

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт–Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт передовых производственных технологий

Работа допущена к защите

Руководитель образовательных
программ по направлению 27.04.06

_____ П.А. Аркин

« ____ » _____ 2019

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

ОРГАНИЗАЦИЯ, ПЛАНИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ
ПО СОЗДАНИЮ И ОСВОЕНИЮ НАУКОЕМКОЙ ПРОДУКЦИИ НА БАЗЕ
НАУКОЕМКОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

по направлению 27.04.06 Организация и управление наукоемкими
производствами

Выполнил

студент гр. 24343/1

_____ Е.А. Захаренко

Руководитель

Профессор БК ПУНП, д.э.н., профессор,

_____ П.А. Аркин

Санкт-Петербург

2019 год

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ВЫБОР И КОРРЕКТИРОВКА ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЯ МЕДЬ – НИКЕЛЬ – ОЛОВО-ВИСМУТ НА АЛЮМИНИИ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ	10
1.1 ВЫБОР И КОРРЕКТИРОВКА ПАРАМЕТРОВ МЕДНОГО ПОКРЫТИЯ.....	10
1.2 ВЫБОР И КОРРЕКТИРОВКА ПАРАМЕТРОВ НИКЕЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ	12
1.3 ВЫБОР И КОРРЕКТИРОВКА ПОКРЫТИЯ ОЛОВО-ВИСМУТ	14
ГЛАВА 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ ЛИНИИ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ	18
2.1 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ	18
2.1.1 Расчет производственной программы линий меднения, никелирования и олово-висмут	18
2.1.2 Расчет процесса меднения гальванической линии	19
2.1.3 Расчет материального баланса операции меднения	21
2.1.4 Расчет процесса никелирования гальванической линии.....	23
2.1.5 Расчет материального баланса операции никелирования.....	25
2.1.6 Расчет процесса осаждения покрытия олово-висмут гальванической линии.....	27
2.1.7 Расчет материального баланса операции олово-висмут	30
2.1.8 Выбор источников тока.....	32
2.2 РАСЧЕТ РАСХОДА ХИМИКАТОВ И ВОДЫ НА ПРОМЫВКУ (ГОДОВОЙ РАСХОД). 36	
2.2.1 Расчет расхода химикатов	36
2.2.2 Расчет годового расхода воды на промывку.....	40
2.2.3 Расчет расхода реагентов по очистке сточных вод	43
2.2.4 Расчет потребности анодов на первоначальный пуск и на выполнение годовой программы.....	46
2. КОМПОНОВКА ЛИНИИ МЕДЬ - НИКЕЛЬ – ОЛОВО-ВИСМУТ	49

ГЛАВА 3 ВЫБОР МЕТОДИК ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА И КОРРЕКТИРОВКИ ЭЛЕКТРОЛИТОВ	52
3.1 АНАЛИЗ ЦИНКАТНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА	52
3.2 АНАЛИЗ МЕДНОГО ПИРОФОСФАТНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА	53
3.3 АНАЛИЗ СЕРНОКИСЛОГО НИКЕЛЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИТА	54
3.4 АНАЛИЗ СЕРНОКИСЛОГО ЭЛЕКТРОЛИТА ОЛОВО-ВИСМУТ	60
ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА В ГАЛЬВАНИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ.....	63
4.1 БЕРЕЖЛИВОЕ ПРОИЗВОДСТВО	63
4.2 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ	64
4.3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ	66
4.4 АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	70
ГЛАВА 5. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОКРЫТИЯ МЕДЬ – НИКЕЛЬ ОЛОВО-ВИСМУТ НА АЛЮМИНИИ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ	73
5.1 ПРОВЕДЕНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО АНАЛИЗА КАЧЕСТВА МЕДНОГО ПОКРЫТИЯ	73
5.2 ПРОВЕДЕНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО АНАЛИЗА КАЧЕСТВА НИКЕЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ.....	83
5.3 ПРОВЕДЕНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЯ ОЛОВО- ВИСМУТ	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	101
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	104
ПРИЛОЖЕНИЕ ЧЕРТЕЖИ И СПЕЦИФИКАЦИЯ НА ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ВАННЫ, КАРКАСЫ ДЛЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ВАНН И БОРТОВЫЕ ОТСОСЫ	109

ВВЕДЕНИЕ

Применение металлических (гальванических) покрытий является одним из самых распространенных методов защиты изделий от коррозии в приборостроении и машиностроении, как в России, так и за рубежом. Качество металлических покрытий во многом определяет так же качество изделий, их работоспособность, долговечность, и надежность в эксплуатации.

