
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.74.042

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО НАНОМЕДНОГО ПОКРЫТИЯ, СОЗДАННОГО НА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА, НА УРОВЕНЬ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2024 г. А. А. Гулиев¹, А. С. Ахмедов¹, А. В. Шарифова^{1, *}, Р. С. Шахмарова¹

¹Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,

Баку, Азербайджан

*e-mail: aynur.sh84@mail.ru

Поступила в редакцию 16.01.2024 г.

После доработки 12.06.2024 г.

Принята к публикации 15.06.2024 г.

В настоящей статье изучается влияние однослойных электролитических покрытий из наноразмерных медных порошков, полученных методом химического осаждения на уровень звука, т.е. на уровень звукового давления высокопрочных чугунов. Однако демпфирующая способность высокопрочного чугуна ниже, а прочность его высокая. Это позволяет создавать новые материалы покрытий с использованием новых технологий и новых методов улучшения свойств высокопрочного чугуна. С целью улучшения демпфирующей способности путем нанесения гальванического покрытия на поверхность высокопрочного чугуна удалось несколько приблизить его демпфирующие способности к способностям серого чугуна.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, химическое редуцирование, реагент, электроосаждение, наномедный порошок, омедненный слой, эффект звуковое давление, демпфирование и др.

DOI: 10.31857/S0235711924050047, EDN: NUBDGI

Актуальность темы. В связи с широким развитием и применением нанотехнологий особое внимание уделяется получению наноразмерных металлических, в том числе медных порошков новым способом и изучению их свойств. При создании большой удельной поверхности высокодисперсных металлических порошков удастся снизить уровень звука и получить эксплуатационные характеристики. При этом расширяется спектр конструкционных материалов с демпфирующими свойствами, используемых в машиностроении. Разработка таких материалов позволяет уменьшить объем и массу деталей, разрушаемых вибрациями и звуками, а в некоторых случаях, позволяет полностью их устранить [1, 2].

Установлено, что чугун как конструкционный материал имеет широкую область применения и превосходит сталь по своим технологическим, звукопоглощающим и некоторым другим свойствам. Серые и ковкие чугуны обладают низкими механическими и другими свойствами, но высокими демпфирующими свойствами [3].

В настоящее время высокопрочный чугун не теряет своей актуальности применения в промышленности и является в этой области конструкционным материалом. Физико-механические и технологические свойства чугуна делают его незаменимым в промышленности. Одной из основных задач является сохранение наличие графита в составе и нанесения омедненного слоя на поверхность высокопрочного чугуна. Это позволяет развивать демпфирующие свойства чугуна. В отличие от других чугунов высокопрочный чугун обладает достаточно высокой прочностью после деформации, пластичностью, ударной вязкостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, высокой устойчивостью к циклическим нагрузкам [4, 5].

Правильный отбор конструкционных материалов, создание различных виброгающих и демпфирующих материалов на поверхности оборудования и вибрирующих деталей дает необходимые результаты по снижению шума.

В производстве широко используются электролитические покрытия из меди, цинка, никеля и хрома. Одним из основных вопросов, исследуемых в настоящей статье, является создание слоя с наноразмерными частицами меди на поверхности высокопрочного чугуна.

Цель исследования — создание звукопоглощающего наномедного покрытия на поверхности высокопрочных чугунных деталей, используемых в узлах трения, и сравнительный анализ влияния структуры и толщины покрытия на эффективность снижения уровня звукового давления.

В настоящей статье как объект и область применения указаны узлы торцевого уплотнения, разделяющего газовую и масляную полости в турбинах (рис. 1), которые применяются в областях гидравлических машин и гидравлических приводов [6]. Для реализации этой задачи были оптимизированы первичные реагенты, восстанавливающие элементы в электролите, осаждаемый оксид, измерение спектра образцов, работающих в частотной области, зависимости плотности слоя от пористости и т.д.

В реальных условиях может иметь место переход от одного режима работы в другой. Он сопровождается резкими изменением величины коэффициента трения и износа. Такие явления могут возникать в узлах трения в тех случаях, когда происходит повышение нагрузки или скорости, что вызывает повышение звукового давления на поверхности трения.

