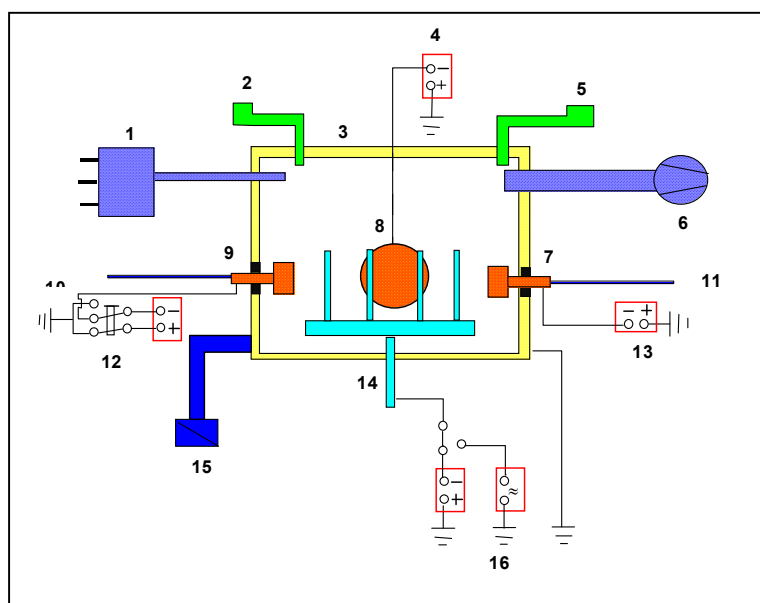


Рисунок 6 - Принципиальная схема вакуумно-дуговой установки универсального назначения [57]: 1 – газосмеситель; 2 – вакуумметр; 3 – камера установки; 4 – источник электропитания ускорителя-сепаратора; 5 – система контроля температуры; 6 – вакуумная система; 7, 9 – дуговые испарители; 8 – источник сепарированной 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 импульсной подачи напряжения смещения на инструмент.

Источник сепарированной плазмы (рисунок 7) 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 $R_0 = \sqrt{r * R}$, 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.

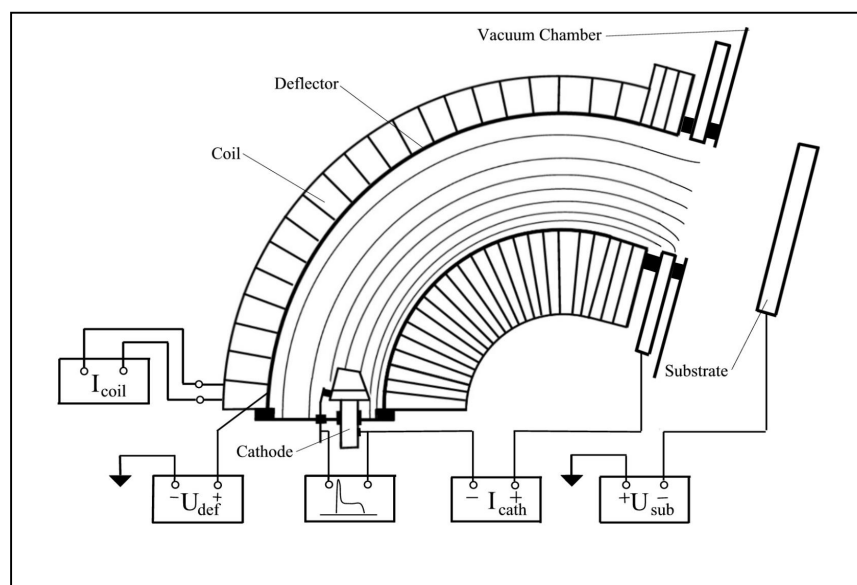


Рисунок 7 - Источник сепарированной плазмы [57].

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 другие).

3.4. Стадии процесса синтеза наноструктурных покрытий

Нанесение покрытий на пластины из твердого сплава (ТС) 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 (см. рисунок 3).

Пластины из ТС 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 ТС пластин контролировали с помощью пирометрической системы, имеющего рабочий диапазон измеряемых температур 150 – 900 °С, рабочий спектральный диапазон 1,8 – 3,8 мкм, показатель визирования 1:500 (номинальное значение) и время установления показаний не более 0,025 с.

Процесс получения покрытий (на примере синтеза многофункциональных покрытий на основе системы Ti-Al-N) для субстратов из ТС включал 7 основных этапов:

1. Предварительная очистка и мойка.
2. Загрузка пластин ТС в вакуумную камеру установку
3. Предварительная (глубокая) откачка.
4. Ионная очистка поверхности пластин ТС.
5. Термическая активация рабочих поверхностей пластин ТС.
6. Синтез (осаждение) адгезионно-упрочняющего слоя.
7. Синтез износостойкого слоя.

Предварительная очистка и мойка. 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 °С для устранения вероятности выпадения водного конденсата на поверхности пластин в момент их загрузки в камеру установки.

Загрузка пластин из ТС в вакуумную 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.

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

Ионная очистка поверхности ТС пластин. 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 $\cong 6 \div 10^2$ Ра., длительность цикла ионной очистки составляла до 20 – 30 минут.

Термическая активация рабочих поверхностей пластин из ТС. Для обеспечения высокой прочности адгезионной связи между рабочими поверхностями пластин и покрытием их прогревали до температур 600 – 700 °С. 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 $(0,8 \div 1,5) \cdot 10^{-1}$ Ра. Длительность термоактивирования пластин составляла в зависимости от степени загрязненности до 15 – 40 минут. Контроль температуры нагрева (термоактивации) производили при использовании оптического пирометра.

Синтез (осаждение) адгезионно-упрочняющего подслоя и износостойкого покрытия. 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 собственного 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.

4. ИЗГОТАВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ И АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

4.1 Материал и обработка

В качестве объекта исследования были выбраны стали с содержанием углерода от 0,65 % до 0,9 %, (инструментальные стали У7-У9). Таким образом, была поставлена задача, дать оценку демпфирующих свойств группе инструментальных сталей с нанопокрытиями без нанопокровтий.

В работе было выявлено существенное влияние технологии обработки на общий уровень звукового давления инструментальной стали. С целью исключения влияния технологии обработки на характеристики демпфирования исследуемых сталей выплавку, ковку, механическую обработку проводили по единой технологии на одном и том же оборудовании.

Образцы для исследования акустических, демпфирующих и физико-механических свойств вырезали из стальных полос по схеме, изображенной на рисунке 8.

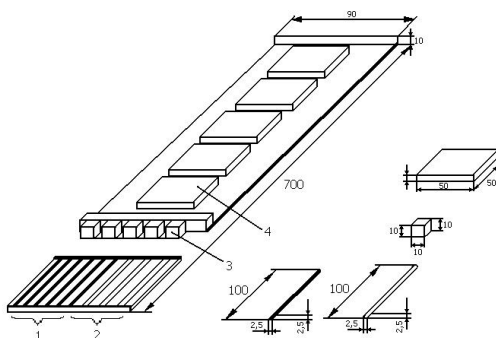


Рисунок 8 - Схема вырезки образцов для исследования:

1 – внутреннего трения; 2 – удельного электросопротивления;
3 – металлографического анализа; 4 – уровня звукового давления

Чистота поверхности после механической обработки соответствовала 7-му классу. Отклонение задаваемых размеров не превышало 0,1 мм. Акустические свойства определяли после горячей ковки, затем эти же образцы подвергали отжигу или нормализации. Режим отжига – нагрев до $A_{c3} + 50$ °С, выдержка 1 ч и охлаждение с печью. Закалку проводили по режиму: нагрев до $A_{c3} + 50$ °С, выдержка 0,5 ч, охлаждение в воде или в масле. Нагревание образцов в муфельной лабораторной печи производили в кварцевых ампулах в вакууме с разряжением порядка 10^{-6} атм.

4.2 Исследование акустических свойств сталей

Исследование акустических свойств предварительно осуществлялось на установке для измерения параметров звуковых колебаний (рисунок 9).

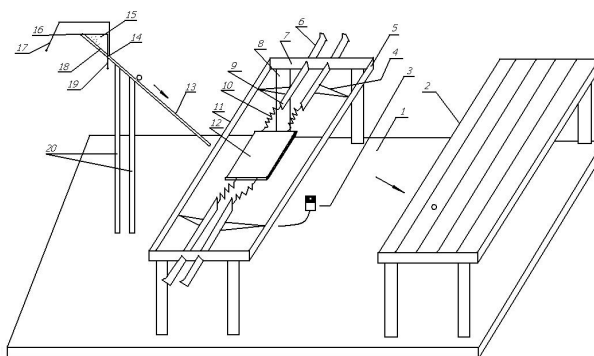


Рисунок 9 - Установка для измерения параметров звуковых колебаний: 1 – основание; 2 – стол с пластилиновым покрытием; 3 – микрофон; 4 – стрелки контроля; 5, 11 – шкала контроля; 6 – натяжные болты; 7 – каркас механизма крепления; 8 – стойка; 9 – головки для крепления пружинок; 10 – пружины; 12 – образец; 13 – наклонный желоб, 14 – ограничитель; 15 – механизм спуска; 16 – кожух; 17 – рычаг; 18 – накопитель; 19 – отсекаль; 20 – стойки для крепления желоба.

Размеры возбуждаемой пластины и масса шара, возбуждающего звук в пластине, взаимосвязаны по формуле Кремера X:

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

где ρ – плотность материала пластины, г/см³; l – расстояние от точки приложения удара до ближайшего края пластины, см; h – толщина пластины, см.

При этом толщина пластины должна быть не менее чем в 5 раз меньше длины и ширины пластины. Пластина размером 50x50x5 (3) мм вполне удовлетворяет этому требованию.

