

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»  
(наименование кафедры)

22.03.01 Материаловедение и технологии материалов  
(код и наименование направления подготовки)

Материаловедение и технологии наноматериалов и наносистем  
(наименование профиля)

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: «Меднение стальных микросетчатых конструкций»

Студент	<u>А. В. Бондаренко</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Руководитель	<u>М. В. Дорогов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	<u>Л. Н. Горина</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
	<u>Н.В. Ященко</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
	<u>В. Г. Виткалов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

**Допустить к защите**

И. о. заведующего кафедрой к.т.н. А.С. Селиванов  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) \_\_\_\_\_  
(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Тольятти 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»  
Институт машиностроения  
(наименование института полностью)  
Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»  
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

И. о. завкафедрой «НМиМ»

\_\_\_\_\_ А.С. Селиванов  
(подпись) (И.О. Фамилия)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение бакалаврской работы**

Студент Бондаренко Алексей Валентинович

1. Тема Меднение стальных микросетчатых конструкций
2. Срок сдачи студентом законченной выпускной квалификационной работы 15.06.2017
3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе материалы по преддипломной практике, образцы для исследования, литература, потенциостат Elins
4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов, разделов):

*Аннотация*

*ABSTRACT*

*Введение*

1. Раздел «Аналитический обзор»
2. Раздел «Методы и оборудование для получения электролитических материалов»
3. Раздел «Меднение сетчатого носителя и исследование морфологии»
4. Раздел «Безопасность и экологичность технического объекта»

*Заключение*

*Список использованной литературы*

5. Ориентировочный перечень графического и иллюстративного материала презентация к бакалаврской работе

6. Консультанты по разделам:

«Безопасность и экологичность»	и	<u>Л. Н. Горина</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Аннотация	на	<u>Н.В. Яценко</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
английском языке				
Нормоконтроль		<u>В. Г. Виткалов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

7. Дата выдачи задания «1» марта 2017 г.

Руководитель \_\_\_\_\_  
выпускной квалификационной работы

(подпись)

М.В. Дорогов

(И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_

(подпись)

А.В Бондаренко

(И.О. Фамилия)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»  
Институт машиностроения  
(наименование института полностью)  
Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика»  
(наименование кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

И. о. завкафедрой «НМиМ»

\_\_\_\_\_ А.С. Селиванов  
(подпись) (И.О. Фамилия)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН**  
**выполнения бакалаврской работы**

Студента: Бондаренко Алексея Валентиновича  
по теме: Меднение стальных микросетчатых конструкций

Наименование раздела работы	Плановый срок выполнения раздела	Фактический срок выполнения раздела	Отметка о выполнении	Подпись руководителя
Аннотация	15.03.2017	06.06.2017	Выполнено	
Abstract	15.03.2017	06.06.2017	Выполнено	
Введение	15.03.2017	06.06.2017	Выполнено	
Аналитический обзор	15.04.2017	06.06.2017	Выполнено	
Методы и оборудование для получения электролитических материалов	15.04.2017	06.06.2017	Выполнено	
Меднение сетчатого носителя и исследование морфологии	15.05.2017	13.06.2017	Выполнено	
Безопасность и экологичность технического объекта	15.05.2017	13.06.2017	Выполнено	
Заключение	25.05.2017	14.06.2017	Выполнено	
Список использованных источников	25.05.2017	13.06.2017	Выполнено	

Руководитель выпускной  
квалификационной работы

\_\_\_\_\_ (подпись)

М.В Дорогов

\_\_\_\_\_ (И.О. Фамилия)

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_ (подпись)

А.В Бондаренко

\_\_\_\_\_ (И.О. Фамилия)

## АННОТАЦИЯ

Во введении представлены сведения по тематике исследования бакалаврской работы. Также указана актуальность и на её основе сформулирована цель: оптимизирование технологического процесса электроосаждения меди на сетчатый носитель. Для достижения поставленной цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ литературных данных
2. Отработка методики потенциостатического нанесения электролитического медного осадка.
3. Исследование морфологии полученных покрытий

Первая глава посвящена аналитическому обзору по теме работы. В частности, рассмотрены понятия гальванотехника, гальваностегия. Также приведено описание процесса меднения и его различные назначения. Рассмотрены потенциостатический и гальваностатический режимы электрохимического осаждения.

Во второй главе описано используемое для исследования оборудование и приборы. А также приведены технические характеристики используемого оборудования. Описана методика электрохимического осаждения меди, указан режим потенциостатического электрохимического осаждения.

Третья глава посвящена анализу полученных результатов. Описаны основываясь на полученных экспериментальных данных факторы, влияющие на морфологию покрытий. По результатам анализа указан оптимальный режим осаждения из исследованной работы.

В последней главе рассмотрены безопасность и экологичность технического объекта. Описана пожарная безопасность объекта и профессиональные риски.

В работе 49стр., 4 табл., 16 рис. и 30 источников.

## ABSTRACT

The aim of the graduation work is the optimization of the technological process of electrodeposition of copper on the mesh carrier. To achieve the stated goal of the work, it is necessary to solve the following tasks: to carry out analysis of research literature; to elaborate the method of potentiostatic deposition of electrolytic copper precipitate; to study the morphology of the coatings obtained.

The first chapter is devoted to an analytical review on the topic of the work. In particular, the concepts of electroplating are examined. The process of copper plating and its various purposes are described. Potentiostatic and galvanostatic regimes of electrochemical deposition are studied.

The second chapter describes the equipment and instruments used for research. It also presents the technical characteristics of the used equipment. In this work Carl Zeiss SIGMA microscope, P-30 potentiostat are used. A technique for the electrochemical deposition of copper is described, the regime of potentiostatic electrochemical deposition is indicated.

The third chapter is devoted to an analysis of the results obtained. Based on the experimental data obtained, the factors influencing the morphology of the coatings are described. Based on the results of the analysis, the optimum deposition regime from the study is specified.

The last chapter examines the safety and environmental friendliness of the technical facility. The fire safety of the facility and professional risks are described.

The graduation work consists of an explanatory note on 49 pages, introduction, including 16 figures, 4 tables, including 30 foreign sources.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР.....	10
1.1 Гальванотехника и гальванические материалы.....	10
1.2 Технология меднения и применение в промышленности.....	14
2 МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	16
2.1 Общие сведения об электрохимическом осаждении.....	16
2.2 Оборудование и приборы для исследования и получения покрытий.....	18
2.2.1 Потенциостат.....	18
2.2.2 Ультразвуковая ванна.....	20
2.2.3 Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ).....	22
2.3 Методика осаждения меди.....	26
3 МЕДНЕНИЕ СЕТЧАТОГО НОСИТЕЛЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ.....	29
4.1 Конструктивно-технологическая характеристика объекта.....	37
4.2 Идентификация производственно-технологических и эксплуатационных профессиональных рисков.....	38
4.3 Методы и технические средства снижения профессиональных рисков	39
4.4 Обеспечение пожарной и техногенной безопасности рассматриваемого технического объекта (производственно-технологических эксплуатационных и утилизационных процессов).....	40
4.5 Обеспечение экологической безопасности рассматриваемого технического объекта.....	43
4.6 Заключение по разделу.....	44

ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	45
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	46

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время методы электрохимического осаждения, в качестве нанесения покрытий имеет ряд преимуществ перед остальными методами нанесения покрытий, которые связаны с управлением процесса и его автоматизации. Меняя параметры процесса, можно изменить химические, а также физико-механические свойства получаемых пленок (покрытий). Так как полученные таким образом свойства будут отличаться от металлических изделий полученных металлургическим путем, то данный фактор позволяет расширить сферу применения покрытий металлами и сплавами.

Гальванические покрытия, которые базируются на эффекте электрокристаллизации открыл ещё в 1836 году российский физик в сфере электротехники Б. С. Якоби. Данный эффект заключается в электрохимическом осаждении положительно заряженных ионов металлов, при прохождении постоянного электрического тока, через водный раствор их солей. Под воздействием электричества происходит диссоциация солей металлов на положительные ионы направляющиеся к катоду, на который наносится гальваническое покрытие и отрицательные ионы направляющиеся к аноду. Одна из ролей выполняемых анодом это восполнение разряжающихся ионов на катоде. Поэтому металл, который является анодом, должен быть максимально чистым, без посторонних включений [1].

Покрытия из меди довольно часто применяются в качестве украшения изделия. Из-за того что медь теряет свой блеск под атмосферным давлением, покрываясь тёмным налётом, иногда используют ванны с блескообразователями. Также медные покрытия хорошо защищают сталь если при образовании получились беспористыми. Если во время меднения образовались поры, то они в конечном результате могут привести к отслоению покрытия, в результате чего его нужно будет наносить заново. Покрытия из меди применяются, например, в качестве подслоя перед никелированием для многослойных покрытий. Окрашивание меди в



различные цвета химическим или электрохимическим путём используется в ювелирных изделиях [2].

Сам процесс меднения заключается в нанесении на подложку слоя меди толщиной более 1 микрометра. Применение медных покрытий заключается в том как в последствии оно будет использоваться как функциональное покрытие, благодаря своим адгезионным свойствам, пластичностью и электропроводностью. Или как подслоя для нанесения других слоёв металла.