Материалы, методы исследования, результаты, обсуждения. Методика исследования проводилась на разнovidных образцах из высокопрочных чугунов. В качестве металлической основы для улучшения демпфирующих свойств был выбран высоко-

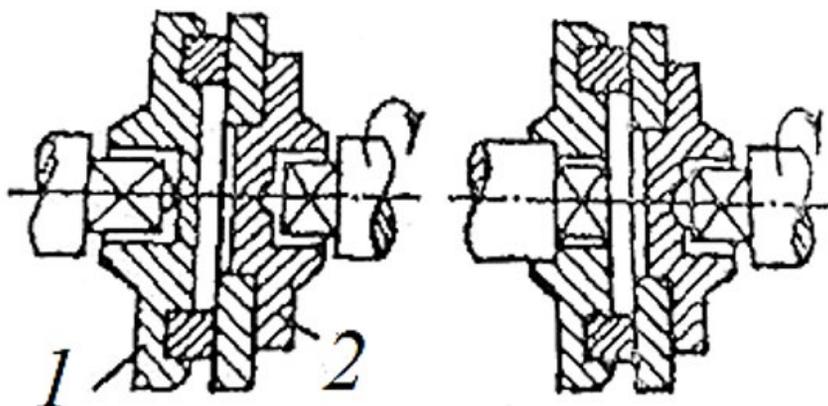


Рис. 1. Схема торцевого уплотнения, разделяющего газовую и масляную полости в турбинах: 1 — неподвижный; 2 — подвижный.

прочный чугун с феррито-перлитной, перлитной структурой [7]. Стандартный химический состав и твердость исследованных образцов высокопрочного чугуна, определенные на оптико-эмиссионном спектрометре марки ДВ-4, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав исследуемого чугуна

Название материала	Химический состав, % (масса)							
	C	Mn	Si	P	S	Mg	Ni	Fe
Высокопрочный чугун	3.2–3.6	0.5–0.7	1.7–2.1	<0.08	<0.01	0.04–0.06	0.4–0.6	ост.

Структуру первичного отливного чугуна определяют по ГОСТ 3443–87. Графитовое включение в структуре после деформации не может сохранять свою первоначальную шаровидную форму. Например, в высокопрочном чугуне шаровидный графит проявляется в различной степени волокнистости [8]. Микроструктурное исследование выполнено на металлографическом комплексе марки «ME520T». Для определения количества структурных составляющих использовали «Tescan vega3». Сканирующий электронный микроскоп может предоставить точную информацию о морфологии и кинетике эволюции электроосажденных металлов.

В нашей исследовательской работе было получено электронно-микроскопическое изображение микросталлов наноразмерных медных порошков, полученных методом химического редуцированного осаждения.

Для изучения микроструктуры и морфологию поверхности образцов с наноразмерным медным покрытием, а также определения зависимости пористости от толщины медного слоя, спектра звука и распределение звуковой энергии по частотному диапазону в результате удара шара были изготовлены образцы круглого, призматического и квадратного сечения из заготовок высокопрочного чугуна (рис. 2). В качестве материала сравнения использовали цементированную сталь марки 20ХН3А (ГОСТ 4543–2016.) Для определения уровня звукового давления заготовке или образцу придавали частоту вращения 625 мин^{-1} . Для измерения уровня звукового давления использовали измерительный прибор «Larson-Davis», звукомер — анализатор спектра, калибратор CAL200, микрофонный усилитель 25–41.

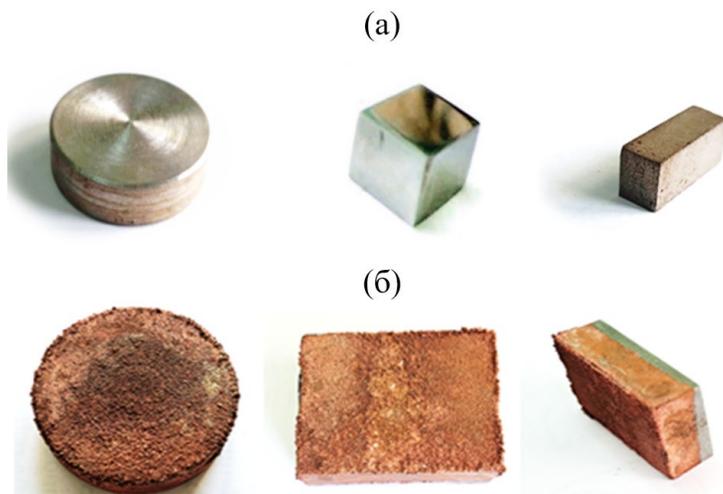


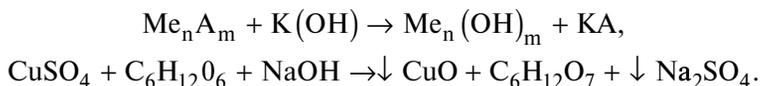
Рис. 2. Вид образцов из высокопрочного чугуна для изучения микроструктуры (а) и с осажденным на поверхности наноразмерным медным покрытием (б).