Акустические свойства оценивались по уровню звукового давления и скорости затухания звука. Уровни звукового давления были исследованы в октавных полосах частот в диапазоне от 0,5 до 16 кГц, уровень звука – по шкале "А". Звуковой сигнал воспринимался микрофонным капсюлем МК-102. Этот сигнал преобразуется в электрический сигнал, усиливается предусилителем МК-102 и подается на выход точного импульсного шумомера 00017 фирм RFT (Германия). Индикатор шумомера позволяет регистрировать уровни звукового давления от 30 до 130 дБ с точностью до 0,5 дБ. Для измерения частотного спектра звукового сигнала предназначен блок октавных фильтров OF-101. С помощью самописца типа PSG-101 осуществляли запись звукового импульса во времени. Запись производили на бумажную ленту сапфирной иглой. Скорость затухания звуковых колебаний определяли по формуле:

$$\sigma = \frac{L_1 - L_2}{\tau}, \quad (5)$$

где σ – скорость затухания звуковых колебаний, дБ/с; L_1 – максимальный уровень звука, дБ; L_2 – уровень звука через время t , дБ.

Звуковой генератор ЗГ-10 использовали для калибровки производимых измерений звукового сигнала. Поправку на изменение звукового сигнала от атмосферного давления осуществляли при помощи пистонфона марки РГ-101. Температура воздуха и влажность в лаборатории поддерживались постоянными. Акустические измерения находили как среднее значение 10 измерений.

Проводили также математическую обработку результатов эксперимента и определение доверительных интервалов в соответствии со стандартными методами.

Перед началом работы настройку измерительного тракта осуществляли проверкой уровней звукового давления эталонного образца.

Для изучения оценки влияния формы образцов на способность излучать звуковые колебания, было проведено исследование, с целью выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на характеристики демпфирования. Для этого были изготовлены образцы различной формы. Пластинчатые образцы различных размеров были изготовлены сваркой (рисунок 10 а, б, в, е) и холодной пластической деформацией (рисунок 10 г, д).

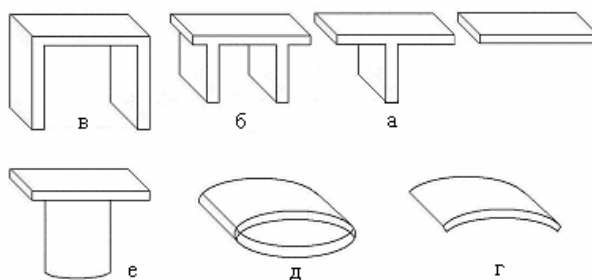


Рисунок 10- Формы образцов, изготовленных деформацией и сваркой из стандартной пластины 50×50 мм толщиной 5 и 3 мм

Выбор указанных выше семи форм обусловлен тем, что подобная конфигурация пластинчатых соединений часто встречается в реальных конструкциях, подвергаемых ударным возбуждениям. Уровни звукового давления, излучаемые той или иной формой образцов, сравнивались с первоначальными значениями уровня звукового давления плоской пластины такой же толщины и из такого же материала.

Результаты исследования влияния формы образца на уровни звукового давления позволят рекомендовать такие конструкции, которые обеспечат наибольшее демпфирование при ударных возбуждениях.

4.3 Определение внутреннего трения

Установки для измерения внутреннего трения методом изгибных колебаний, работающие в среднечастотном диапазоне, позволяют измерять

изменения внутреннего трения, связанные с тонкой дислокационной структурой металлов.

Резонансные методы исследования внутреннего трения твердых тел основаны на возбуждении стоячих волн в образце.

В настоящей работе использовали автоматический прибор для непрерывной регистрации внутреннего трения при изгибных колебаниях стержней с электромагнитным возбуждением в диапазоне высоких частот (950–1000 Гц), амплитуд 10^{-7} – 10^{-4} и температур – от 96 до 600 °С.

Блок-схема прибора приведена на рисунке 11. Сигнал датчика колебаний образца 2 усиливается предусилителем 4. Для контроля амплитуды колебаний имеется вольтметр 18. Усиленный сигнал через фазовращатель и фильтр 5, регулятор усиления и усилитель мощности 7 поступает на возбудитель колебаний. Контроль за сдвигом фаз производится по осциллографу 19. Период колебаний контролируется частотомером 20.

Электрические колебания, поступающие от звукового генератора, преобразуются в механические и подаются на образец через тонкую вольфрамовую проволочку. Механические колебания с помощью аналогичной проволочки снимаются и подаются на электромагнитный преобразователь, где они преобразуются в электрические сигналы.

Поддержание амплитуды колебаний на одном уровне обеспечивается с помощью электронно-моторной следящей системы, изготовленной на базе самопишущего потенциометра 17 типа КСП-4. Сигнал с предварительного усилителя через выпрямитель поступает на вход блока сравнения 9, где сравнивается с постоянным напряжением от блока 12. Величина разбаланса подается в сервоусилитель 10, который управляет работой сервоэлектродвигателя 11. Двигатель 11 изменяет коэффициент усиления K с помощью потенциометра 6, в качестве которого использован реохорд того же КСП-4. Величина амплитуды деформации измерения задается и регулируется потенциометром 13. В такой системе затухание колебаний пропорционально коэффициенту усиления K или напряжению U_B .

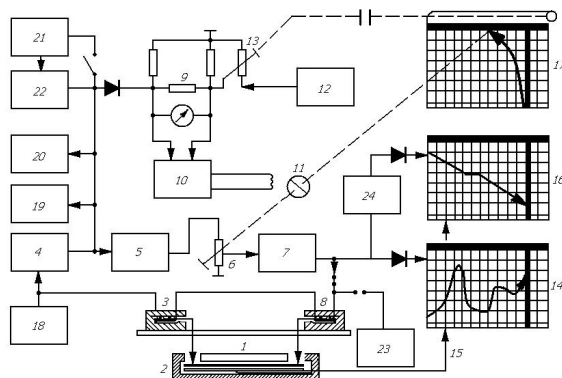


Рисунок 11 - Блок-схема автоматической установки для непрерывной регистрации внутреннего трения и модуля упругости: 1 - нагревательное (охлаждающее) устройство; 2 - образец; 3 - датчик колебаний; 4 - усилитель; 5 - фильтр; 6 - потенциометр; 7 - усилитель мощности; 8 - возбудитель колебаний; 9 - блок сравнения; 10 - сервоусилитель (от КСП-4); 11 - серводвигатель; 12 - стабилизирующий блок напряжений;

13 - потенциометр; 14 - самописец; 15 - термопара; 16 - самописец; 17 - потенциометр; 18 - ламповый вольтметр; 19 - осциллограф; 20 - частотомер; 21 - дискриминатор; 22 - счетчик импульсов; 23 - генератор; 24 - блок: ограничитель амплитуды - частотная цепь - детектор.

Применение усилителя – ограничителя позволяет повысить стабильность работы прибора. Например, вибрация здания не сказывается на стабильности работы схемы.

Абсолютные измерения внутреннего трения проводили с помощью дискриминатора и счетчика импульсов, рассчитывая по формуле

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{1}{\pi n} l \frac{v}{v_n}, \quad (6)$$

где δ – логарифмический декремент колебаний; 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 величины минимальных значений затухания испытуемых образцов. Характеристики внутреннего трения исследуемых сплавов определяли на образцах размерами $1,5 \times 1,5 \times 100$ мм после горячейковки в диапазоне частот 900–1000 Гц при комнатной температуре 20 °С. На каждом образце проводили 5 замеров.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ АКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

5.1 Исследование акустических свойств инструментальных сталей

Акустические характеристики исследованных инструментальных сталей ИН (У8А), ИН (У9А), ИН (У7) представлены в таблицах 6, 7 и на рисунках 9-10.

В таблице 6 представлены акустические характеристики образцов из разработанных инструментальных сталей при соударении с ударником, падающим с разных высот.

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

Таблица 6 - Акустические характеристики образцов инструментальных сталей при соударении

Марка РПС (образцов)	Высота ударника h	Уровни звуковых давлений, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						УЗ, дБА
		1000	2000	4000	8000	16000	31500	
ИН (У8А)	h ₁ = 7 см	42	47	55	59	57	42	62
	h ₂ = 10 см	46	52	58	71	61	42	71
	h ₃ = 12 см	48	55	61	70	62	51	70
	h ₄ = 17 см	52	63	64	82	68	57	82
ИН (У9А)	h ₁ = 7 см	39	52	59	65	56	47	65
	h ₂ = 10 см	54	54	62	68	64	45	68
	h ₃ = 12 см	52	58	65	75	77	48	78
	h ₄ = 17 см	53	55	61	68	76	64	76
ИН (У7)	h ₁ = 7 см	50	47	53	55	52	53	55
	h ₂ = 10 см	58	57	60	71	75	50	75
	h ₃ = 12 см	47	58	64	75	68	55	75
	h ₄ = 17 см	53	58	62	78	65	55	78

- уровни звуковых давлений исследованных образцов изменяются в диапазоне 42-82 дБ;

- максимумы уровней звуковых давлений наблюдаются на частотах 8000 Гц (81 дБ) и 16 000 Гц (78 дБ);

- минимумы уровней звуковых давлений образцов характерны для частоты 1000 Гц (39-42 дБ);

- максимальные значения уровней звуковых давлений, сравниваемых образцов наблюдаются при соударениях с ударником, совершавшим соударение с высоты h₄;

- минимальные значения уровней звуковых давлений, сравниваемых образцов наблюдаются при соударениях с ударниками, совершавшим соударение с высоты h_1 и h_2 ;

Амплитуднозависимое демпфирование звукоизлучения (АЗДЗ) обнаружено в сплавах ИН (У8А), ИН (У9А), ИН (У7).

В соответствии с рисунком 12 эффект амплитуднозависимого демпфирования звукоизлучения не обнаружен. Характеристики звукоизлучения образца при соударении изменяются плавно, т.е. ударник с меньшей энергией удара излучает меньший уровень звука, чем ударник с повышенной кинетической энергией.