Один из методов применения меднения заключается в защите стали от цементации. Также хорошая проводимость данного металла широко используется в электрической технике, например в печатных платах. Изготовление медных форм электролитическим методом для производства пластмасс является также крайне интересной областью применения меди. Однако в атмосферных условиях покрытия из меди быстро окисляются и из-за этого появляются пятна различных оттенков [3].

Актуальность моего небольшого научного исследования заключается в рассмотрении применения медных покрытий для практических реализаций в промышленности и других отраслях человеческой деятельности. В связи с этим была поставлена цель: оптимизирование технологического процесса электроосаждения меди на сетчатый носитель.

Для достижения поставленной цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ литературных данных
2. Отработка методики потенциостатического нанесения электролитического медного осадка.
3. Исследование морфологии полученных покрытий

# 1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

## 1.1 Гальванотехника и гальванические материалы

Гальванотехника — раздел электрохимии, который описывает электрохимические процессы и физические явления, протекающие во время осаждения катионов металла на какой-либо катод. Иногда под гальванотехникой подразумевают набор технологических приёмов, оборудование и режимные параметры, используемые электрохимическим осаждением металлов на заданной подложке [4].

Подразделяется на:

- Гальванопластика;
- Гальваностегия.

Суть гальванопластики состоит в воспроизведении оригинала методом электрохимического осаждения, позволив воссоздать копию исходного объекта. С помощью данного метода можно добиться большей точности, чем любым другим методом, воспроизведения предметов до мельчайших деталей. Также благодаря гальванопластики можно изготовить предметы сложных форм, что в многих других случаях может быть крайне дорого, либо вообще не возможно [5].

Изготовление дубликатов с помощью гальванопластики имеет ряд преимуществ:

- Точное воспроизведение рельефа и фактуры оригинала;
- Высокое качество воссоздание объектов;
- Толщина металла у скопированного объекта от 1 до 3 мм;
- Низкая стоимость по сравнению с другими методами воспроизведения, например литьём или чеканкой;
- Возможность окончательной отделки изделия из гальванопластики, например покрытие защитным материалом или придание нужного цвета;

- Изготовление единичных экземпляров или крупных партий;
- Быстрое начало производства и высокая скорость изготовления;
- Производство изделий при отсутствии сборки, то есть менее трудоёмкий процесс, чем например литьё по выплавляемой модели;
- Меньше масса полученных изделий, например в сравнении с изделиями отливки.

Репродукция медных изделий, сделанных с помощью гальванопластики отлично совпадает с подлинником, вплоть до самых мельчайших деталей. В связи с этим представляется возможность сделать декоративные и другие изделия из меди. Которые ничуть не отличны от оригинала. На данный момент не известно более точного метода репродукции изделий, чем гальванопластика.

В случае с изделиями из бронзы, медная гальванопластика имеет некоторые преимущества, так как бронза может иметь продольную деформацию, усадку или непролив, то есть не равномерность поверхности литого изделия.

Гальваностегия заключается в покрытии одного металла другим тонким слоем с помощью электрохимического осаждения. Например, меднение, нанесение слоя меди на различные металлические, в частности стальные детали и изделия, улучшает проводимость, защитную способность различных покрытий, которые наносятся на металлические изделия. Медные покрытия обеспечивают не только хорошую проводимость материала, но также весьма украшают изделия [6].

В медных покрытиях, в которых присутствуют поры, достающие до подложки, при доступе небольшого количества влаги, образуют коррозионную пару, в которой растворимым электродом оказывается стальная подложка и в результате этого начинают появляться небольшие язвы под осажденным покрытием, которые в свою очередь приводят к отслоению образовавшегося электролитического осадка [7, 8].

Покрyтия, сделанные при помощи гальваностегии подразделяются, в зависимости от эксплуатации, на:

- 1) Защитные;
- 2) Декоративные;
- 3) Защитно-декоративные;
- 4) Специального назначения;

Некоторые покpытия также могут быть использованы как в защитных, так и в защитно-декоративных целях, в зависимости от области их применения. Чтобы получить нужное покpытие, необходимо подобрать нужные параметры эксперимента: состав электролита, плотность тока и температурный режим.

Безусловно, гальванические (а равно и другие химические и электрохимические) методы обработки поверхностей с целью придания им коррозионностойких или износостойких свойств имеют свою нишу в технологии машиностроения. Однако и они имеют ряд особенностей и ограничений, например:

- 1) Ограничение размера обрабатываемых деталей размерами ванны с раствором или расплавом;
- 2) В большинстве своем слоистая или пористая структура нанесенного покpытия;
- 3) Низкая адгезия покpытия к поверхности детали;
- 4) Проблемы с утилизацией отработанных химических растворов;
- 5) Низкая экономическая эффективность при обработки мелкосерийных и единичных деталей;
- 6) Наводораживание поверхности металлического изделия;
- 7) Негативное экологическое влияние.

Цель гальваностегии придать уже готовым металлическим изделиям ряд определенных свойств, например коррозионная стойкость, за счёт

цинкования или износостойкость трущихся поверхностей хромированием [9].

По сравнению с нанесением покрытия методом погружения в расплавленный металл, гальваностегический метод лучше, так как позволяет ограничиваться толщиной наносимого покрытия. Прочность сцепления получаемых покрытий и покрываемой поверхности зависит от степени очистки, то есть удалению жировых загрязнений и удалению образовавшихся окислов [10].

В промышленности гальваностегия применяется в автомобилестроении, авиации, радиотехнике и электронная промышленность и в некоторых других.

## 1.2 Технология меднения и применение в промышленности

Меднением называют процесс нанесения меди на металлический или пластмассовый материал или изделие. Медно покрытие, которое было только что нанесено выглядит ярко розоватого цвета. И в зависимости от технологии нанесения может быть матовым или блестящим [11].

На данный момент использование медных покрытий имеет большой спектр применения, причем как самостоятельное покрытие, так и в сочетании с другими металлами:

- В декоративных целях. В наше время довольно популярны старинные изделия из меди. С помощью электрохимического осаждения получают медное покрытие, которое после обработки «состариваются» и получается старое по внешним признакам изделие;
- В гальванопластике используется при создании копий различных металлических изделий, разной формы и размеров. Для начала создаётся пластмассовая либо восковая основа. Далее её покрывают токопроводящим лаком. После чего покрывают медным слоем. Данный метод используется при производстве волноводов, ювелирных изделий или сувениров;
- В электротехнической сфере покрытие медью крайне распространено из-за небольшой стоимости этого металла, в сравнении с серебром, которое в 100 раз дороже. Медные покрытия применяют для покрытия электротехнических шин, электродов и другие элементы, которые работают под напряжением. Также используется при пайке;
- Использование меднения в сочетании с другими гальваническими покрытиями, такими как хром или никель, используется для создания промежуточного слоя, который в последствии будет покрываться ещё одним слоем металла. Данный промежуточный слой меди выступает для повышения качества сцепления покрытия с основным металлом, в результате чего получается более прочный и блестящий внешний слой

[12, 13];

- Сталь применяют в различных областях обработке металлов (например, обработке резанием). А твёрдые науглероженные поверхности такой обработке не поддаются. Поэтому те участки стали, которые следует обработать резанием покрывают медью, для избежания диффундирования углерода в слой стали;
- Медные покрытия также используются при реставрации различных изделий, например хромированных деталей автомобиля. В данном случае наносится толстый слой меди до 250 микрон и более и благодаря хорошим адгезионным свойствам меди образуется прочное покрытие, которое после шлифуется и получается хорошая основа для покрытия другими металлами [14].

## 2 МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

### 2.1 Общие сведения об электрохимическом осаждении

Электролитическое осаждение представляет собой процесс электрохимического восстановления металлов, под воздействием электрического тока [15]. Благодаря распаду солей металлов в электролите, в нем появляются как положительно, так и отрицательно заряженные ионы, движущиеся хаотично. Ионы металлов, как правило, имеют положительный заряд, тогда как кислотный остаток отрицательный заряд. Катионы, положительные ионы металлов, перемещаются к катоду, отрицательному электроду, в то время как анионы, отрицательные ионы перемещаются к аноду, положительному электроду. При этом происходит катодный процесс. То есть на катоде будет осаждаться металл и сплавы. Осуществление перехода электронов, на аноде, от аниона к электроду называется анодным процессом [16, 17].

Электролитический осадок – покрытие либо частицы образованные в результате электролитического осаждения [18, 19].

Процессы, протекающие в электролите и на электродах, могут быть разделены на несколько стадий [20, 21]:

- Миграция ионов по направлению к электроду под действием электрического поля;
- Потеря сольватной оболочки из молекул воды, окружающих ион, что приводит к образованию адсорбированного иона;
- перенос электронов от электрода к ионам металла;
- Движение адсорбированного атома по поверхности электрода до энергетически наиболее выгодного положения;
- Рост металлической пленки на поверхности электрода.