Измерение уровня шума проводили на приборе Flus типа «ET-965». С помощью прибора можно измерять звуки частотой 31.5–8000.0 Гц в диапазоне 30–140 дБ.

Обоснование технологии получения наноразмерных медных порошков различной дисперсности нанесения. Приведена методика получения покрытий из медных порошков способом электролитического и химического редуцирования для поверхности образцов. Частицы медных порошков получают отдельными фракциями. Получение медных порошков химическим редуцированием и осаждением на образец чугуна носит очень простой характер. Наличие наноразмерности частицы порошка оказывает большое влияние на пористость покрытия, плотность, а также на структуру поверхности. Толщину покрытий определяли по методике испытаний [9] в семи точках по диагонали образцов.

В связи с этим получение с помощью электролитического химического редуцирования наноразмерного порошка и регулирование потока и дисперсии порошка, а также нанесение в виде покрытия на чугун и улучшение его демпфирующих свойств рассматриваются как важнейшая исследовательская работа.

В статье в качестве первичных реагентов для получения наноразмерных медных порошков использовались CuSO_4 , $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, NaOH , и данная технология была оптимизирована.



После того как процесс пройдет, очень быстро наступает индукционный период. Именно здесь начинается взаимодействие с редуцирующим элементом раствора и осажденного оксида. Формируются сердцевинки из металлической меди, после чего ускоряется редукция и образуется порошок металлической меди.

Также важно спроектировать и подготовить устройство (рис. 3) для осаждения медного нанопорошка, полученного химическим редуцированием, на поверхность чугуна, а также разработать технологические схемы. По схеме, представленной на рис. 3, в первую очередь образец или заготовку помещают на дно устройства с целью создания слоя на поверхности образца и заготовки химическим способом. После этой операции сульфат меди растворяют в 10–40% глюкозе, затем нагревают до 60–70°C и добавляют необходимое количество (10 г) NaOH . При заданной концентрации реагентов реакция протекает в течение 40–80 минут при среде $pH = 6$ и температуре 80–90°C, при этом медь оседает на образце и заготовке, после чего образец и заготовка очищаются по заданной технологии, т.е. образцы, покрытые медным порошком, промывают и сушат. Изучается влияние медного слоя на звукопоглощения полученных образцов из высокопрочных чугунов.

Определение влияние концентрации реагентов на дисперсность, выход медного нанопорошка и зависимости пористости от толщины медного слоя. Одним из самых современных методов создания наноразмерного медного порошка $(35\text{--}40) \pm 0.5$ нм является метод химического редуцирования. Осаждение такого порошка на чугун — это одна из новых технологий. Одной из основных задач является измерение толщины осажденного медного слоя, изучение плотности и пористости слоя покрытия (рис. 4).

Образец, изготовленный из высокопрочного чугуна марки ВЧ40 (наименшее звуковое давление имеет феррит-перлитная структура), полируется и шлифуется, а также созданные на его поверхности наноразмерные медные покрытия предназначены для использования в качестве звукопоглотителей в диапазоне температур до 400 °С.

Полученные результаты влияния концентрации исходных и реагентных веществ на дисперсность и практический выход осаждающей на поверхности медного порошка, вес и весовое соотношение $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (17.0–28.3) и $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (1.5–2.5) влияют на различный выход (73–92%) и дисперсию меди $(35\text{--}45) \pm 0.5$.

На исследовательских образцах отработана технология создания омедненных однослойных образцов. Стало ясно, что медное покрытие толщиной 1–3 мкм оказывает влияние на характеристики, которые мы исследуем. С этой точки зрения было обнаружено, что пористость уменьшается с увеличением толщины. Увеличение толщины CuSO_4 , $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, NaOH регулировалось временем осаждения порошка.