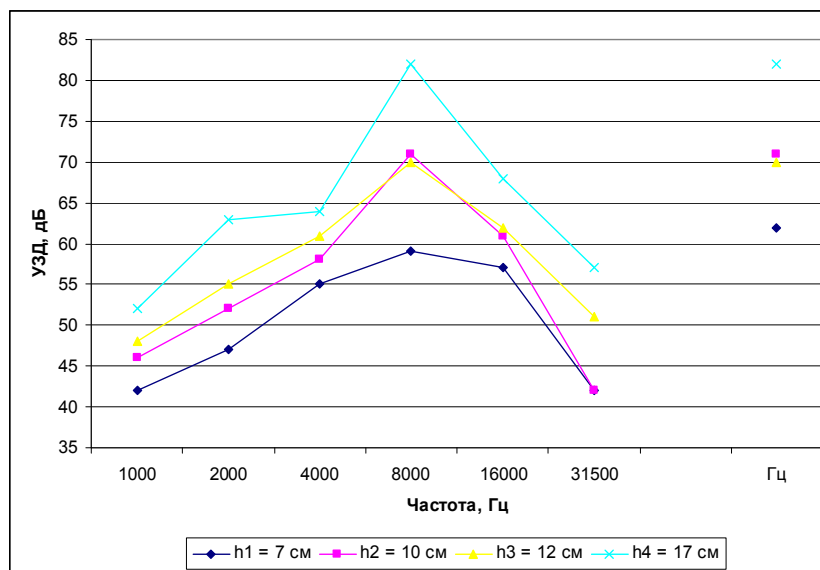


Рисунок 12 – Характеристики звукоизлучения образца ИН (У8А) при соударении:
($h_1 \div h_4$) – высота ударника перед контактом

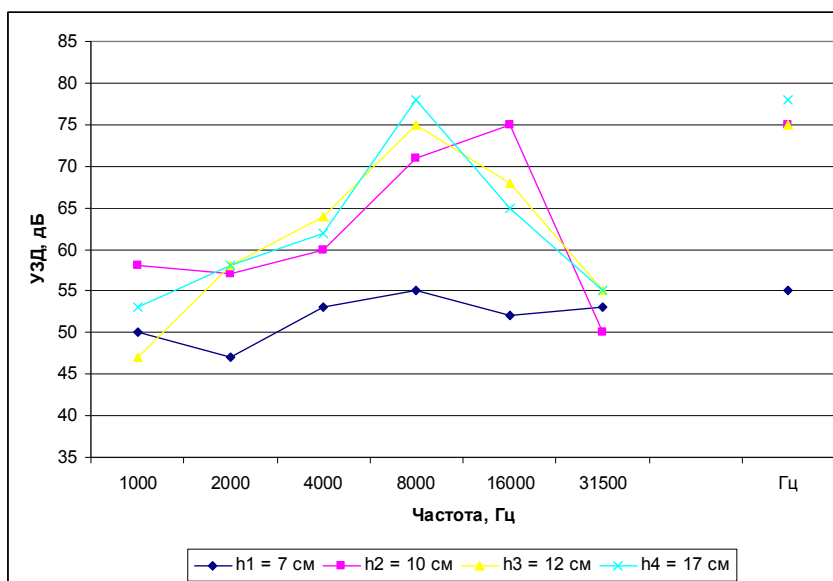


Рисунок 13 – Характеристики звукоизлучения образца ИН (У7) при соударении:
($h_1 \div h_4$) – высота ударника перед контактом

В соответствии с рисунком 13 максимальный эффект амплитудно-зависимого демпфирования звукоизлучения образца ИН (У7) обнаружен на частотах 1000, 4000, 16000 Гц.

На частоте 1000 Гц при соударении образца ИН (У7) ударником с высотой h_1 УЗД=57 дБ, а при соударении ИН(У7) ударником с высотой h_3 УЗД=48 дБ. Эффект АЗДЗ=9 дБ.

На частоте 4000 Гц при соударении образца ИН (У7) ударником с высотой h_3 УЗД=65 дБ, а при соударении образца ИН (У7) ударником с высотой h_4 УЗД=61 дБ. Эффект АЗДЗ=4 дБ.

На частоте 16 000 Гц при соударении образца ИН (У7) ударником с высотой h_2 УЗД=76 дБ, а при соударении образца ИН (У7) ударником с высотой h_3 УЗД=67 дБ. Эффект АЗДЗ= 9 дБ.

На рисунке 14 представлены акустические характеристики рессорно-пружинной стали ИН (У9А) во время соударения с ударником с разной кинетической энергией, определяемой высотой падения ударника. Как видно, максимум УЗД приходится на частоту 16000 Гц и составляет 78 дБ при соударениях с ударником ($h_3=12$ см). Минимум УЗД наблюдается на частотах 1000 Гц и 31500 Гц. Амплитуднозависимое демпфирование наблюдается в следующих случаях:

- на частоте 1000 Гц: при соударениях ($h_2=10$ см) УЗД соответствует 55 дБ, а при большой энергии удара ($h_3=12$ см) УЗД равно 51дБ, т.е. АЗДЗ соответствует 4 дБ; даже при соударении ударника с высоты ($h_4=17$ см), УЗД не превышает 55 дБ, а фиксируется значением 54 дБ; очевидно повышенное затухание звука при увеличении амплитуды удара;

Результаты экспериментов и характер кривых уровней звуковых давлений инструментальных сталей имеют следующий вид:

- уровни звуковых давлений исследованных образцов изменяются в диапазоне 41-80 дБ;

- максимумы уровней звуковых давлений наблюдаются на частотах 4000 Гц (74-76 дБ) и 8 000 Гц (75-76 дБ);

- минимумы уровней звуковых давлений образцов характерны для частот 1000 и 31 500 Гц (42-45 дБ);

- максимальные значения уровней звуковых давлений, сравниваемых образцов характерны при соударениях с ударником высотой h_4 ;

- минимальные значения уровней звуковых давлений, сравниваемых образцов характерны при соударениях с ударниками высотой h_1 и h_2 ;

- максимумы уровней звуков по характеристике «А» образцов сталей 65, 60Г, У7 наблюдаются при соударении с ударником высотой h_4 (76-81 дБ).

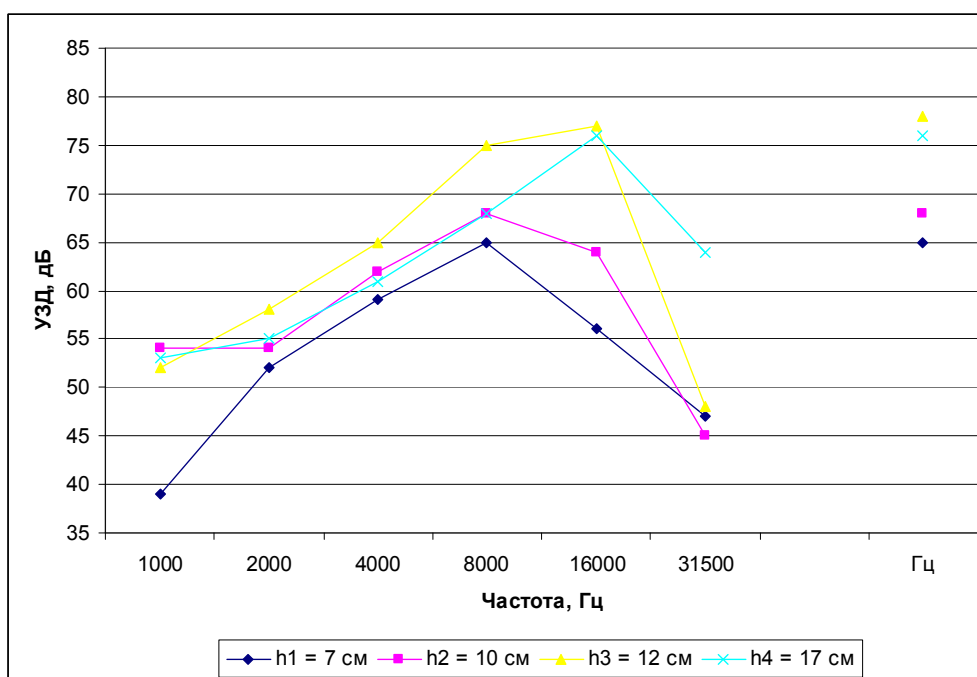


Рисунок 14 – Характеристики звукоизлучения образца ИН (У9А) при соударении: ($h_1 \div h_4$) – высота ударника перед контактом

Таблица 7 - Акустические характеристики стандартных инструментальных сталей

Марка сталей	Высота ударника перед соударением	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц						УЗ, дБА
		1000	2000	4000	8000	16000	31500	
У9А	$h_1 = 7$ см	41	45	62	62	53	44	65
	$h_2 = 10$ см	45	52	63	63	62	47	65
	$h_3 = 12$ см	44	67	72	71	63	47	73
	$h_4 = 17$ см	50	62	75	74	64	67	76
У8А	$h_1 = 7$ см	46	48	67	64	58	53	67
	$h_2 = 10$ см	49	56	66	67	65	52	68
	$h_3 = 12$ см	50	71	73	74	60	49	75
	$h_4 = 17$ см	56	68	72	75	68	63	76
У7	$h_1 = 7$ см	49	52	67	65	61	55	68
	$h_2 = 10$ см	55	59	64	67	67	55	70
	$h_3 = 12$ см	54	69	65	66	66	57	69
	$h_4 = 17$ см	59	70	73	74	62	68	81

Амплитуднозависимое демпфирование звукоизлучения у образца У9А обнаружено на частотах 2000 и 31500 Гц.

На частоте 2000 Гц при соударении образца У9А ударником с высоты h_3 УЗД=68 дБ, а при соударении образца У9А ударником с высоты h_4 . УЗД=63 дБ. Эффект АЗДЗ=5дБ (рисунок 15).