Гальванические покрытия служат как средством защиты от коррозии, так и способом повышения износостойкости деталей, получение свойств электропроводности и других важных свойств поверхности.

Гальванические покрытия получают в цехах защитных покрытий, Организация и внедрение новых технологических процессов способствует расширению номенклатуры изготавливаемых изделий, с новыми видами покрытий.

Многослойное покрытие медь – никель – олово-висмут на алюминии и его сплавах – корпусных деталях, радиаторах, применяется в специальных целях. Основное назначение комплекса покрытий – защита от коррозии. Покрытие олово – висмут обеспечивает паяемость деталей, изолирует поверхность алюминия при контакте с медными деталями.

В отличии от однослойного покрытия многослойное покрытие беспористо, что позволяет исключить межслоевую коррозию по технологическому цинкату подслою, которое является анодным по отношению к алюминию.

Прочность сцепления многослойного покрытия олово-висмут выше, чем однослойного. По свойствам такое покрытие аналогично однослойному лужению.

Достоинства многослойного покрытия медь – никель – олово-висмут:

Оловянное покрытие является катодным по отношению к алюминию. Многослойное покрытие значительно лучше сопротивляется межслоевой коррозии, чем однослойное из-за его беспористости.

Покрытие олово-висмут рекомендуется для обеспечения лучшей паяемости. Добавление в сплав покрытия висмута позволяет сохранять способность к пайке больше года.

Оловянное покрытие стойко к действию соединений содержащих серу.

Добавление висмута в сплав позволяет предотвратить образование на поверхности покрытия токопроводящих кристаллов («игл»).

Легирование сплава висмутом (0,5 – 2%) позволяет избежать разрушения покрытия при эксплуатации ниже минус 30⁰С.

Разрушение сплавов олова без висмута происходит из-за перехода белого олова (β -Sn) в порошковообразное серое олово (α -Sn)

Недостатки покрытия олово-висмут:

Низкая износостойкость, недостаточная пластичность, более низкие по сравнению с другими покрытиями антифрикционные свойства.

Объектом исследования данной выпускной квалификационной работы является организация и проектирование линии многослойного покрытия как отдельной производственной единицы в рамках действующего производства

Предметом исследования являются составляющие процесса получения многослойного покрытия: технологические параметры получения покрытий, методики проведения анализов электролитов, методы оценки качества получаемого покрытия и оптимального запаса изделий на складе.

Целью данной работы является: проектирование и организация линии покрытия деталей из алюминия и алюминиевых сплавов покрытием медь – никель – олово-висмут, оценка качества полученного покрытия и расчет сопутствующих систем.

Задачи:

1. Выбор и оптимизация параметров технологии нанесения нового комплекса покрытия;
2. Выбор и расчет параметров оборудования;
3. Расчет материального баланса различных технологических операций;
4. Создание технологической схемы очистки сточных вод;

5. Разработка математического аппарата для оценки оптимального количества изделий на складе;
6. Разработка методики оценки качества (толщины покрытия) в зависимости от различных факторов.

Теоретическими основой, для обработки результатов качества получаемого покрытия (толщина), являлись методика многофакторного анализа. Для оценки оптимального количества изделий на складе применялся математический метод линейного программирования - метод ветвей и границ.

Практическая часть исследования проводилась на лабораторном оборудовании. Использовалось следующее лабораторное оборудование по получению многослойного покрытия: гальваническая установка Labor – Netzgerat NG 303, гальваническая ванна 2 литра, медные, никелевые и оловянные аноды 150 x 80 x 5 мм, медные шины и арматура. В качестве образцов (свидетелей) использовались алюминиевые пластины марки Амц размером 50x50 мм.

Информационную базу составили результаты практического исследования по получению многослойного покрытия, специализированная литература по теме исследования, документы (ГОСТы, ОСТы) и математические методы оценки качества покрытия и оценки оптимального запаса изделий на складе.

Научная новизна данной работы состоит в разработке нового комплекса гальванических покрытий медь – никель – олово-висмут на алюминии и его сплавах, обладающего электропроводностью, изоляционным сопротивлением, устойчивостью к влаге, а также работающего в условиях умеренно-холодного климата; организации нового участка в рамках действующего производства, и применении мат. метода оценки качества получаемых покрытий и математической оценки необходимого количества запасов изделия на складе.