Изучение спектра звука на образце из высокопрочного чугуна с медным покрытием, работающим в частотной области. На рис. 5 звуковые спектры образцов из материала, работающего в условиях большой нагрузки, были показаны при частоте 0–5000 Гц. В табл. 2 показано среднее значение уровня звукового давления (УЗД) в 3-х точках с помощью микрофонного устройства.

Анализ данных в табл. 2 и рис. 5 показывает, что звуковые характеристики образца из высокопрочного чугуна напрямую связаны с материалом образца и технологией изготовления. В результате исследований установлено, что уровень звукового давления в образцах из высокопрочного чугуна более нестабилен, чем в стали, обработанной в том же режиме. Иной скачок показателя УЗД в чугуне находится при частоте 1400 Гц. С другой стороны, видно, что уровень звукового давления на заданной частоте 1800 Гц у чугуна выше, чем у стали.

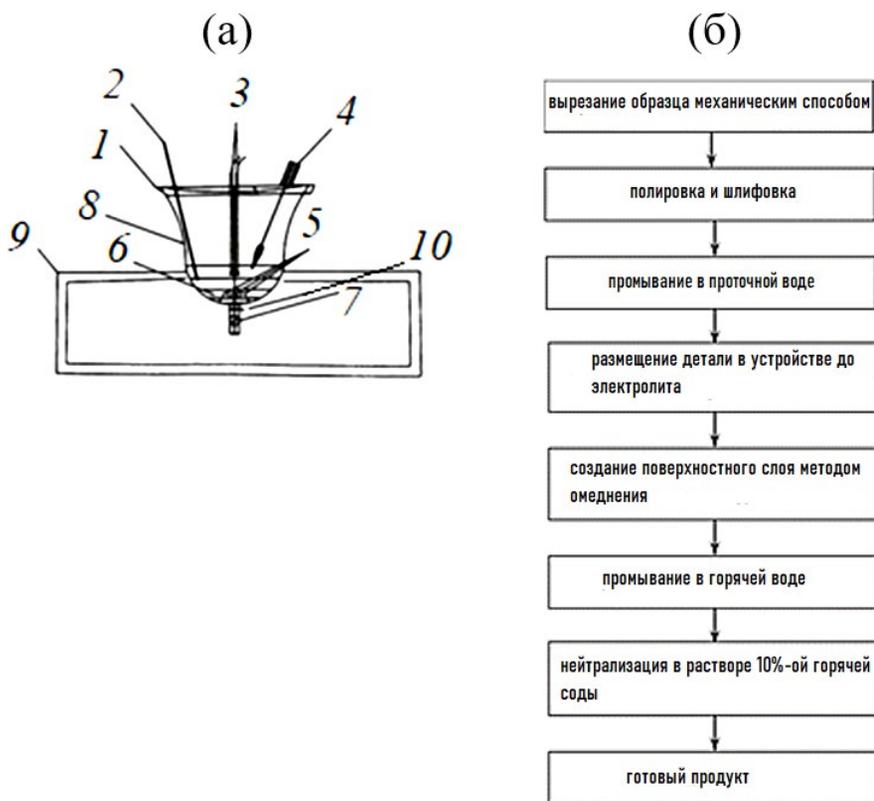


Рис. 3. Схема устройства для создания наноразмерного покрытия (а) и технологическая схема создания омедненного слоя на поверхности образцов (б): 1 — внутреннее окно раствора; 2 — термометр; 3 — нагреватель; 4 — рН-метр; 5 — образец; 6 — раствор сульфат меди; 7 — фильтрация; 8 — электролизер; 9 — опора; 10 — дренажная труба.