На данный момент существуют различные режимы электрохимического осаждения, но в этой исследовательской работе был применен только потенциостатический режим осаждения. Суть данного режима заключается в том, что задается разность потенциалов (перенапряжение). В данном режиме разницы потенциалов стабилизирует прибор. Электрод сравнения (референсный электрод) в данном случае выступает в роли датчика контролирующего перенапряжение. Применяется электрод сравнения только в 3-х электродной схеме. Цепью для обратной связи усилителя, в данном случае служит электрохимическая ячейка [22-24].

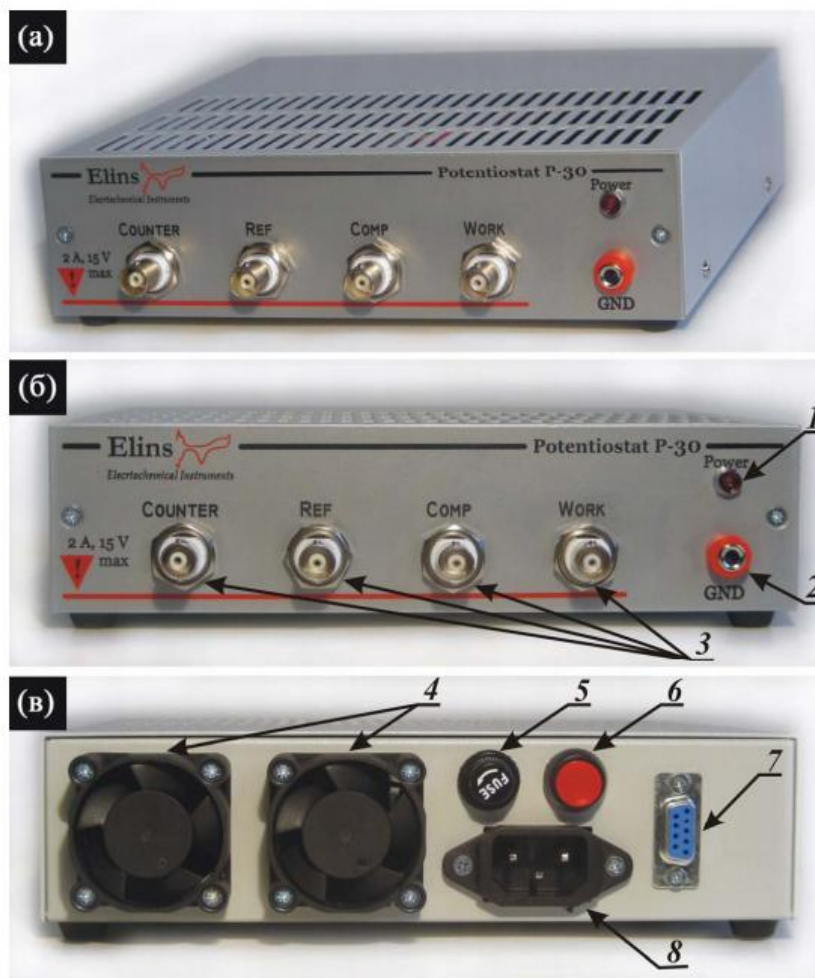
## 2.2 Оборудование и приборы для исследования и поучения покрытий

### 2.2.1 Потенциостат

Потенциостат «Р-30» («Р-30S») предназначен для проведения широкого спектра научных исследований в различных областях химии и физики; в частности, тестирования батарей топливных элементов и отдельных их компонентов, испытания литиевых аккумуляторов, кроме того, он может быть использован для изучения проводящих систем, коррозионных исследований материалов, а также контроля качества электрорадиоэлементов [25].

Таблица 2.1 – Возможности Потенциостата «Р-30»

Основные функции прибора	Основные режимы работы
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ измерение вольтамперных характеристик,</li><li>➤ электрохимические измерения (полярография, кулонометрия),</li><li>➤ рН-метр, иономер,</li><li>➤ прецизионный управляемый источник стабилизированного тока или напряжения,</li><li>➤ прецизионный источник тока или напряжения, изменяющегося по заданному программой закону,</li><li>➤ высокоомный вольтметр,</li><li>➤ диагностика источников питания,</li><li>➤ управление технологическими процессами.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ регистрация напряжения (потенциала),</li><li>➤ гальваностатический (стабилизация тока) стационарный режим,</li><li>➤ потенциостатический (стабилизация напряжения / потенциала) стационарный режим,</li><li>➤ потенциостатический режим с разверткой напряжения (потенциала),</li><li>➤ последовательное выполнение любых из указанных режимов в различной последовательности и комбинациях (необходимо дополнительное программное обеспечение).</li></ul>



(а) – внешний вид прибора, (б) – передняя панель, (в) – задняя панель. Обозначения: 1 – индикатор питания, 2 – разъем заземления и экранирования, 3 – разъемы подключения электродов, 4 – вентиляторы охлаждения, 5 – гнездо предохранителя, 6 – кнопка включения питания, 7 – COM-порт, 8 – разъем питания (220 В)

Рисунок 2.1 - Потенциостат «Р-30» («Р-30S»)

### 2.2.2 Ультразвуковая ванна

Ультразвук – механические колебания с частотой более 20000 Гц. На данный момент ультразвук применяется в различных физических, а также технологических методах. Например, для очистки поверхности.

Ультразвуковая очистка – метод очищения твёрдых тел, которые моются в жидкостях. При этом в жидкость различными методами вводят ультразвуковые колебания. Ультразвук не только ускоряет очистку, но и позволяет достичь лучших результатов без применения специальных моющих средств.

Сам процесс очистки происходит за счет совместного действия различных эффектов, таких как акустическое течение, звуковое давление, звукокапиллярный эффект и самый важный кавитация. Пузырьки, образованные в результате кавитации, пульсируют и схлопываются вблизи загрязнений и разрушают их. Также данный эффект называется кавитационная эрозия.

Ультразвуковая ванна «Сапфир - 0,5 ТЦ»



Рисунок 2.2 - Ультразвуковая ванна Сапфир

Описание: Применяется для очистки любых поверхностей (простой и сложной конфигурации) от различных видов загрязнений [26].

Таблица 2.2 - Технические характеристики

Напряжение питания	220 В/50-60 Гц
Рабочая частота генератора	35 кГц
Объем ванны	0,5 л
Таймер цифровой	от 1 до 25 мин
Потребляемая мощность	50 Вт
Мощность генератора	50 Вт
Термостат	—
Нагрев	—
Габаритные размеры (ДхШхВ)	175x110x200 мм
Габариты емкости - (ДхШхВ)	140x80x65 мм
Вес	3,0 кг

### 2.2.3 Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ)

Основой растрового электронного микроскопа служит электронная пушка и колонная. Функция этих устройств состоит в фокусировании электронного зонда на поверхность образца. Прибор обязательно оснащается вакуумной системой. В СЭМ есть предметный столик, с помощью которого можно перемещать образцы минимум в 3-х направлениях. Когда электроны взаимодействуют с объектами, возникают сигналы, которые затем улавливаются специальными детекторами. Изображения, которые продуцируются микроскопом, могут быть построены с помощью различных сигналов, которые иногда подаются параллельно. Например, изображения в отраженных или вторичных электронах [27, 28].

Детекторы, которыми оснащаются СЭМ, позволяют отобразить и проанализировать излучение, которое возникает в процессе взаимодействия и частицы, которые меняют энергию из-за взаимодействия зонда с образцом. Также разработанные методики дают возможность не только исследовать поверхность образца, а также визуализировать любую информацию о его поверхности.

Типы сигналов, генерирующиеся и детектируемые во время работы РЭМ:

- Отражённые электроны (ОЭ), режим контраста по среднему атомному номеру, а так же режим рельефа);
- Вторичные электроны (ВЭ), режим рельефа;
- Ток, прошедший через образец (детектор прошедших электронов);
- Потери тока на образце (детектор поглощенных электронов)
- Дифракции отражённых электронов (ДОЭ);
- Прошедшие через образец электроны, в случае установленной STEM-приставки (чаще используется для исследования органических объектов);
- Световой сигнал (КЛ или катодолюминесценция);

- Характеристическое рентгеновское излучение (Рентгеноспектральный анализ).

На одном приборе все выше перечисленные детекторы практически не встречаются. Самый часто устанавливаемый это детектор вторичных электронов. Разрешение данных детекторов достаточно велико для наблюдения за достаточно малыми объектами. На данный момент они позволяют увидеть субнанометровые объекты. СЭМ обладают большой глубиной резкости, примерно на 2 порядка больше, чем у оптических из-за узкого электронного луча, что позволяет получать микрофотографии с трёхмерным эффектом у объектов со сложным рельефом. Данное свойство РЭМ полезно в понимании поверхности структуры образца. В качестве детектора вторичных электронов используется детектор Эверхарта-Торнли, который позволяет собирать электроны с энергией 50 эВ.

Отраженные электроны (ОЭ) – электроны пучка, которые отразились от рассматриваемого образца с помощью упругого рассеивания. В зависимости от детектора они отображают состав образца, либо рельеф поверхности. В композиционном режиме ОЭ обычно используют в аналитическом СЭМ совместно с анализом характеристик спектра рентгеновского излучения. Интенсивность сигнала напрямую зависит от среднего атомного номера, облучаемого в данный момент поверхности образца. В СЭМ с переменным вакуумом используется топографический режим отраженных электронов, так как детектор вторичных электронов в данном случае не работает.