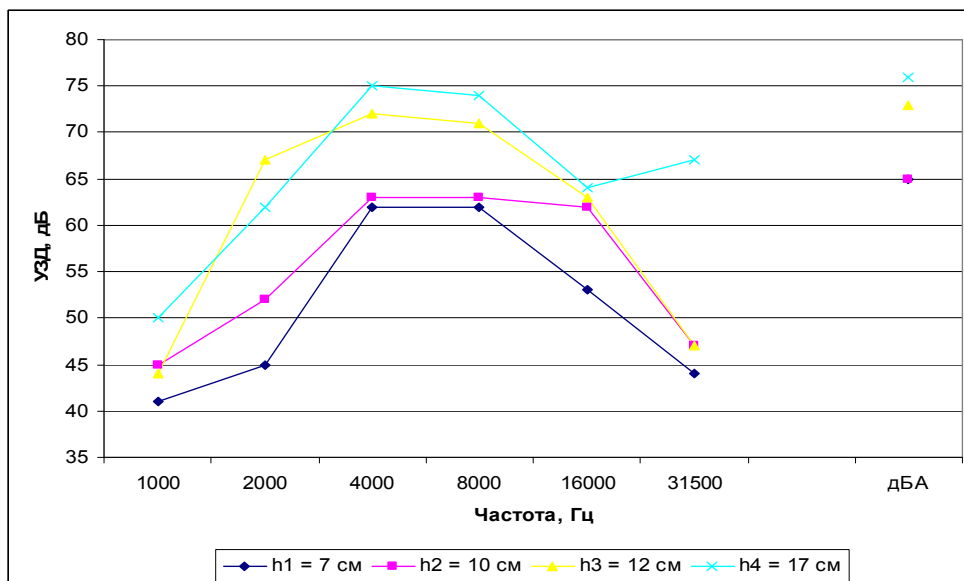


Рисунок 15 - Характеристики звукоизлучения инструментальных сталей У9А при соударении: ($h_1 \div h_4$) – высота ударника перед контактом

На частоте 31500 Гц при соударениях образца стали У9А с ударником с высоты (h_1) УЗД=46 дБ, а при соударении образца У9А ударником (h_2) УЗД=44 дБ. Эффект АЗДЗ=1 дБ.

На рисунке 16 представлены акустические характеристики инструментальной стали У8А. Амплитуднозависимое демпфирование звукоизлучения для этой стали наблюдается на частотах:

- 1000 Гц при соударениях образца стали У8А с ударником с высоты ($h_2=10$ см) и ($h_3=12$ см), т.к. уровни звукового давления здесь соответственно 51 дБ и 49 дБ;

- 4000 Гц при соударениях образца стали У8А с ударником с высоты ($h_1=7$ см) и ($h_2=10$ см), т.к. уровни звукового давления соответствуют значениям 66 дБ и 65 дБ;

- 16000 Гц при соударениях образца стали У8А с ударником с высоты ($h_2=10$ см) и ($h_3=12$ см), т.к. уровни звукового давления соответствуют значениям 66 дБ и 61 дБ;

- 31500 Гц при соударениях образца стали У8А с ударником с высоты ($h_1=7$ см), ($h_2=10$ см) и ($h_3=12$ см) т.к. уровни звукового давления соответствуют значениям 51 дБ; 51 дБ и 48 дБ.

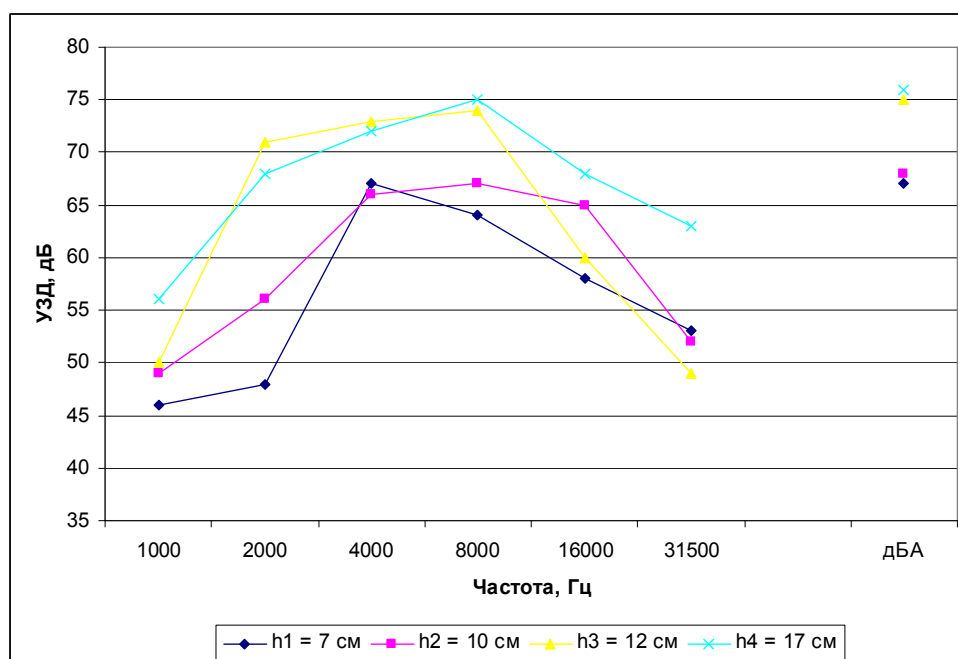


Рисунок 16 - Характеристики звукоизлучения инструментальной стали У8А при соударении: ($h_1 \div h_4$) – высота ударника перед контактом

На рисунке 17 представлены акустические характеристики инструментальной стали У7 при соударении с ударником с разной кинетической энергией, определяемой высотой, с которой совершает свободной скольжение ударник ($h_1 \div h_4$). Максимум уровней звукового давления обнаруживается на частоте 8000 Гц (76 дБ), минимумы – на частоте 1000 Гц (47 дБ).

Особенности изменения уровней звукового давления в частотном диапазоне определяются амплитуднозависимым демпфированием звукоизлучения, которое наблюдается на следующих частотах:

- 1000 Гц при $h_2=10$ см и $h_3=12$ см, т.к. уровни звукового давления в этих случаях неадекватны: 54 дБ и 53 дБ;
- 4000 Гц при $h_1=7$ см и $h_2=10$ см, т.к. уровни звукового давления также неадекватны: 68 дБ и 65 дБ; $\Delta A_{ЗДЗ} = 3$ дБ;
- 8000 Гц при $h_1=7$ см и $h_2=10$ см; $\Delta A_{ЗДЗ} = 3$ дБ; и при $h_3=12$ см и $h_4=17$ см; $\Delta A_{ЗДЗ} = 1$ дБ;
- 16000 Гц при $h_2=10$ см; $h_3=12$ см и $h_4=17$ см, т.к. уровни звукового давления соответствуют значениям 68 дБ; 63 дБ и 63 дБ.

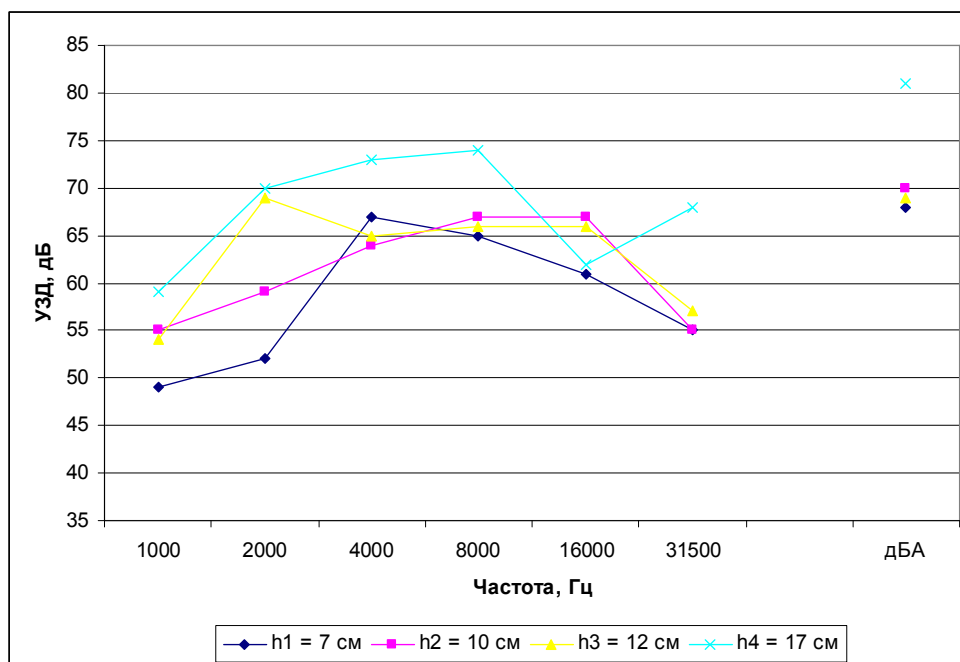


Рисунок 17- Характеристики звукоизлучения инструментальной стали У7 при соударении: ($h_1 \div h_4$) – высота ударника перед контактом

5.2 Механизмы затухания колебаний в инструментальных сталях

Источниками затухания колебаний в сталях У7, У8А, У9А, ИН (У7), ИН (У8А), ИН (У9А) в амплитуднозависимой области являются микропластические деформации металлической матрицы, потери энергии на межфазных границах, магнитомеханическое затухание ферромагнитной матрицы, а также затухание на границе скрепленных двух металлов.

Демпфирующая способность металлической матрицы определяется степенью развития в ней микропластической деформации в матричной фазе, зависящей от ее структуры и соответственно от ее механических свойств. Наибольшее демпфирование наблюдается в случае ферритной структуры. Перлитная структура обеспечивает меньшее демпфирование; феррито-перлитная занимает промежуточное положение. Феррито-трооститная структура из-за присутствия феррита имеет более высокие демпфирующие свойства по сравнению с перлитной. Закаленная сталь с мартенситной структурой имеет большее демпфирование, чем с трооститной, что объясняется значительным увеличением плотности дислокаций и возникновением пиков напряжений на концах мартенситных кристаллов нанопокртия обеспечивают дополнительное демпфирования (таблица 7).