Практическая значимость: данной работы состоит в том, что комплекс применяемых покрытий имеет широкое применение в промышленности, в

частности, предполагается его внедрение на одном из оборонных предприятий точного машиностроения г. Санкт-Петербурга.

Апробация работы прошла в публикации научных статей в рецензируемых изданиях рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. «Методические вопросы производственной логистики участка нанесения металлических покрытий в приборостроении». // Организатор производства №3

ГЛАВА 1. ВЫБОР И КОРРЕКТИРОВКА ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЯ МЕДЬ – НИКЕЛЬ – ОЛОВО-ВИСМУТ НА АЛЮМИНИИ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

1.1 Выбор и корректировка параметров медного покрытия

При выборе всех видов электролитов, в том числе медного электролита главным принципом являлся принцип наличия простой соли меди, входящей в состав электролита и содержащей анион SO_4^{2-} . Наличие аниона SO_4^{2-} обеспечивает схожесть кислотных остатков соли с существующими солями ZnSO_4^{2-} , SnSO_4^{2-} действующего производства, для унификации обработки электролитов на очистных сооружениях по имеющейся схеме очистки сточных вод.

Среди используемых электролитов меднения наиболее часто встречаются в производстве: кислые и щелочные (цианидные и пирофосфатные электролиты).

Кислые электролиты (фторборатные и сульфатные) – устойчивы в эксплуатации, имеют высокий выход по току (95-100%), нетоксичны, имеют значительную скорость осаждения, обладают хорошей выравнивающей способностью, особенно с наличием органических добавок. Однако рассеивающая способность таких электролитов низкая. Поэтому подвергаются меднению в них только детали несложной конфигурации. [11]

Щелочные электролиты (цианидные) обладают свойствами высокой рассеивающей способности и мелкозернистостью осадков. Одним из главных недостатков таких электролитов является недостаточная устойчивость в работе, низкий выход по току, токсичность и малая скорость осаждения. [11]

Щелочные электролиты (пирофосфатные) одни из наиболее часто применяемых в гальванике. Пирофосфатные электролиты по рассеивающей способности не уступают цианидным. Внутренние напряжения осадков и микротвердость, полученные в пирофосфатных электролитах, сильно не отличаются от полученных в цианидных электролитах. Существенный недостаток пирофосфатных электролитов – недостаточная адгезия

получаемых покрытий со сталью и их неустойчивость. При всем при этом пирофосфатные электролиты применяются для нанесения меди на алюминиевые сплавы [11]

Исходя из всего выше перечисленного из литературных источников был выбран пирофосфатный электролит для медных покрытий, содержащий сульфат меди для нанесения на алюминий и алюминиевые сплавы:

$\text{CuSO}_4 - 60,00 \text{ гр /л. [15]}$

$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 - 420,00 \text{ гр /л. [16]}$

$\text{NH}_3 - 6,00 \text{ мл /л. [4] [17]}$

Рекомендуемый литературой режим осаждения медного покрытия для выбранного электролита.

Режим №1

$D_k = 1 \text{ А /дм}^2$

$\tau = 45 \text{ мин}$

$t^{\circ}\text{C} = 40 \div 60$

$\text{pH} = 8 \div 9$

На лабораторной стадии получения данного вида покрытия были получены следующие результаты:

На образце получена толщина покрытия $\sigma = 24 \text{ мкм}$. На поверхности образца значительные «подгары», наличие которых свидетельствует о большой плотности тока.

Режим №2

$D_k = 0,5 \text{ А /дм}^2$

$\tau = 45 \text{ мин}$

$t^{\circ}\text{C} = 40 \div 60$

$\text{pH} = 8 \div 9$

На образце получена толщина покрытия $\sigma = 17 \text{ мкм}$. На поверхности образца наличие незначительных «подгаров», наличие которых так же свидетельствует о большой плотности тока.

Режим №3

$$D_k = 0,25 \text{ А /дм}^2$$

$$\tau = 45 \text{ мин}$$

$$t^{\circ}\text{C} = 40\div 60$$

$$\text{pH} = 8\div 9$$

На образце получена толщина покрытия $\delta = 10\div 11$ мкм. Толщина покрытия и отсутствие на поверхности образца «подгаров» свидетельствует о том, что режим выбран оптимально.