Рентгеновское излучение возникает при выбивании электроном пучка электрона с внутренней оболочки атома образца, тем самым заставляя перейти электрон высокого энергетического уровня на более низкий, одновременно испуская квант рентгеновского излучения. При детектировании спектра характеристического рентгеновского излучения даёт возможность идентифицировать количество элементов и состав исследуемого образца.

## Микроскоп Carl Zeiss SIGMA

Сканирующие электронные микроскопы серии SIGMA, выделяется использованием особой технологии GENIMI, которая обеспечивает высокое качество полученных изображений, а также точные аналитические результаты среди всех подобных микроскопов.

Технология GENIMI представляет собой электронно-оптическую колонну, непревзойденную по легкости управления конструкцией, которая способна обеспечить великолепное изображение при низком напряжении и стабильном токе пучка при аналитических исследованиях.

За счёт передовой геометрии колонны обеспечивается изображение высокого разрешения при анализе материалов, при использовании технологий энергодисперсионной (EDS) или волновой спектроскопии (WDS).

На новых микроскопах SIGMA есть возможность исследовать образцы до 250 мм в диаметре и 145 мм в длину. Также сопланарное размещение портов камеры микроскопа, позволят одновременно работать (EDS) и детектора обратно рассеянных электронов (EBSD) [29].

Таблица 2.3 – Основные технические характеристики Zeiss SIGMA

Пространственное разрешение	1.3 нм при 20 кВ 1.5 нм при 15 кВ 2,8 нм при 1 кВ
Источник электронов	Автоэмиссионный (термоэмиссионного типа)
Диапазон ускоряющих напряжений	От 100 В до 30 кВ
Диапазон рабочего тока	4 пА — 20 нА (40 нА — опционально)
Диапазон увеличений	12x — 1 000 000x
Аналитические приставки — опции	EDS (рабочее расстояние — 8,5 мм) EBSD (в одной плоскости с EDS) WDS (всех типов)



Продолжение таблицы 2.3

Встроенные детекторы	<u>Стандартно:</u> In-lens детектор ETSE детектор <u>Опционально:</u> BsE детектор AsB детектор STEM детектор; SCD детектор тока образца
Рабочая камера	Диаметр 365 мм, высота 270 мм; Находящиеся в одной плоскости порты для EBSD и EDS; Порт для WDS — стандартно
Моторизованный 5-осевой столик для образцов	X = 125 мм, Y = 125 мм, Z = 50 мм, наклон 0–90°, вращение 360°; Положение контролируется мышью или опционально джойстиком с панели микроскопа
Графика	Разрешение не хуже 3072 на 2304 пикселей; Сигнал получается суммарный и усредненный
Отображение	1 или 2 (опция) монитора обеспечивают достоверное двухканальное изображение
Управление	SmartSEM GUI под управлением Multilingual Windows® XP, управляемый мышью и клавиатурой
Необходимые требования	Напряжение 100 – 230 В, 50 – 60 Гц; Компрессор для воздуха; Водяное охлаждение



Рисунок 2.3 - Микроскоп Carl Zeiss SIGMA

### 2.3 Методика осаждения меди

1) Берется 1 сеточка, кладется в колбу и наливается спирт так, чтобы вся сеточка была залита. Это нужно для того чтобы очистилась от разных налетов на поверхности, например жировых следов пальцев, которые могли попасть на этапе подготовки сеточки. Поэтому далее сеточку берем только пинцетом. В данном случае в качестве подложки использовали сетку из нержавеющей стали 12Х18Н10 с размером ячейки 40 мкм (рис. 2.4).

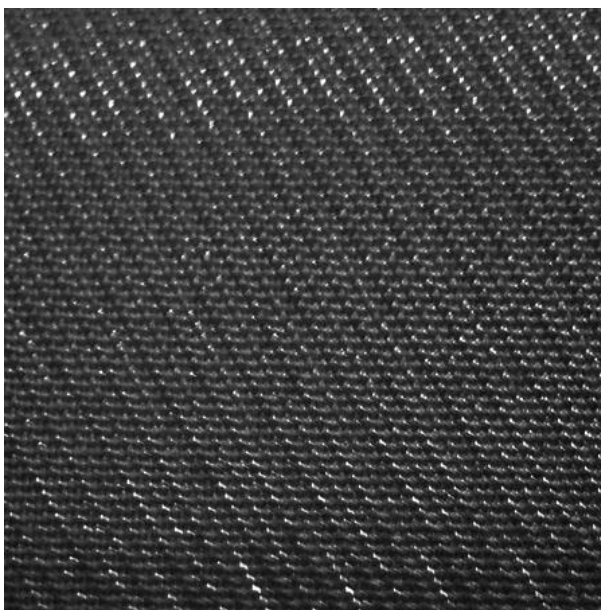


Рисунок 1.4 - Металлическая сеточка

2) Наливается в ультразвуковую ванну (рис. 2) дистиллированную воду такого же уровня, как и спирт в колбу. Далее сеточка ставится в установку очистки, ультразвуковую ванну.

3) Включается установка на 8-10 минут. Этого времени достаточно, чтобы хорошо очистить сеточку, удалив с неё не нужный налет и другие загрязняющие вещества.

4) Предварительно включается потенциостат, чтобы он прогрелся.

5) После чистки, достается сеточка и промывается от спирта в дистиллированной воде 2 раза. Сеточка фиксируется в держателе так, чтобы для осаждения осталась большая площадь. Оставляется как можно большая была площадь осаждаемой поверхности, желательно не менее  $1 \text{ см}^2$ .

б) Сушится сеточка от воды (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 - Фен для сушки образцов

7) Закрепляется держатель так, чтобы сетка должна быть параллельна медному электрод. Чтобы осаждение на сеточку было равномерным.

8) Опускается сеточка в электролит так, чтобы держатель не соприкасался с электролитом. В противном случае частицы будут осаждаться не на стальную сеточку, а на сам держатель, что в итоге испортит весь эксперимент.

9) Подключается всё к потенциостату, запускаем программу.

10) В программе окно «прибор → программа» устанавливаются необходимые параметры с режимом установки напряжения. Эксперимент проводился в потенциостатическом режиме осаждения.



Рисунок 2.6 - Ванна для электроосаждения

- 11) По окончании процесса осаждения достаётся сеточка, опускается в колбу с дистиллированной водой и промывается 2-3 раза по 5 минут. Промывка образца осуществляется для его очистки от электролита.
- 12) Далее сеточка сушится от воды.
- 13) Образец убирается в баночку и подписывается номер и режим осаждения

### 3 МЕДНЕНИЕ СЕТЧАТОГО НОСИТЕЛЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ

В результате электрохимического осаждения в различных потенциостатических режимах был получен различный электролитический осадок.

Таблица 3.1 – Примененные режимы осаждения

Номер образца	Перенапряжение, мВ	Время, мин
1	-75	18
2	-75	25
3	-80	15
4	-80	20
5	-90	10
6	-90	15
7	-100	10
8	-120	8
9	-160	15
10	-180	10

Осаждение проводилось на металлическую подложку – сталь 12Х18Н10

### Образец №1.

В результате следующего режима осаждение на стальную подложку не осадилось практически ничего. В результате низкого перенапряжения, частицам не удалось сформировать необходимое покрытие.

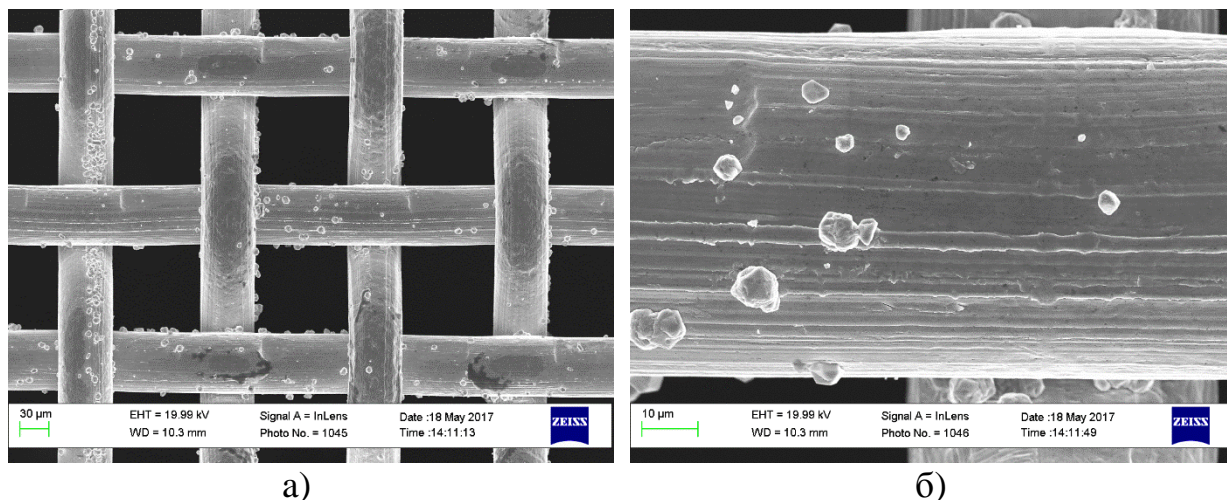


Рисунок 3.1 - Образец 1

### Образец №2.

В следующем режиме осаждения вопреки ожиданиям образованию пленок получились хаотично расположенные частицы различных размеров. Несмотря на длительное время осаждения, образование медного покрытия так и не было получено из-за низкого значения перенапряжения.