Таблица 8– Механические свойства структурных составляющих стали

Структура металлической матрицы	σ_B , МПа	δ , %	a_H , МДж/м ²	Твердость по Бринеллю НВ
1	2	3	4	5

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4	5
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

Определенный вклад в демпфирование инструментальной стали вносят потери энергии колебаний на границе раздела металлическая матрица – неметаллическое включение, которое зависит от формы этих включений.

5.2.1 Механизмы демпфирования в инструментальных сталях

Затухание колебаний вследствие магнитных потерь. Диссипация упругих колебаний в ферромагнитных материалах выше, чем в неферромагнитных. Это объясняется тем, что наряду с рассеянием энергии при механических колебаниях, которое обусловлено механизмами, присущими большинству твердых тел, ферромагнитным материалам свойственны также магнитные потери, связанные с магнитомеханическим гистерезисом. Основное значение для рассеяния энергии в ферромагнетиках имеет магнитомеханический гистерезис.

Затухания энергии колебаний, связанные с магнитомеханическим гистерезисом, возникают в том случае, когда знакопеременное циклическое деформирование ферромагнитного тела вызывает необратимое смещение границ (стенок) между доменами. В случае приложения внешних сил изменяется расположение границ между доменами и направление самопроизвольной намагниченности в доменах. Если ферромагнетик обладает положительной магнитострикцией, то намагниченность в доменах стремится к ориентации в направлении возникших растягивающих напряжений; если же магнитострикция отрицательна, то вектор намагниченности в доменах ориентируется перпендикулярно направлению этих напряжений. Под действием циклически изменяющихся знакопеременных напряжений происходит непрерывное перемещение границ доменов в двух взаимно перпендикулярных направлениях с частотой, равной частоте приложенных механических колебаний. Таким образом, затухание колебаний в ферромагнитных металлах и сплавах происходит в результате дополнительных затрат энергии на смещение междоменных границ.

Магнитомеханический гистерезис в ферромагнитных металлах возникает в отсутствие внешнего магнитного поля. Он особенно велик у металлов, которые имеют высокую проницаемость в слабых магнитных полях и большую магнитострикцию. По аналогии с магнитным гистерезисом деформацию сдвига можно уподобить индукции B , а напряжение – напряженности магнитного поля H .

Магнитомеханический гистерезис в значительной степени зависит от магнитного состояния образца и от температуры. Действительно, затухание колебаний заметно падает при приближении к состоянию насыщения и при нагреве. При температуре выше точки Кюри затухание становится столь же малым, как и в состоянии намагниченности насыщения.

Наблюдаемое в ферромагнетиках сильное затухание колебаний является следствием самопроизвольной намагниченности и имеет место в том случае, когда знакопеременные упругие напряжения, возникающие в металлах под действием внешних сил, вызывают переориентацию векторов доменов, перемещение границ которых и приводит к значительному рассеянию энергии, т. е. к потерям на магнитомеханический или магнитоупругий гистерезис.

Величину магнитомеханического затухания можно измерить, выделив ее из общего затухания, предварительно замерив затухание в отсутствие поля, а затем при наложении поля, которое должно быть достаточно сильным, чтобы подавить смещение границ доменов под действием приложенных напряжений.

К металлам, обладающим ферромагнитными свойствами, относятся железо, никель, кобальт и гадолиний. Элементарными носителями ферромагнетизма являются собственные магнитные моменты электронов, однако они создают ферромагнетизм лишь в очень немногих веществах. Объясняется это спецификой атомного и электронного строения ферромагнитных веществ.

Сплавы ферромагнитных металлов различаются температурой точки Кюри.

Изучению неупругих свойств железа посвящено много работ, однако большая часть их относится к внутреннему трению железа в амплитуднонезависимой области.

Исследование вклада магнитомеханических потерь в затухание колебаний в сталях и других ферромагнитных сплавах представляет большой практический интерес, помогает раскрыть природу высокого демпфирования в этих материалах и понять механизм и степень влияния разнообразных факторов, в том числе термической обработки, на демпфирующие свойства.

Высокое затухание, обнаруженное в металлах, обладающих ферромагнетизмом, явилось основанием для создания на их базе ряда сплавов с различным комплексом свойств, но различающихся высокой демпфирующей способностью, которая позволяет выделить эти сплавы в особую группу конструкционных материалов.

Высокая демпфирующая способность инструментальных сталей обусловлена искаженностью или дефектностью структуры, фон демпфирования – общим искажением решетки и внутренними напряжениями, амплитуднозависимое демпфирование – наличием подвижных двумерных дефектов типа границ двойников.

Описанные закономерности влияния режима термообработки на демпфирующую способность инструментальной стали отвечают основным

положениям теории высокого демпфирования, согласно которой большое рассеяние энергии квазиупругих колебаний в металлах и сплавах обусловлено при малых амплитудах колебаний общим искажением атомной структуры, характерным для мартенсита, а при значительных амплитудах колебаний – обратимым перемещением подвижных двумерных дефектов под действием циклически изменяющихся напряжений. Последнее для рессорно-пружинных сталей реализуется в обратимой реориентации тетрагонального искажения, т. е. обратимым перемещением двойниковых границ в возникших мартенситных кристаллах, а также двойниковых границ между этим мартенситом и исходной матричной фазой.

Рассеяние энергии при смещении границ двойников и антиферромагнитных доменов может происходить вследствие трения при перемещении двойниковой границы и благодаря микровихревым токам при вращении магнитных моментов атомов. Какой из этих механизмов является главным, пока не установлено.

Все легирующие элементы, находящиеся в γ -твердом растворе, в той или иной степени снижают демпфирующую способность рессорно-пружинных сталей. При этом до некоторого определенного и характерного для каждого элемента содержания уменьшение уровня демпфирования весьма незначительно и для практики использования сплавов несущественно, тогда как дальнейшее увеличение содержания элементов резко снижает демпфирующую способность. Вследствие большой чувствительности демпфирующей способности к предыстории получения и обработке сплавов, неодинаковой для объектов, изучаемых в других работах, содержание легирующих элементов, выше которого начинается резкое падение демпфирующей способности, различно.

Демпфирующая способность инструментальных сталей как при малых, так и при значительных амплитудах может составлять не менее 1%, что и позволяет отнести эти стали к сплавам повышенного демпфирования. Повышенное демпфирование в ИС наблюдается только в том случае, если в их структуре имеется мартенсит – это результат влияния нескольких возможных механизмов рассеяния энергии: смещения межфазных границ между мартенситом и исходной высокотемпературной фазой, между отдельными видами мартенсита и смещения двойниковых границ в мартенсите. Относительный вклад каждого из перечисленных механизмов рассеяния энергии для конкретных случаев неодинаков. Он зависит от вида преобладающей мартенситной структуры, химического состава сплава и температуры испытания. Определение превалирующего механизма обычно весьма затруднено. В области температур выше мартенситного превращения демпфирующая способность не превышает 1%. При понижении температуры в области мартенситного превращения демпфирующая способность РПС резко возрастает и достигает максимума при температуре, соответствующей, вероятнее всего, структуре с 50% мартенсита. При дальнейшем снижении температуры демпфирующая способность несколько уменьшается, хотя и остается на довольно высоком уровне. Наличие максимума на

температурной зависимости демпфирующей способности можно объяснить сменой основного механизма рассеяния энергии.

Определенный вклад в рассеяние энергии инструментальной стали вносит и магнитомеханическое внутреннее трение, поскольку металлическая матрица стали, как правило, ферромагнитна. Как ферромагнитный сплав, рессорно-пружинные стали, имеют узкую петлю гистерезиса, высокое значение индукции в сильных и слабых полях, высокую магнитную проницаемость μ и малую коэрцитивную силу H_c . Магнитные свойства рессорно-пружинных сталей в отличие от легированных сталей меньше зависят от напряжений в отливке, температуры и сотрясений.

Нанесение нанопокровов (послойно по 20 нм) на поверхность инструментальных сталей повышает диссипативные свойства и снижает звукоизлучения.

5.3 Характеристики диссипации инструментальных сталей

На устройстве для исследования акустических и вибрационных свойств пластинчатых образцов, с помощью осциллографа PCS-500 записаны осциллограммы затухания звукового импульса от соударения образцов сталей с ударником с различной кинетической энергией. По этим осциллограммам определены такие демпфирующие свойства, как логарифмический декремент, относительное рассеяние и внутреннее трение.

На рисунках 18-21 представлены осциллограммы затухания звукового импульса от соударения инструментальных сталей с ударником с различной кинетической энергией.

На рисунке 18 представлена осциллограмма затухания звукового импульса от соударения стандартной инструментальной стали (марки У9А) с ударником. По осциллограмме, приведенной на рисунке 18 определены демпфирующие характеристики инструментальной стали У9А, которые равны $\delta=0,01180$; $\psi=0,02360$; $Q^{-1}=0,00376$.

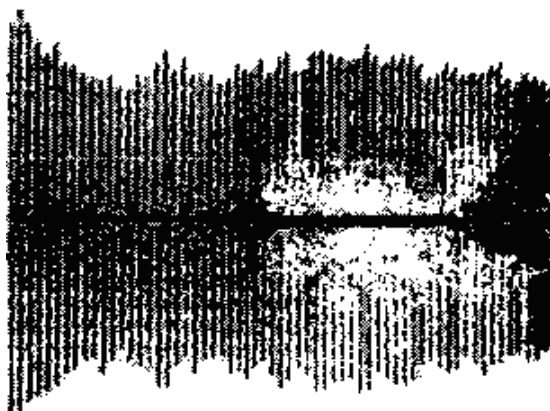


Рисунок 18 - Осциллограмма затухания звукового импульса от соударения инструментальной стали У9А с ударником (h_1) $\delta=0,01180$; $\psi=0,02360$; $Q^{-1}=0,00376$

На рисунке 19 представлена осциллограмма затухания звукового импульса от соударения разработанной инструментальной стали ИН (У8А) с ударником (h_1). По осциллограмме, приведенной на рисунке 19, определены демпфирующие характеристики инструментальной стали ИН (У8А), которые равны $\delta = 0,03820$; $\psi = 0,076440$; $Q^{-1} = 0,01218$ и значения которой намного выше, чем у стандартной инструментальной стали У9А.