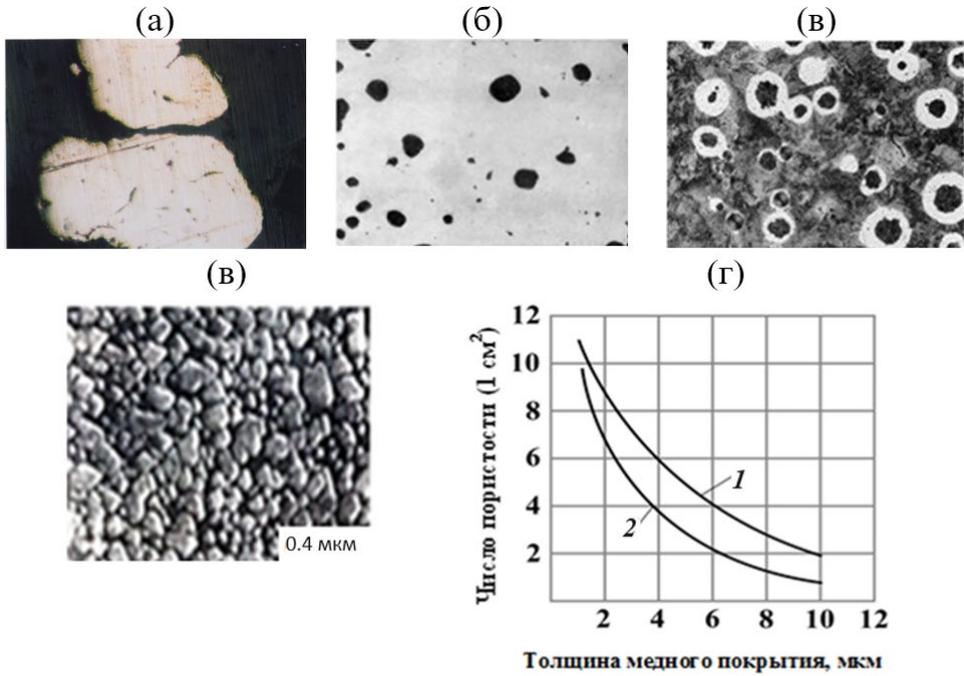


Рис. 4. Форма частиц наноразмерного медного порошка (а), высокопрочный чугун ВЧ40 с шаровидным графитом (б) и перлитно-ферритной структурой (П85+Ф15) (в), морфология поверхности образцов высокопрочного чугуна с наноразмерным медным покрытием (г) и зависимость пористости от толщины медного слоя (д): (а) — нетравленный, $\times 14000$, СЭМ (сканирующий электронный микроскоп);

(б) — до травления, $\times 200$; (в) — после травления, $\times 400$;

1 — $C_6H_{12}O_6$; $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ — 2.50; 2 — $C_6H_{12}O_6$; $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ — 1.75.

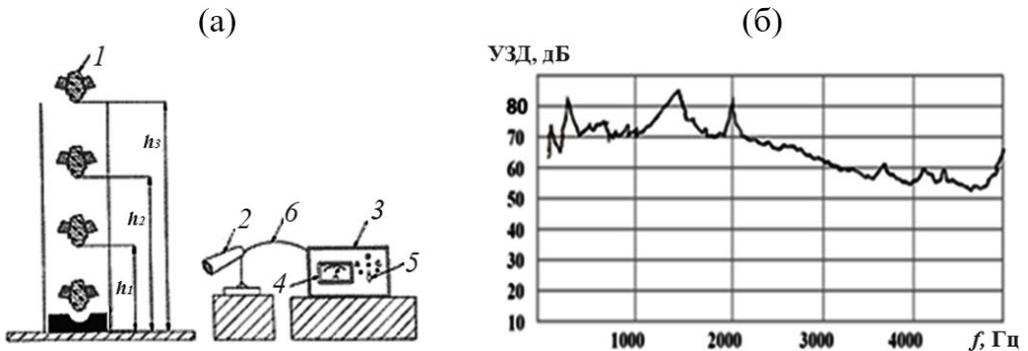


Рис. 5. Схема шумомера (а) и спектр звука, записанный микрофоном, на образце из высокопрочного чугуна с медным покрытием, работающим в частотной области (б): 1 — ударная нагрузка;

2 — микрофон; 3 — индикатор неоновой лампы, указывающей включено или нет питание;

4 — стрелочный индикатор; 5 — двухпозиционный тумблер; 6 — провода.