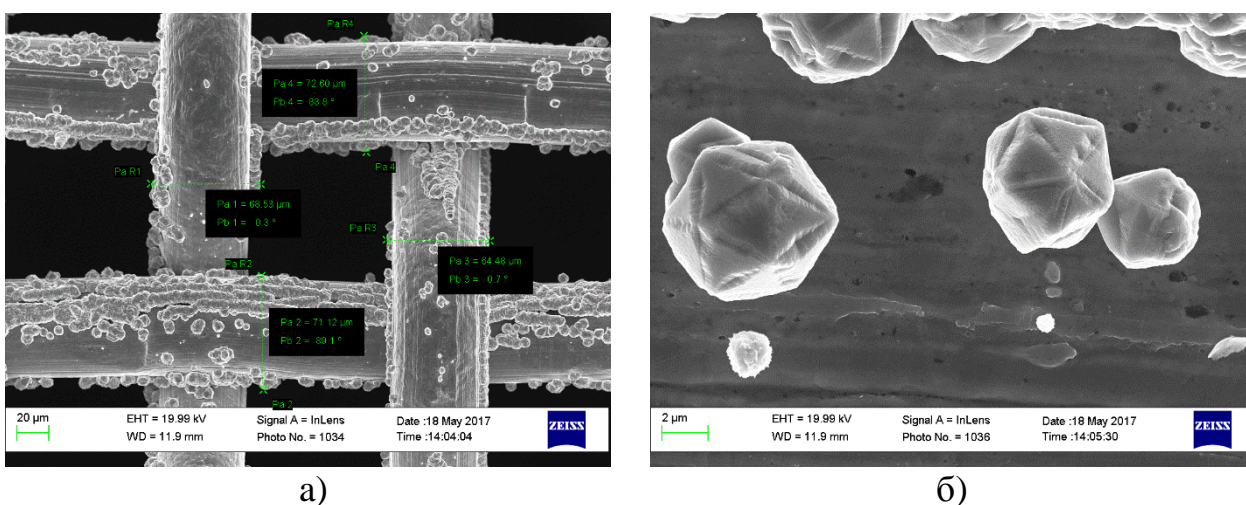


Рисунок 3.2 - Образец 3



Как видно из рисунка 3.2 получившиеся в результате данного режима осаждения частицы, похожи на икосаэдрические малые частицы меди, а некоторые, как показано на рисунке 3.2(б) и вовсе получились икосаэдрической формы.

Образец №3.

В третьем режиме осаждения получилось образование кластеров частиц, формирующих в ограниченных областях не большие поверхности. Однако достичь покрытия не удалось в результате низкого значения перенапряжения и времени.

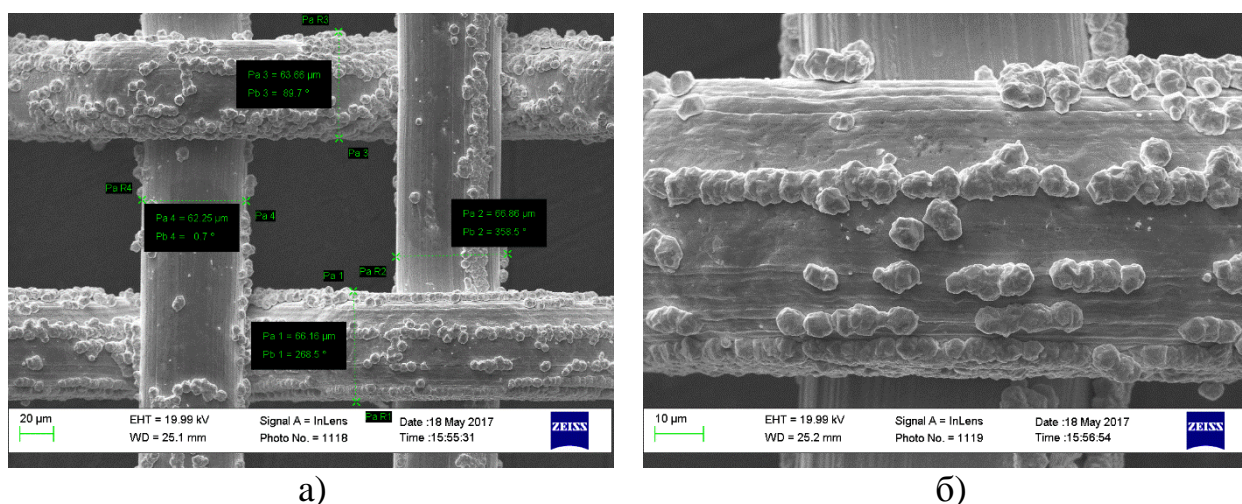
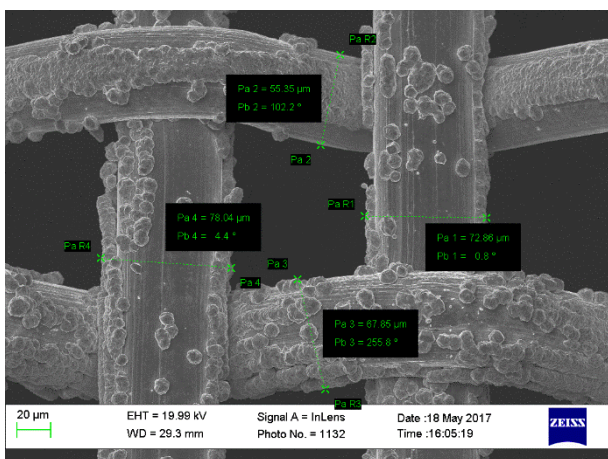


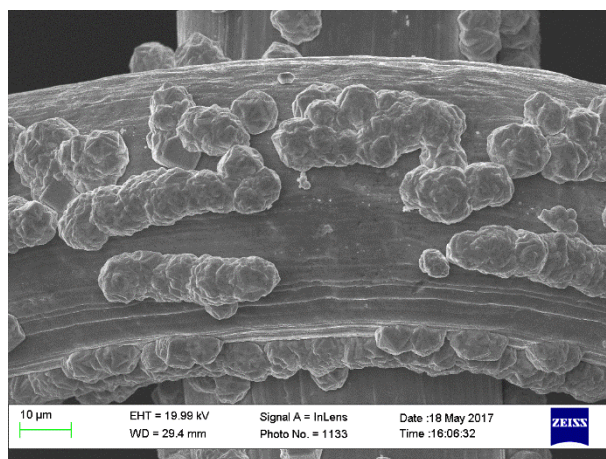
Рисунок 3.3 - Образец 3

Образец №4.

В следующем режиме, проводимом в рамках данной бакалаврской работы было выявлено аналогичное образование кластеров частиц. Не смотря на не большое увеличение времени, по сравнению с предыдущем образцом, морфология поверхности у них оказались похожими.



а)

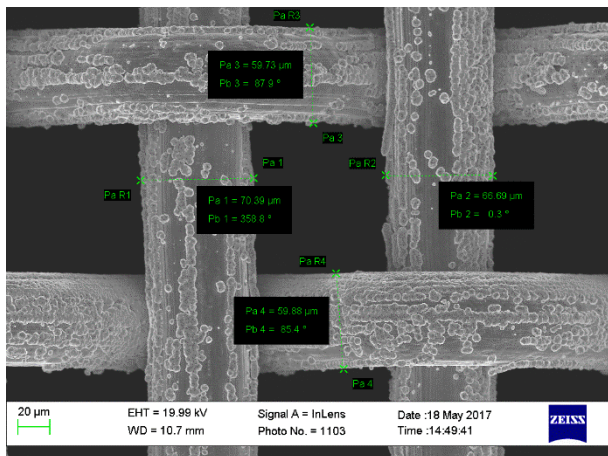


б)

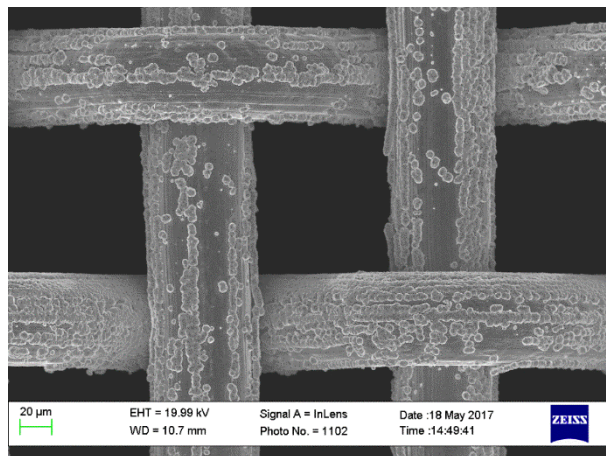
Рисунок 3.4 - Образец 4

Образец №5.