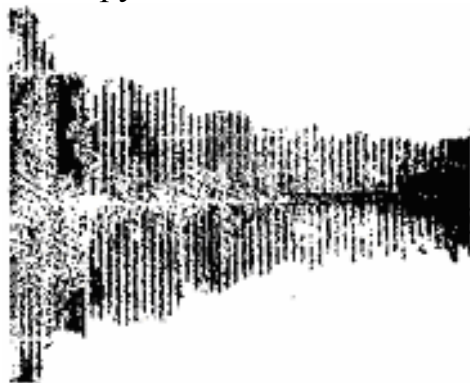


Рисунок 19 - Осциллограмма затухания звукового импульса от соударения стали ИН(У8А): $\delta = 0,03820$; $\psi = 0,076440$; $Q^{-1} = 0,01218$

На рисунке 20 представлена осциллограмма затухания звукового импульса от соударения разработанной инструментальной стали У9А с ударником (h_1). По осциллограмме, приведенной на рисунке 20, определены демпфирующие характеристики инструментальной стали ИН (У9А), которые равны $\delta = 0,01732$; $\psi = 0,03465$; $Q^{-1} = 0,00552$ и значения которых выше, чем у стандартной инструментальной сталей, но по сравнению с разработанной рессорно-пружинной сталью ИН (У9А) имеют меньшие значения.



Рисунок 20 - Осциллограмма затухания звукового импульса от соударения сплава ИН (У9А): $\delta = 0,01732$; $\psi = 0,03465$; $Q^{-1} = 0,00552$

На рисунке 21 представлена осциллограмма затухания звукового импульса от соударения разработанной инструментальной стали ИН (У7)с ударником (h_1). В соответствии с рисунком 21 по осциллограмме определены демпфирующие характеристики демпфирующей

инструментальной стали ИН (У7), которые равны $\delta = 0,08459$; $\psi = 0,16910$; $Q^{-1} = 0,02694$ и значения которых выше по сравнению с разработанными инструментальными сталями ИН (У8А) и ИН (У9А).

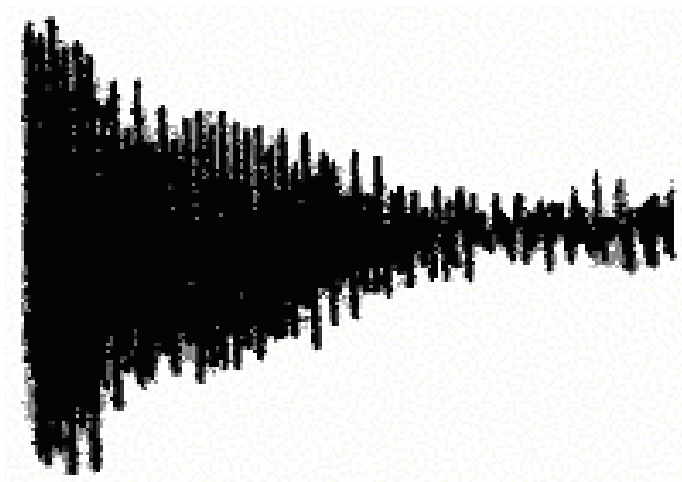


Рисунок 21 - Осциллограмма затухания звукового импульса от соударения сплава ИН (У7) (закалка, низкий отпуск): $\delta = 0,08459$; $\psi = 0,16910$; $Q^{-1} = 0,02694$

В соответствии с рисунками 22-24 на приведенных осциллограммах видно, что разработанная инструментальная сталь ИН(У7) имеет повышенные значения скорости затухания и демпфирующих характеристик ($\delta = 0,08459$; $\psi = 0,16910$; $Q^{-1} = 0,02694$) по сравнению со стандартной рессорно-пружинной сталью 65, а также с вновь разработанными инструментальными сталями ИН (У8А), ИН (У9А), ИН(У7).

В данной работе, помимо исследования акустических характеристик сплавов, сделана попытка установить связь уровней звуков и уровней виброускорения с такими характеристиками, как внутреннее трение, упругие свойства (модуль Юнга, модуль сдвига) и структурно-чувствительной характеристикой – удельным электрическим сопротивлением. Результаты исследований приведены в таблицах 9-12 и на рисунке 22.

В таблице 9 приведены уровни внутреннего трения, дисперсия опыта и уровни звука всех исследованных сплавов в исходном состоянии. Данные, приведенные в таблице, показывают, что инструментальным сталям и демпфирующим сталям с нанопокрытиями соответствуют данные значения внутреннего трения.

В соответствии с рисунком 22 видно, что по данным приведенным в таблице 9, установлена прямая связь внутреннего трения от уровней звука сплавов: чем выше уровни звука сплавов, тем ниже значения внутреннего трения.

Таблица 9 - Уровни внутреннего трения, дисперсия опыта и уровни звука сплавов в исходном состоянии

Марка сплава	Внутреннее трение, $\times 10^4$	Дисперсия опыта, $S^2 \times 10^4$	Уровень звука, дБА
1	2	3	4

Продолжение таблицы 9

1	2	3	4
ИН (У9А)	16,255	0,5865	65
ИН (У8А)	18,836	0,4881	62
У7	23,065	0,8961	68
У8А	24,268	0,5650	68
У9А	25,138	0,4998	65
ИН (У7)	32,268	0,2360	55

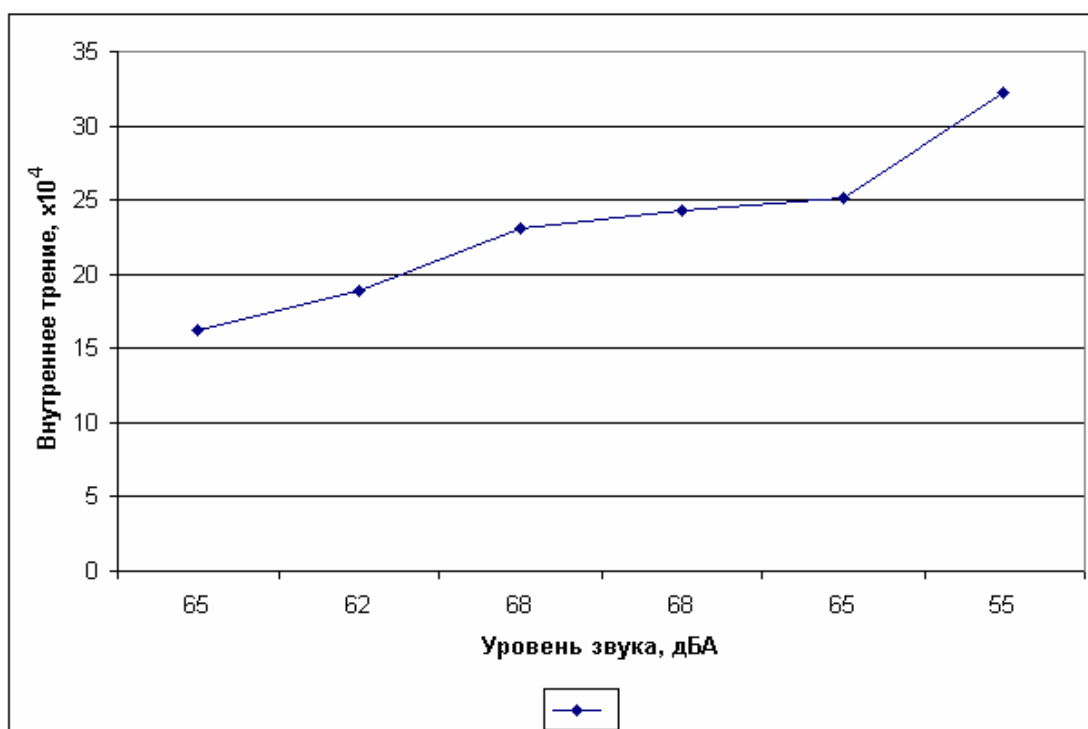


Рисунок 22 – Зависимость внутреннего трения от уровня звука

В таблице 10 представлены упругие свойства исследованных сплавов такие, как модуль сдвига, модуль Юнга и уровни звука сплавов.

Таблица 10 – Упругие свойства исследованных сплавов

Марка сплава	Период колебаний, Т, с	T^2 , c^2	Модуль сдвига, $G \times 10^{10}$, Па	Модуль Юнга, $E \times 10^{10}$, Па	Уровень звука, дБА
1	2	3	4	5	6
У9А	0,0835	0,0072	3,561	8,90	65
У8А	0,1122	0,0107	2,721	6,58	68
У7	0,0836	0,0087	2,871	6,96	68
ИН (У8А)	0,0914	0,0086	3,655	8,99	65
ИН (У9А)	0,911	0,0077	8,219	8,76	65

Продолжение таблицы 10

1	2	3	4	5	6
ИН (У7)	0,1866	0,0639	8,655	9,25	55

На рисунке 23, 24 представлены зависимости уровней звука, уровней виброускорения стале́й от удельного электросопротивления. По полученным результатам построена зависимость, из которой видно, что между уровнями звука стале́й и удельным электросопротивлением наблюдается связь: рост удельного электросопротивления вызывает снижение уровня звука.