Таблица 2. Средний уровень звукового давления

Материал	Уровень звукового давления по трем точкам микрофона, дБ		
	1	2	3
Сталь 20ХНЗА	75.3	77.2	77.4
Высокопрочный чугун	74.5	76.4	76.3

Изучение распределения звуковой энергии образцов из высокопрочного чугуна по частотному диапазону в результате удара шара. В статье впервые изучается влияние на звукопоглощающие свойства высокопрочных чугунов омедненного слоя, созданного из наноразмерных медных частиц различной дисперсности, полученных химическим способом. С этой целью процесс получения осажденной меди из сульфата меди химическим редуцированием на образцах, изготовленных из высокопрочного чугуна, проводится в два основных этапа. Первый этап процесса проходит очень быстро, затем наступает индукционный период. Этот период имеет решающее значение для взаимодействия редуцирующего раствора с осадком твердого оксида, приводящего к образованию сердцевины металлической меди. После этого реакция ускоряется и образуется металлический медный порошок. Изготовленные образцы из высокопрочного чугуна полируются, а также на его поверхности формируется медное покрытие из наноразмерного порошка (рис. 2).

Морфологическое исследование медного покрытия, полученного методом химического редуцирующего осаждения, необходимо проводить в сканирующем электронном микроскопе в рабочей камере в условиях высокого вакуума. Каждое исследование заканчивают удалением загрязнения внутри колонки после извлечения образца (рис. 4).

Предварительные исследования распределения звуковой энергии удара по частотному диапазону образцов из феррито-перлитных, перлитных и ферритовых структурных высокопрочных чугунов показали, что основное влияние на звуковое давление оказывает высокочастотная составляющая спектра (рис. 6). Так как в низкочастотном и среднечастотном диапазонах суммарные уровни различаются по высокой частоте до 40–50 дБ.

Максимальное количество звуковой энергии в диапазоне высоких частот исследуется на частотах 8000 Гц и 16000 Гц. Поэтому шум, создаваемый в результате ударов твердых деталей друг о друга, изготовленных из чугуна с шаровидным графитом, в основном является высокочастотным шумом, что вызывает резкое ухудшение условий работы по сравнению с низкочастотным и среднечастотным шумом.

Определено что, однослойное покрытие снижает звуковую энергию до определенного значения, которое выше нижнего эффективного уровня звукового давления. Снижение звукового давления созданного покрытия более наглядно видно в феррито-перлитной структуре. С учетом всех трех структур можно предположить, что частота эффекта снижения звукового давления находится в области 63–4000 кГц. В настоящее время продолжают исследования по повышению твердости однослойных покрытий и снижению звукового давления за счет увеличения толщины покрытия до диапазона 8.9–13.0 мкм.

В результате теоретического анализа, проведенного в исследованиях, установлено, что при ударе шара на величину звукового импульса влияют упругие свойства металла, коэффициент Пуассона, масса и скорость шара при ударе, все эти величины надо учитывать [10]. В отличие от серого и ковкого чугуна в высокопрочном чугуне с шаровидным графитом на внутреннее поглощение энергии влияет металлическая основа, структура и химический состав металла.

Исследование эффективности снижения и сравнения уровня звукового давления чугунов и стали. Нестабильность УЗД в высокопрочном чугуне объясняется многими влияющими факторами. Такие факторы требуют учета влияния микрогеометрии образца на структуру материалов. Например, по структурной природе чугун нестабилен по сравнению со сталью. Кроме того, эффект модификации зависит от времени и количества заливаемого в форму металла. Здесь наблюдается количество включений графита в химическом составе и структуре чугуна (рис. 4).

Представляет интерес также сравнительное исследование уровня звука в чугуне и стали. Результаты измерения уровня звукового давления представлены в виде гистограммы на рис. 7.

Из гистограммы ясно видно (рис. 7в), что у чугунных образцов уровень звука ниже, чем у стальных образцов. Это различие заключается в следующем:

- в высокопрочном чугуне — <1.43 дБ;
- в ковком чугуне — <1.68 дБ.

Определено, что однослойные электролитические покрытия снижают излучение звуковой энергии до определенного предела, выше которого эффективность снижения уровня звуковой энергии невысока (рис. 7).

В однослойных, односторонних покрытиях толщиной более 12–15 мкм наблюдается начало эффекта, при этом снижается общий уровень звукового давления до 12–14 дБ. Более экономичны односторонние электролитические медные покрытия, снижающие уровень звукового давления до 24 дБ при толщине покрытия 11–13 мкм.