В этом режиме осаждения ожидаемых пленок получено не было. Однако результатом увеличения перенапряжения послужило покрытие большей поверхности осаждаемой подложки. Хотя полноценного покрытия в данном случае не было получено.



а)



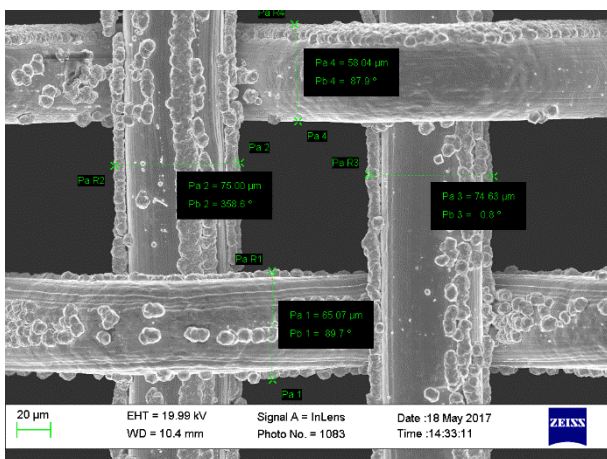
б)

Рисунок 3.5 - Образец 5

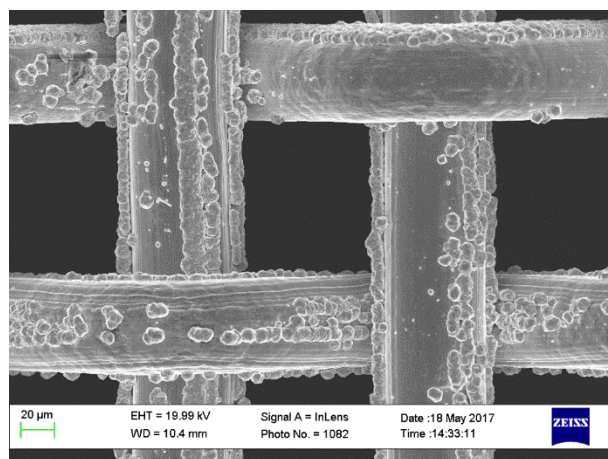
Образец №6.

В следующем режиме осаждения вместо ожидаемого медного покрытия было получено огромное количество различных частиц разных форм и размеров. В сравнении с рисунком 3.6 концентрация осажденных частиц получилась меньше. Это может свидетельствовать о влиянии времени





а)

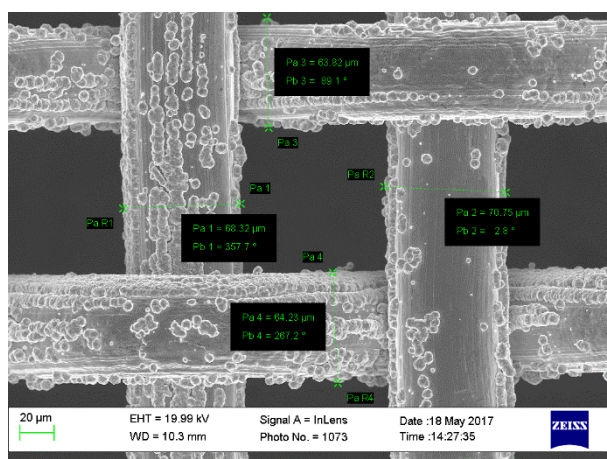


б)

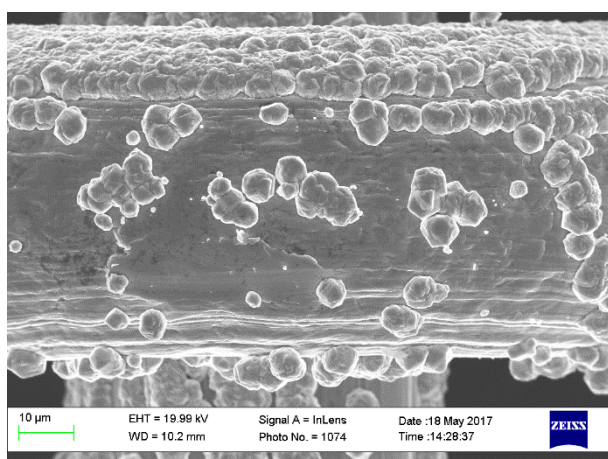
Рисунок 3.6 - Образец 6

Образец №7.

В данном режиме осаждения получилось, некоторое промежуточное состояние между покрытием и простыми частицами. Частицы в результате осаждения начали образовывать кластеры.



а)



б)

Рисунок 3.7 - Образец 7

Как показано на рисунке 3.6 образовавшиеся частицы имеют размер около 5-6 мкм.

Образец №8.

В результате данного режима осаждения было получено медное покрытие, с некоторыми не ровностями. Однако в результате малого времени

эксперимента пленка получилась не совсем гладкой, а с некоторыми пустотами, на которые частицы меди не успели осесть.

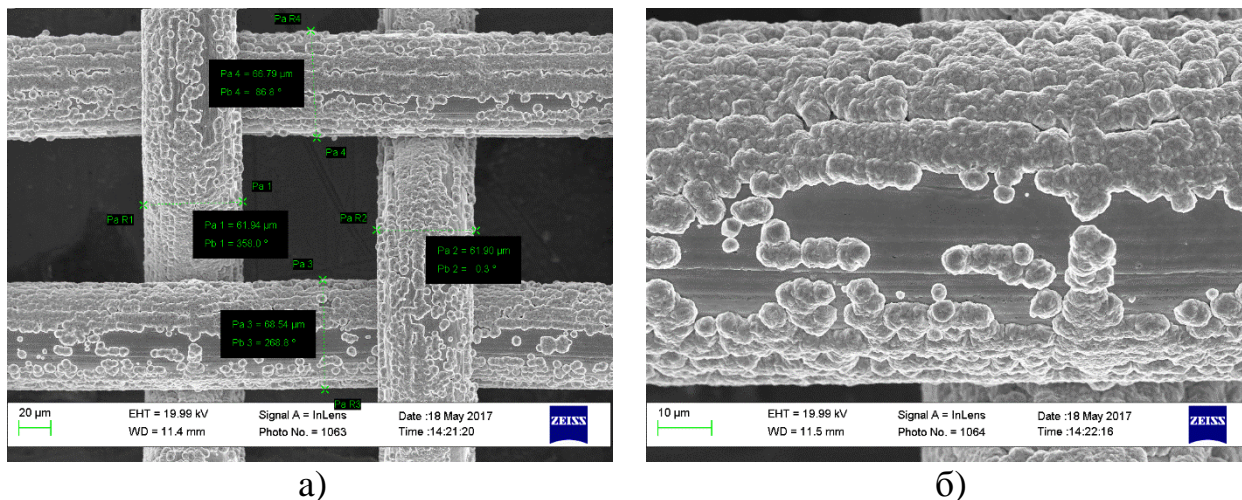


Рисунок 3.8 - Образец 8

Как видно из рисунка 3.5 в данном случае медная пленка имеет толщину менее 5 мкм.

Образец №9.

В данном режиме осаждения образование пленки было ожидаемым результатом. Как видно на рисунке 3.1 образовалась довольно плотная пленка меди, в результате высокого перенапряжения. Данный режим был выбран для наиболее четкого образования электролитического осадка.

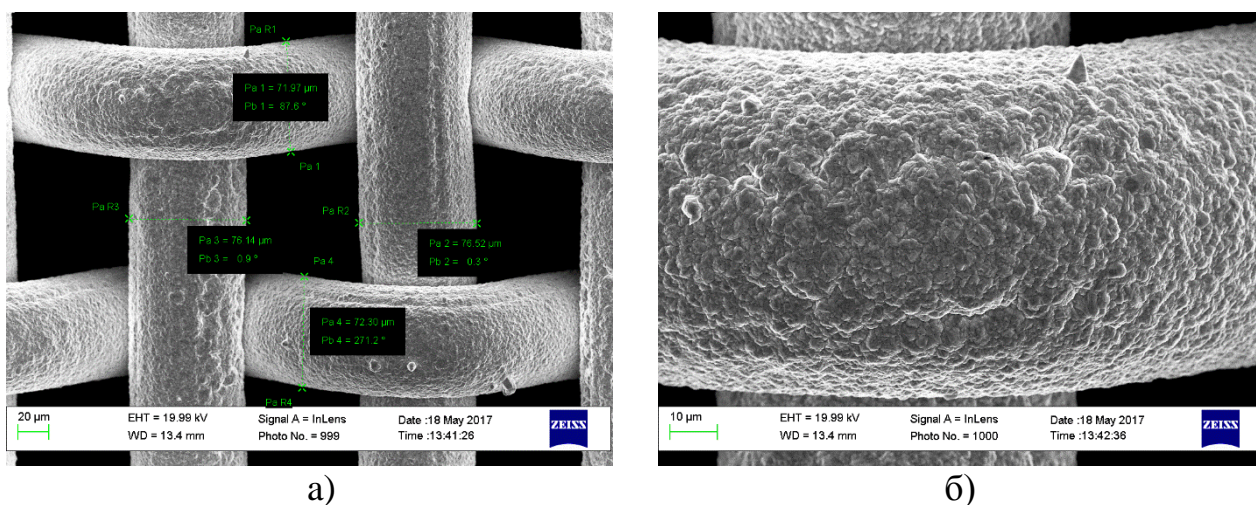


Рисунок 3.9 - Образец 9



Как видно из рисунка 3.1 образовавшаяся пленка имеет толщину не менее 5 мкм и внешне гладкую поверхность без явных неровностей.