Таблица 11 – Упругие свойства исследованных сплавов

Марка сплава	Период колебаний, Т, с	T^2 , с ²	Модуль сдвига, $G \times 10^{10}$, Па	Модуль Юнга, $E \times 10^{10}$, Па	Уровень звука, дБА
У9А	0,0846	0,0072	3,495	8,60	65
У8А	0,1036	0,0107	2,646	6,51	68
У7	0,0926	0,0087	2,772	6,82	68
ИН (У8А)	0,0931	0,0086	3,638	8,95	62
ИН (У9А)	0,922	0,0077	8,175	8,56	65
ИН (У7)	0,1922	0,0639	8,593	9,13	55

На рисунке 23 представлена зависимость уровней звука стале́й от модуля Юнга. По полученным результатам построена зависимость, из которой видно, что между уровнями звука стале́й и модулем Юнга нет прямой зависимости.

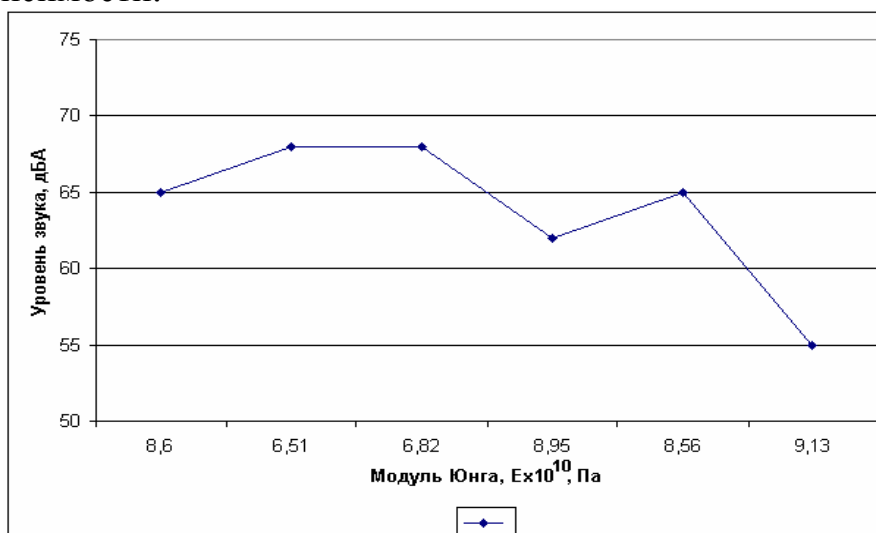


Рисунок 23 - Зависимость уровней звука исследуемых образцов от модуля Юнга

Таблица 12 – Удельное электросопротивление опытных сталей

Марка стали	Удельное электро- сопротивление, ρ , Ом·м·10 ⁶ ,	Уровень звука, дБА
У9А	16,22	62
У8А	13,34	66
У7	14,25	71
ИН(У8А)	11,25	64
ИН(У9А)	15,22	66
ИН(У7)	16,34	54

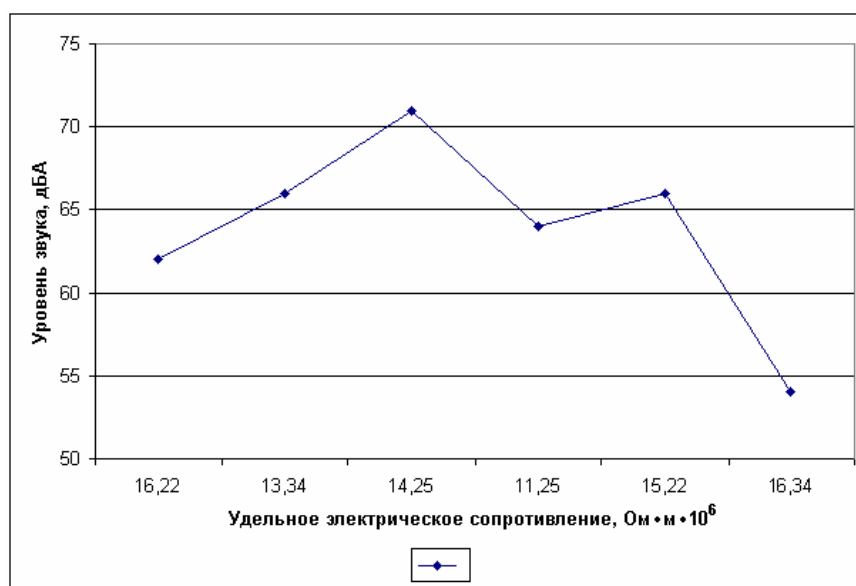


Рисунок 24 – Зависимость общего уровня виброускорения от удельного электросопротивления сплавов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии представлены следующие материалы:

- изготовлены образцы пластинчатой формы размерами 50x50x5мм для исследования звукоизлучения при соударении; образцы размерами 1,5x1,5x100мм для исследования внутреннего трения при изгибных колебаниях по методу Тульского технического университета; 10x10x10мм для исследования плотности; 3x3x100мм для исследования удельного электросопротивления по методу обратного моста;

- исследованы демпфирующие свойства (внутреннее трение, относительное рассеяние, логарифмический декремент) инструментальных сталей У7, У8А, У9А (без покрытия);

- исследованы акустические свойства (уровень звукового давления, уровни звука, скорость затухания звука) инструментальных сталей с нанопокрывтием (образцы ИН (У7), ИН (У8А), ИН (У9А));

- процессы PVD основаны на генерации вещества в вакуумное пространство камеры с подачей реакционного газа (N_2 , O_2 , CH_4 и др.). Различие технологий PVD состоит в принципах генерации вещества, различной степени ионизации паро-ионного потока, конструкциях и технологических особенностях установок. Наибольшее применение в практике производства инструмента покрытием нашли системы низковольтного вакуумно-дугового испарения, получившие наименование arc-PVD (КИБ – наименование процесса в странах СНГ);

- процессы PVD основаны на генерации вещества катодным пятном вакуумной дуги сильноточного, низковольтного разряда, развивающегося исключительно в парах материала катода в вакуумной камере, металлический корпус которой служит анодом. Характерной особенностью процессов PVD является высокая химическая активность испаряемого вещества, состоящего из высоко ионизированного потока низкотемпературной плазмы (степень ионизации может достигать 90÷95 %). Субстрат и осаждаемый конденсат подвергается интенсивной бомбардировке ионами испаряемого металла, что приводит к частичному распылению приповерхностных слоев субстрата и повышению температуры в зоне формирования покрытия. В результате резко возрастает подвижность атомов на поверхности субстрата, происходит дополнительная активация осаждаемого конденсата, формируется прочная адгезионная связь между покрытием и субстратом;

- для получения multifunctional покрытий на рабочих поверхностях инструментальных сталей У7, У8А, У9А была использована специальная установка на основе модернизированного вакуумно-дугового агрегата ННВ-6,6-ИЗ; установка позволяет сепарировать нейтральные частицы (микрокапельная фаза). Сепарация капельной составляющей производится в результате отклонения заряженных частиц ионного потока (ионы, электроны) мощным магнитным полем;

-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;

-нанопокрывание поверхности инструментальной стали осуществляется поэтапно (послойно) по 20нм, общая толщина покрытий достигает 200нм-2мкм;

-исследование акустических характеристик инструментальных сталей показало, что стали с нанопокрыванием и (ИНУ7, ИНУ8А, ИНУ9А) при соударении генерируют шума на 6-8 дБ ниже, чем без покрытия;

-исследование демпфирующих свойств сталей показал, что образцы с нанопокрываниями (ИНУ7, ИНУ8А, ИНУ9А) имеют повышенные демпфирующие свойства и пониженное звукоизлучение.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Langley John M. Noise. The third pollution 29th Electrical Furnace Conference, Toronto Meet, 1971, Proc. Vol. 29. New. York. 1972, P. 67-78.
- 2 Kuwana Sonoko. Nihon on Kyo gakkaiishi // *J Acoust. Jap.* - 1996. 52, №11- С.891-895.
- 3 Akamamsu Katsuji. Nihon on Kyo gakkaiishi // *J. Acoust. Soc. Jap.* - 1996. 52, №11 С.900-904.
- 4 Утепов Е.Б., Национальный обзор по охране труда в Республики Казахстан. //Труды шестой международной научно-технической конференции «Новое в безопасности жизнедеятельности» (охрана труда, экология, валеология, защита человека в ЧС, токсикология), часть I, Алматы, 2004, С. 69-120.
- 5 Тимощенко В.А., Марталов В.К. Снижение шума в источниках образования заготовительных производств обработки металлов. //Материалы Всесоюзной научно-методической конференции «Акустическая экология - 90». Под ред. д.т.н. Н.И. Иванова. – Л.: ЛДНТП, 1990. - С. 72-74.
- 6 Методы снижения шума энергетических установок и технологического оборудования в машиностроении. (Под ред. проф. Е.Я.Юдина). – Тр. Моск. высш. техн. училища, №171. вып.1. – М., 1973. – С.131.
- 7 Алексеев С.П., Казаков А.М., Колотилов Н.Н. Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1970. – 207с.
- 8 Mosskov J.I., Ellema J.H. Extra-auditory effects in short-term exposure to noise from a textile factory. International Archives of Occupational and Environmental Health-Internationales Archives fur Arbeits – und Umweltmedizin, 1977. Vol. 40, No.3, P. 174-475.
- 9 Cartwright L.B., Thompson R.N. American Industrial Hygiene Association Journal. 1975, Vol.36, No9, P. 653-658.
- 10 Шостак А.Г. Борьба с промышленным шумом. – Киев: УкрНИИНТИ, 1972. – 121с.
- 11 Отчет о НИР (закл). Гигиеническая оценка комплекса физических факторов и разработка мероприятий по улучшению условий труда рабочих отделения шлакопереработки металлургического комбината «Азовсталь». /Дон. научн. центр гигиены труда и профилактики травматизма. 1991, № 10, серия 8.
- 12 Лагунов Л.Ф., Осипов Г.Л. Борьба с шумом в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1980. 150с.
- 13 Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. – 4-е изд., перераб. и доп.-Л.: Политехника, 1990. -272с., ил.
- 14 Суйесинова Г.И., Турлыбекова М.Р., Ахмадиева Т.К. Исследование диссипативных свойств трубчатого образца при соударении //Труды республиканской научной конференции «Молодые ученые – будущее науки», 1-часть, Алматы, КазНТУ, 2004, С. 176-177.