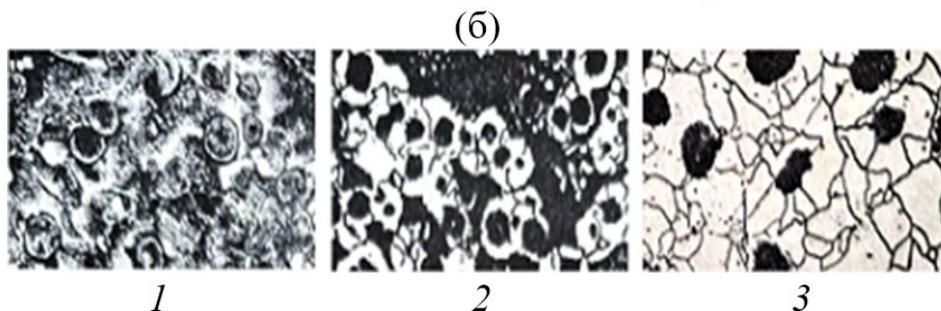
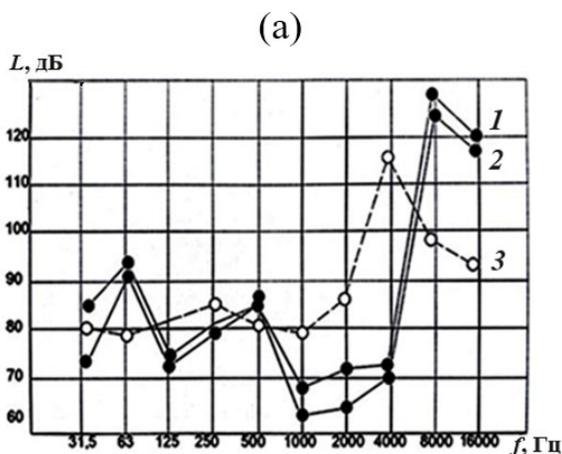


Рис. 6. Распределение звуковой энергии образцов из высокопрочного чугуна по частотному диапазону в результате удара шара (а) и соответственно микроструктуре (б): 1 — чугун с перлитной; 2 — чугун с ферритно-перлитной; 3 — чугун с ферритной структурой.

В однослойных, двусторонних покрытиях уровень звукового давления в диапазоне 44–52 мкм снижается до 30–32 дБ.

Наиболее эффективными из покрытий, сокращающих продолжительность звука, являются медные покрытия, сокращающие продолжительность затухания более чем в 4 раза при толщине 25 мкм.

Однослойные, двусторонние медные электролитические покрытия более эффективны чем однослойные односторонние покрытия. При общей толщине 22–26 мкм уровень звукового давления снижается до 30–32 дБ и составляет 74.4–75.1 дБ.

Отсюда следует, что использование наномедных порошков увеличивает эффект снижения звукового давления 2–3 раза и в то же время уменьшает толщину слоя. На рис. 7 показано снижение уровня звукового давления в зависимости от толщины и внешнего вида однослойного одностороннего и однослойного двухстороннего электролитического покрытия.

Заключение. 1. Разработана новая технологическая схема и устройство для получения наноразмерного медного порошка путем химического редуцирования и осаждения на образцы высокопрочного чугуна. **2.** Одним из положительных моментов исследования является то, что покрытия, полученные химическим редуцированием, создают возможность снижения звуковой энергии за счет поглощения дополнительных вибраций. **3.** Исследовано, что после деформации уровень звукового давления высокопрочного чугуна снижается на 1.43 дБ по сравнению стальным образцом. **4.** Исследуя микроструктуры высокопрочного чугуна до и после нанесения покрытия, можно сделать вывод, что металлическая матрица из ВЧ40 играет определенную