Образец №10.

В этом режиме осаждения, так же как и в предыдущем было выявлено образование медной пленки. Как видно на рисунке 3.2, образовавшаяся пленка получилась с виду такой же гладкой, как и в предыдущем режиме осаждения.

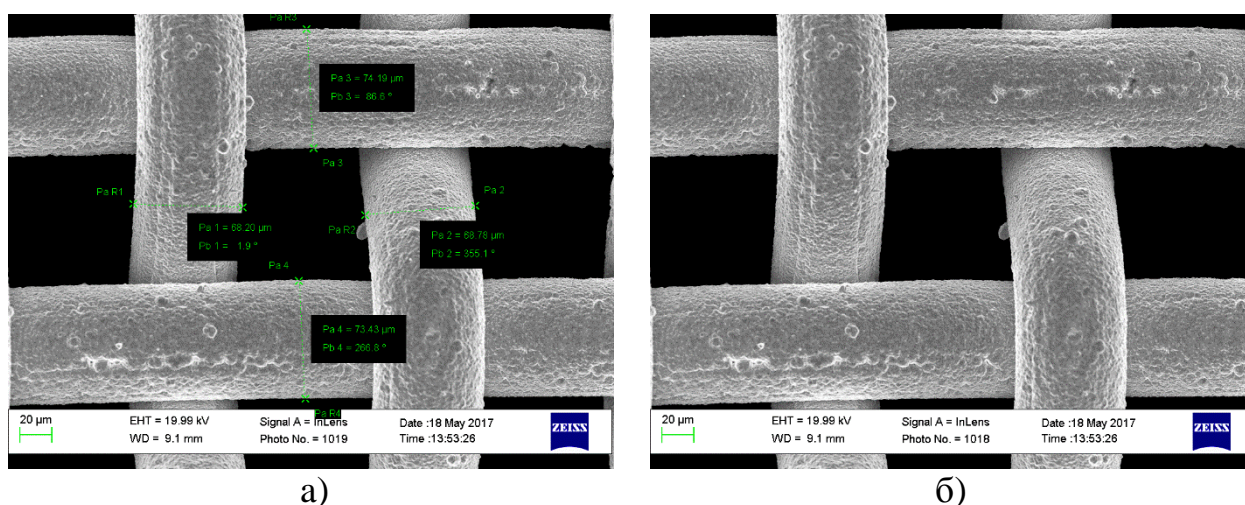


Рисунок 3.10 - образец 10

Образовавшаяся в данном случае пленка, также имеет толщину более 10 мкм.

Проанализировав все режимы осаждения и сравнив полученные результаты, можно сделать вывод, что на образование медных пленок в потенциостатическом режиме осаждения больше влияет значение перенапряжения, заданное в начале эксперимента, и малое влияние оказывает время проведения эксперимента. Также было установлено, что медные пленки лучше получаются при значении перенапряжения выше 120 мВ. Хотя стоит отметить, что в режиме 180 мВ началось образование 2-го покрытия.

Однако стоит учитывать, что при обобщении полученных экспериментальных данных не был учтен так называемый «масштабный фактор». Дело в том, что при проведении нами экспериментов образцы подложки были выбраны значительно меньше по сравнению с описанными в

литературе. Этот факт оказался влияющим на характер распределения частиц на подложке при разных режимах осаждения.

## 4 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

При выполнении данного раздела использовались рекомендации из работы [30].

### 4.1 Конструктивно-технологическая характеристика объекта

Технический объект – прибор для электролитического осаждения меди, потенциостат.

Технологический паспорт объекта

Таблица 4.1

№ п/п	Технологический процесс	Технологическая операция, вид выполняемых работ	Наименование должности работника, выполняющего технологический процесс, операцию <sup>3</sup>	Оборудование, устройство, приспособление	Материалы, вещества
1	Нанесение покрытия методом гальванопластики	Очистка образца	Лаборант	Ультразвуковая ванна	Вода, этиловый спирт
2		Электрохимическое осаждение		Потенциостат	Медь
3		Сушка образца		Фен	-

## 4.2 Идентификация производственно-технологических и эксплуатационных профессиональных рисков

### Идентификация профессиональных рисков

Таблица 4.2

№ п/п	«Производственно-технологическая и/или эксплуатационно-технологическая операция, вид выполняемых работ» [30]	«Опасный и /или вредный производственный фактор» [30]	«Источник опасного и / или вредного производственного фактора» [30]
1	Очистка образца	«Повышенный уровень ультразвука» [30]	Ультразвуковая ванна

#### 4.3 Методы и технические средства снижения профессиональных рисков

«Методы и средства снижения воздействия опасных и вредных производственных факторов» [30]

Таблица 4.3

№ п/п	Опасный и / или вредный производственный фактор	Организационные методы и технические средства защиты, снижения, устранения опасного и / или вредного производственного фактора	Средства индивидуальной защиты работника
1	«Повышенный уровень ультразвука» [30]	«Меры по снижению шума до норм по ГОСТ 12.1.003-83» [30].	Бируши, наушники

#### 4.4 Обеспечение пожарной и техногенной безопасности рассматриваемого технического объекта (производственно-технологических эксплуатационных и утилизационных процессов)

##### 4.4.1 Идентификация опасных факторов пожара.

Идентификация классов и опасных факторов пожара

Таблица 4.4.1

№ п/п	«Участок, подразделение» [30]	«Оборудование» [30]	«Класс пожара» [30]	«Опасные факторы пожара» [30]	«Сопутствующие проявления факторов пожара» [30]
1	Лаборатория	Потенциостат	Е	Электрооборудование, источники силового питания	опасные факторы взрыва, возникающие вследствие пожара

##### 4.4.2 Разработка технических средств и организационных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности технического объекта

«Технические средства обеспечения пожарной безопасности представлены в таблице 4.5» [30]



Технические средства обеспечения пожарной безопасности

Таблица 4.4.2

«Первичные средства пожаротушения» [30]	«Мобильные средства пожаротушения» [30]	«Стационарные установки системы пожаротушения» [30]	«Средства пожарной автоматики» [30]	«Пожарное оборудование» [30]	«Средства индивидуальной защиты и спасения людей при пожаре» [30]	«Пожарный инструмент (механизированный и немеханизированный)» [30]	«Пожарные сигнализация, связь и оповещение» [30]
Огнетушители типа ОП; УО	Пожарные машины и специализированная техника не требуется	системы пожаротушения автоматического срабатывания	извещатели и пожарные;	Стенд с песком, пожарные рукава	средства защиты кожных покровов тела человека (специальные огнестойкие накидки).	топор, ведра, лом, кувалда	Пожарная сигнализация; термоизвещатели

4.4.3. Организационные (организационно-технические) мероприятия по предотвращению пожара.

Организационные (организационно-технические) мероприятия по обеспечению пожарной безопасности

Таблица 4.4.3

«Наименование технологического процесса» [30]	«Наименование видов реализуемых организационных (организационно-технических) мероприятий» [30]	«Предъявляемые требования по обеспечению пожарной безопасности, реализуемые эффекты» [30]
Гальваническое нанесение покрытий	«Разработка мероприятий и инструкций о порядке работы с пожароопасными веществами и материалами, о соблюдении противопожарного режима и о действиях людей при возникновении пожара» [30]; «Разработка мероприятий по действиям администрации, рабочих, служащих на случай возникновения пожара и организации эвакуации людей» [30]	

#### 4.5 Обеспечение экологической безопасности рассматриваемого технического объекта

#### 4.5 Идентификация экологических факторов технического объекта

Таблица 4.5

<p>«Наименование технического объекта, технологического процесса» [30]</p>	<p>«Структурные составляющие технологического процесса, технологические операции, оборудование» [30]</p>	<p>«Воздействие технического объекта на атмосферу (вредные и опасные выбросы в окружающую среду)» [30]</p>	<p>«Воздействие технического объекта на гидросферу (образующие сточные воды, забор воды из источников водоснабжения)» [30]</p>	<p>«Воздействие технического объекта на литосферу (почву, растительный покров, недра) (образование отходов, выемка плодородного слоя почвы, отчуждение земель, нарушение и загрязнение растительного покрова и т.д.)» [30]</p>
<p>Нанесение гальванических покрытий</p>	<p>Электрохимическое осаждение</p>	<p>Испаряющиеся пары электролита</p>	<p>Жидкие растворимые и нерастворимые соединения</p>	<p>жидкие отходы производства</p>

#### 4.6 Заключение по разделу

В разделе «Безопасность и экологичность технического объекта» приведено описание установки для нанесения гальванических покрытий электрохимическим путём (таблица 4.1).