- 15 Computing aerodynamically generated noise. Wells Valana L., Renaut Rosemary A. *Annu. Rev. Fluid Mech. Vol 2*, Palo Alto (Calif.), 1997, P. 161-199.
- 16 Effects of belt fensioning on the noise emiisions of clothes washers //Özfürk Güneut //Acustica. – 1996. 82, Suppl. № 1. – C.S193.
- 17 Air conditioning system noise control //Sound and Vibr. – 1995. – 29, №11. – C.14.
- 18 Tian Guocheng, Song Kogjie, Xiong Yieping //Shfngxue xuebao // Acta acoust. – 1995. – 20, № 5. – C. 368-376.
- 19 Утепов Е.Б., Умирбаева Р.С., Кожахан А.К. Снижение шума в источнике возникновения. //Труды пятой международной научно-технической конференции «Новое в охране труда, окружающей среды и защите человека в чрезвычайных ситуациях» Часть I.: Алматы: КазНТУ, 2002, С. 268.
- 20 Namba Seiichiro. *Nihon onkyo gakkaishi = J. Acoust. Soc. Jap.* 1997. 53, № 9, P. 720-725.
- 21 Сулеев Д.К., Омирбай Р.С., Шевцова В.С. Исследование шума соударения трубчатых образцов //Труды республиканской научной конференции «Молодые ученые – будущее науки», 1-часть, Алматы, КазНТУ, 2004, С.172-175.
- 22 Защита от вибрации и шума в строительстве: Спр. /Новак СМ., Логвинец А.С. – Киев.: Будивильник, 1990. 183 с.
- 23 Утепов Т.Е. Вредное воздействие шума на организм человека. //Труды пятой международной научно-технической конференции «Новое в охране труда, окружающей среды и защите человека в чрезвычайных ситуациях» Часть I, Алматы: КазНТУ, 2002. С. 230-231.
- 24 Математические модели виброакустических процессов. Зимин Л.С. Вест. Самар. гос. техн. ун-та. 1998, №6, С. 146-148.
- 25 Хигаси Акихико. Hiroshima daigaku kogakubu kinky hokoku // Bull. Fac. Eng. Hiroshima Univ. 1997. 46, June Suppl. S85 – S86.
- 26 Утепов Е.Б., Лидтке В.Ю., Мякотин В.Н., Утепов Т.Е. Снижение шума в направляющих трубах токарных автоматов. – Алматы: ЧП «Шевченко», 1998, 72 с.
- 27 О применении движущегося газового слоя для снижения шума струи. Кузнецов В. М., Потокин А. А. *Акуст. ж.* 1998. 44, № 2, С. 239-246.
- 28 Virtual reference signals for active noise cancellation system. Akiho Masaichi, Haseyama Miki, Kitajima Hideo. *J. Acoust Soc. Jap. E.* 1998. 19, № 2, P. 95-103.
- 29 The design of advanced aircraft structures to resist acoustic fatigue; work in progress. Cunningham P. R., Xiao Y., White R. G. *Strain.* 1998. 34, № 2, P. 43-49.
- 30 Noticeability of a decrease in aircraft noise. Fidell Sanford, Silvati Laura, Pearsons Karl. *Noise Conor. Eng. J.* 1998. 46, № 2, P. 49-56.
- 31 Сулеев Д.К., Утепов Т.Е., Заликанова И.П., Исаханова А.Б. Демпфирующие стали с пониженным звукоизлучением //Труды республиканской

научной конференции «Молодые ученые – будущее науки», 1-часть, Алматы, КазНТУ, 2004, С.179-183.

32 Генерация и методы снижения шума и звуковибрации: (некоторые аспекты современного состояния проблемы) /Кравчун П.Н. - М.: МГУ 1991. – 183 с.

33 System simulation methods for solving noise and vibration problems /Stoyer Glenjim Teik Chin //Sound and Vibr. - 1993. - 27, №4, С. 14-18.

34 Kamata Minoru, Yamada Takuya, Yamazaki Torn. Nihon kikai gakkai ronbunshu. C = Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. C 1997. 63, № 610, P. 1983-1988.

35 Active noise control. Elliott S. J., Nelson P. A. *Noise /News Int.* 1994. 2, № 2, P. 75-98.

36 Nakano Aritomo. Puranto enjinia // Plant Eng. 1997. 29, №7, P. 9-12.

37 Уменьшение уровня шума при помощи акустических экранов. Shallpegelminderung durch Schallshirme Bauphysik. 2003. 25, №4, P. 197 – 203.

38 Умирбаева Р.С., Ширтиев С.Ш., Сыдыгалиева Л.С. Шумобезопасность труда. //Труды пятой международной научно-технической конференции «Новое в охране труда, окружающей среды и защите человека в чрезвычайных ситуациях» Часть I.: Алматы: КазНТУ, 2002, С. 228-229 с.

39 Электродуговой испаритель с магнитным ограничением катодного пятна //Л.П.Саблев, Ю.И.Долотов, Р.И.Ступак и др.// Приборы и техника экспериментов 4, 1976. С. 12- 16.

40 V. Mack, Oberflächentechnik, Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 1990.

41 B.F. Coll, P. Sathrum, L.C. Fontana, Surf. Coat. Technol. 52 (1992) 123.

42 Верещака А. С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями - М.: Машиностроение , 1993. 336 с.

43 Vetter J.,Burgmer W., Dederichs H., Perry A. The architecture and performance of compositionally gradientand multi-lauer PVD coating. Material Science Forum Vols. 163 - 165 (1994). P. 527 - 532. (In English).

44 Аксенов И.И., Белоус В.А., Падалка В.Г. Хороших В.М. Перемещение плазменных потоков в криволинейных плазмооптических системах. // Физика плазмы . 1978. No 4, с.425 - 428.

45 Додонов А.И., Слаев В.А. Эксплуатационные свойства ультра мелкозернистых покрытий. М.: ИТО, № 1, 2000. С.

46 Steffens, H.D. et al.: Reduction of Droplet Emission in Random Arc Technology.In: Paper presented at the 17th International Conference on Metallurgical Coatings ICMC-17, April 2-6, 1990, San Diego, California, USA.

47 Tai, C.N. et al.: Macroparticles on TiN Films Prepared by Arc Ion Platin Process. In: Surface and Coatings Technology 43/44, 1990, 324-335

48 Akari, K.; Tamagaki, H.; Kumakiri, T.; Tsuji, K.; Koh, E.S.; Tai, C.N.: Reduction in Macroparticles During the Deposition of Titanium Nitride Films Prepared by Arc Ion Plating. In: Surface and Coatings Technology 43/44, 1990, S. 312-323

49 Sarthrum, P.; Coll, B.F.: Plasma and Deposition Enhancement by Modified ArcEvaporation Source. In: Surface and Coatings Technology 50, 1992, 103-109

50 Boxman, R.L.; Zhitomirsky, V.; Alterkop, B.; Gidalevich, E.; Beilis, I.; Keidar, M.;Goldsmith, S.: Recent Progress in Filtered Vacuum-Arc Deposition. In: SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY 87-88, 1996, S. 243-253

51 Martin, P.J.; Bendavid, A.: Review of the filtered arc process and materialsdeposition. In: Thin Solid Film 394, 2001, S. 1-15

52 Lehner, F.: Neue Hartstoff- und Diffusionsschichten mittels Pulsplasma-CVD.In: Vortragsveranstaltung der Fördergemeinschaft Dünne Schichten e.V.: NeueAnwendungen für moderne Oberflächentechnologien, Nürnberg, 4./5.11.1996

53 Rauschenbach, B.: Einsatz der Plasma-Immersion-Implantation zurOberflächenmodifizierung. In: Vortragsveranstaltung der Fördergemeinschaft DünneSchichten e.V.: Neue Anwendungen für moderne Oberflächentechnologien, Nürnberg, 4./5.11.1996

54 Vacuum Coatings Obtained by Condensation of Plasma Flows in Vacuum : The Method of Condensation with Ionic Bombardement // Aksenov, I.I.; Andreev, A.A.; Bren, V.G. and others;. В: Украинский физический журнал № 24, 1979,

55 Kampschulte, G.; Olbrich, W.; Fessmann, J.: Verbundprojekt: PVD-Verfahren bei niedrigen Temperaturen und neue Schichtsysteme : Teilvorhaben: Carbid- und Nitridschichtsysteme zur Beschichtung von Zerspanungswerkzeugen bei niedrigen Temperaturen. In: Dünnschichttechnologien '92 / Fellenberg, R. (Hrsg.). Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992, S. 584-591

56 Olbrich, W.; Kampschulte, G.: Superimposed pulse bias voltage used in arcand sputter technology. In: Surface and Coatings Technology 59, 1993, S. 274-280.

57 Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка научных основ и технологии конструирования и синтеза наноструктурных демпфирующих материалов» (промежуточный). № гос.рег. 0107РК00414 – Алматы: КазНТУ, 2007г.

Применение демпфирующих наноструктурных материалов в технике борьбы с шумом и вибрацией

Сулеев Досым Касымович
Утепов Тимур Еркасынович
Урикбаева Гульшат Альнуровна
Утепова Галия Еркасыновна

Под общей редакцией академика НАН РК, доктора технических наук,
профессора Сулеева Д.К.

Редактор Утепов Е. Б.
Технический редактор Утепов Т.Е.
Корректор Курманалиева А.Р.
Сдано в набор 21.01.2008 г. Подписано в печать 14.01.2008 г.
Отпечатано КазНТУ имени К.И. Стпаева