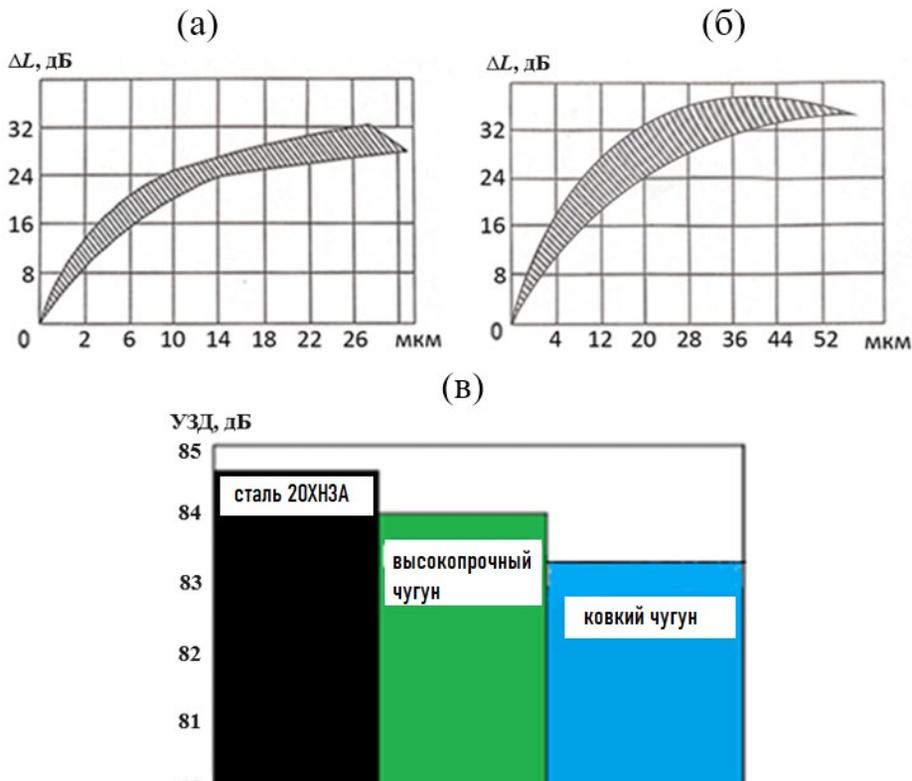


Рис. 7. Эффективность снижения звука (ΔL) однослойного одностороннего (а) и однослойного двухстороннего (б) электролитического покрытия и сравнительная гистограмма уровня звукового давления высокопрочного, ковкого чугуна и стали (в).

роль в снижении шума в кольцах узлов трения торцевого уплотнения. 5. Выяснилось, что нанесение защитного однослойного, двустороннего электролитического медного покрытия из наномедных частиц приводит к дополнительному затуханию колебаний в колебательной системе и уменьшению звуковой энергии.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Korobochkin V.V., Potgieter J. H., Usovseva N. V., Dolinina A. S.* Thermal preparation and characterization of nanodispersed copper-containing powders produced by non-equilibrium electrochemical oxidation of metals // *Solid State Sciences*. 2020. V. 108. P. 106.
2. *Ерконояр А.К., Ахметбекова А. М., Естаева Д. К., Кабасова Ж. К., Оразбаев К. Н., Абенова Д. К.* Исследование акустических и вибрационных характеристик чугунов // *Вестник науки и образования*. 2019. № 23 (77). Часть 3. P. 9.
3. *Fortini A., Soffritti Ch.* Recent Advances in Cast Irons // *Metals*. 2023. V. 13 (5). № 980. P. 13.
4. *Иванов С.Г., Гурьев А. М., Гурьев М. А., Мальков Н. В., Астахов Д. А., Романенко В. В., Черных Е. В.* Исследование влияния термической обработки на структуру и свойства высокопрочного чугуна марки ВЧ 35 // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2023. Т. 20. № 1. P. 123.
5. *Marwan F., Eman El-Sh., Mohamed A. T.* Effect of Deformation Parameters on Microstructural Evolution of GGG 40 Spheroidal Graphite Cast Iron Alloy // *Materials Sciences and Applications*. 2019. V. 10 (6). P. 433.
6. *Дроконов А.М., Дроконов А. Е.* Совершенствование средств снижения шума турбомашин // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2014. № 2 (42). С. 25.
7. *Анцев А.В., Амиров С. С., Вальтер А. И.* Обеспечение качества литейных высокопрочных чугунов // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2021. Вып. 12. С. 358.
8. *Vaer W.* Chunky graphite in ferritic spheroidal graphite cast iron: formation, prevention, characterization, impact on properties: an overview. *Inter. Metalcast // Int. J. of Metalcasting*. 2020. V. 14 (2). P. 454.
9. ГОСТ Р ИСО 3741–2013 Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению.
10. *Benov D., Benova D.* Noise measurement with smart device and external microphone — basics, Accuracy and applications // *Ecological Engineering and Environment Protection*. 2017. № 2. P. 46.