Выполнена «идентификация профессиональных рисков по осуществляемому технологическому процессу выполняемым технологическим операциям, видам производимых работ» [30]. «Разработан комплекс организационно-технические мероприятий, включающие технические устройства снижения профессиональных рисков» [30].

«Разработаны мероприятия по обеспечению пожарной безопасности технического объекта. Проведена идентификация класса пожара и опасных факторов пожара и разработка средств, методов и мер обеспечения пожарной безопасности. Разработаны средства, методы и меры обеспечения пожарной безопасности. Разработаны мероприятия по обеспечению пожарной безопасности на техническом объекте» [30].

Проведена комплексная идентификация экологических факторов и разработаны мероприятия по обеспечению экологической безопасности на техническом объекте [30].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной бакалаврской работе был рассмотрен раздел электрохимии – гальванотехника. Были рассмотрены его виды и особенности. А также различное применение гальванотехники в промышленности и некоторых других областях человеческой деятельности.

Описано особенность электрохимического осаждения, в частности потенциостатический режим. Во втором разделе была расписана методика осаждения медных покрытий на стальную подложку. Были рассмотрены некоторые особенности меднения стали.

В результате проведенных исследований было установлено влияние перенапряжения на осаждаемую поверхность. При более высоких значениях перенапряжения образовывалась более гладкая поверхность. В то время как при низких значениях разности потенциалов образовывались частицы меди, некоторые даже были икосаэдрической формы. Однако целью было получения медного покрытия, которое хорошо образовывается при значении перенапряжения  $-160\text{мВ}$ . И хотя при значении перенапряжения  $-180\text{мВ}$  образовалось покрытие, тем не менее там начал образовываться ещё один слой меди, чего следовало бы избежать.

В конце была разобрана безопасность и экологичность технического объекта и меры по предотвращению опасных ситуаций. Описана безопасность при работе с ультразвуком. Расписана пожарная безопасность. А также экологические факторы при проведении опытов по электрохимическому осаждению меди.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гальванотехника [Электронный ресурс]: Материал из Википедии — свободной энциклопедии: / Авторы Википедии // Википедия, свободная энциклопедия. — Электрон. дан. — Сан-Франциско: Фонд Викимедиа, 2016. — Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=80629347>
2. Oskam G. et al. Electrochemical deposition of metals onto silicon // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1998. – Т. 31. – №. 16. – С. 1927.
3. Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник / под ред. Шлугера М.А., т.2, - М.: Машиностроение, 1985. - 248 с.
4. Белозеров Н История гальванопластики // журнал Тайны XX века. - 2010. - №3.
5. Неравновесная электрохимия в гальванотехнике [Текст] = Nonequilibrium electrochemistry in galvanotechnik / Г. А. Садаков Москва: Машиностроение, 2015 - 79 с.: ил., табл.; 22 см. - Парал, тит. с. англ. - Библиогр.: с. 76-79. - ISBN 978-5-94275-774-8
6. Особенности техпроцессов гальванопластики и гальваноформирования: [Электронный ресурс] // Мир гальваники. URL: [http://www.galvanicworld.com/articles/articles\\_92.html](http://www.galvanicworld.com/articles/articles_92.html)
7. М – Меднение [электронный ресурс]: Гальванические покрытия Режим доступа: <http://www.platings.ru/cup.html>
8. Металлическое покрытие ювелирных украшений. Нанесение металлических покрытий на ювелирные украшения: [Электронный ресурс] // Мастер дела. Домашние хитрости, народные изобретения, секреты народных умельцев, полезные советы. URL: <http://masterdela.com/content/view/375/9>
9. Электролитическое хромирование [Текст]: приложение к журналу "Гальванотехника и обработка поверхности" / Л. Н. Солодкова, В. Н. Кудрявцев; под ред. В. Н. Кудрявцева. - 2-е изд. Москва: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2013 - 191 с.: ил., табл; 21 см. - Библиогр.: с. 187-191.
10. El-Giar E. M. et al. Localized electrochemical deposition of copper

microstructures //Journal of the Electrochemical Society. – 2000. – Т. 147. – №. 2. – С. 586-591.

11. Ашуйко В. А. и др. Получение окрашенных соединений меди из отработанных электролитов меднения и изучение возможности их использования в качестве антикоррозионных пигментов. Свиридовские чтения: сб. ст. вып. 12 — Минск: БГУ, 2016. — С. 40-46.

12. References Abdulwahab, M., Fayomi, O. S. I., & Popoola, A. P. I. (2016). Structural evolution, thermomechanical recrystallization and electrochemical corrosion properties of ni-cu-mg amorphous coating on mild steel fabricated by dual-anode electrolytic processing. *Applied Surface Science*, 375, 162-168.

13. Белов П. А., Петрова В. О., Хорунжая Е. Ю. Моделирование процесса гальванического нанесения композиционных покрытий на основе меди //Auditorium. – 2016. – №. 3 (11).

14. Thurber, C. R., Ahmad, Y. H., Sanders, S. F., Al-Shenawa, A., D'Souza, N., Mohamed, A. M. A., & Golden, T. D. (2016). Electrodeposition of 70-30 cu-ni nanocomposite coatings for enhanced mechanical and corrosion properties. *Current Applied Physics*, 16(3), 387-396.

15. Ritter G. et al. Two-and three-dimensional numerical modeling of copper electroplating for advanced ULSI metallization //Solid-State Electronics. – 2000. – Т. 44. – №. 5. – С. 797-807.

16. Nekouei R. K., Rashchi F., Amadeh A. A. Using design of experiments in synthesis of ultra-fine copper particles by electrolysis //Powder technology. – 2013. – Т. 237. – С. 165-171.

17. Glebov M.V., Kireev S.Yu., Naumov L.V. Effects of Non-steady State Conditions on Copper-Tin Electrodeposition Rate // Electroplating & Surface Treatment, 2017. – Vol.25, № 1. – P.29-33.

18. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия / Л.И. Антропов. — М.: Высшая школа, 1984. -519 с.

19. Основы электрохимических технологий [Текст]: учебное пособие / В. И.

Мишуров; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. образования "Донской гос. технический ун-т" Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2016 - 148 с.: ил., табл.; 21 см. - Библиогр.: с. 144-145. - ISBN 978-5-7890-1140-9:85 экз.

20. Ившин Я. В. меднение предварительно никелированной стали в кислых сульфатных электролитах // Вестник Казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19. – №. 9. – С. 105-107.

21. Nekouei R. K., Rashchi F., Amadeh A. A. Using design of experiments in synthesis of ultra-fine copper particles by electrolysis // Powder technology. – 2013. – Т. 237. – С. 165-171.

22. Гамбург Ю.Д. Структура и свойства электролитически осажденных металлов // Итоги науки и техники. Электрохимия. М.: ВИНТИ. — 1989. — Т. 30. -С. 118-169.

23. Alexander H. Physikalische Grundlagen der Elektronenmikroskopie. – Springer-Verlag, 2013.

24. Кузнецов В.В. Электроосаждение коррозионностойкого сплава кобальт-хром-вольфрам из водно-диметилформамидного электролита [текст] / Кузнецов В.В. и др. Гальванотехника и обработка поверхности. – 2017. – Том 25 № 1. – С.16-22.

25. ООО «Элинс». Потенциостат «Р-30» («Р-30S») Руководство по эксплуатации и гарантийные обязательства. [Электронный ресурс] [http://www.elch.chem.msu.ru/rus/mfti/p30\\_instructions.pdf](http://www.elch.chem.msu.ru/rus/mfti/p30_instructions.pdf)

26. Сапфир. Ювелирный технопарк. Ванна ультразвуковая 0,5Л "САПФИР" ТЦ, без нагрева. [Электронный ресурс] <http://www.sapphire.ru/vcd-501-1-4634/goodsinfo.html>

27. Растровый электронный микроскоп [Электронный ресурс] : Материал из Википедии — свободной энциклопедии : Версия 85845764, сохранённая в 16:00 UTC 7 июня 2017 / Авторы Википедии // Википедия, свободная энциклопедия. — Электрон. дан. — Сан-Франциско: Фонд Викимедиа, 2017. — Режим



доступа: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=85845764>

28. Эгертон Р. Ф. Физические принципы электронной микроскопии; Техносфера - М., 2010. - 304 с.

29. Zeiss SIGMA. Серия сканирующих электронных микроскопов // Российская национальная нанотехнологическая сеть URL: [http://www.rusnanonet.ru/equipment/zeiss\\_sigma/](http://www.rusnanonet.ru/equipment/zeiss_sigma/)

30. Горина Л.Н. Раздел выпускной квалификационной работы «Безопасность и экологичность технического объекта». Уч.-методическое пособие / Л.Л. Горина - Тольятти: изд-во ТГУ, 2016. –33 с.