Медные покрытия, как правило, самостоятельного защитно-декоративного значения не имеют. Поэтому медные покрытия применяются в качестве подслоя при никелировании. [4]

1.2 Выбор и корректировка параметров никелевого покрытия

Никелирование, имеет самое широкое применение в приборостроении и машиностроении. Используется для:

для декоративной отделки изделий и деталей машин, а также защитно-декоративной отделки приборов, аппаратов практически во всех отраслях промышленности.

для защиты от коррозии в агрессивных средах (щелочи, некоторые кислоты и др.), а также условиях повышенных температур.

нанесения как промежуточного подслоя для других покрытий на сталь и другие металлы (алюминий и алюминиевые сплавы) с целью обеспечения сцепления покрытий с основой.

Для повышения износостойкости поверхностей работающих под различными видами нагрузок. Толщина никелевого покрытия определяется его назначением.

Осаждение меди и никеля комбинированно осуществляется по следующей схеме: осаждение медного подслоя из кислого электролита и слоя никеля.

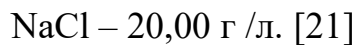
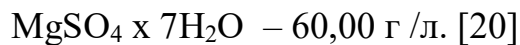
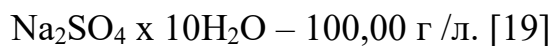
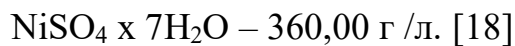
По составу солей электролиты никелирования можно разделить на три группы – фторборатные, сульфатные, сульфатные.

Фторборатные электролиты обладают лучшими буферными свойствами и большей устойчивостью по сравнению с сульфатными электролитами никелирования.

Сульфаматные электролиты состоят на основе сульфамата никеля. Сульфаматные электролиты образуют покрытия с минимальными внутренними напряжениями, поэтому они применяются для нанесения толстых осадков никеля в гальванопластике.

В гальванотехнике наиболее распространены электролиты на основе сульфата никеля $\text{NiSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$. Соль никеля хорошо растворяется в воде (до 400 г/л) [4]

Выбор никелевого покрытия осуществлялся по тому же принципу, что и медное покрытие. Из литературы была выбран сульфатный электролит, как наиболее распространенный:



$\text{H}_3\text{BO}_3 - 50,00 \text{ г /л. [4] [22]}$ 1. Вайнер Я.В. – Технология электрохимических покрытий. - М.: Машгиз, 1962. – 468 с.

Рекомендуемый литературой режим осаждения никелевого покрытия для выбранного электролита.

$$D_k = 0,8 \text{ А /дм}^2$$

$$\tau = 72 \text{ мин}$$

$$t^{\circ}\text{C} = 18$$

$$\text{pH} = 4,5 \div 5,5$$

На образце получена толщина покрытия $\sigma = 12 \text{ мкм}$. Толщина покрытия и отсутствие на поверхности образца «подгаров» свидетельствует о том, что режим выбран оптимально.

1.3 Выбор и корректировка покрытия олово-висмут

Основное назначение покрытия олово-висмут является придание свойств паяемости поверхности при одновременной защите от коррозии, а так же предотвращение перехода белой модификации олова в серую («оловянная чума»). Добавление в сплав олова висмута предотвращает его превращение в серую модификацию и возникновение игольчатой структуры.

Широкое применение нашло покрытие сплавом олово-висмут в радиоэлектронной промышленности для контактов, которые подвергаются пайке, выводов радиоэлементов, корпусов изделий для герметизации пайкой и СВЧ печатных плат.

Для осаждения сплава олово-висмут используют сульфатные электролиты, применение которых позволяет сократить объем использования сплавов олово-свинец и улучшить экологию окружающей среды.

На практике применяются и матовые, и блестящие покрытия сплава, осаждаемые из электролитов, отличающиеся различным набором ПАВ. [48]

Выбор электролита олово-висмут осуществлялся по тому же принципу, что и медное и никелевое покрытие. Из литературы была выбран сульфатный электролит следующего содержания:

SnSO_4 – 120,00 гр /л.

BiSO_4 – 3,00 гр /л. [23]

H_2SO_4 – 220,00 гр /л. [24]

NaCl – 1,60 гр /л. [25]

ОС-20 (смесь полиоксиэтиленгликолевых эфиров высших жирных спиртов) – 10,00 гр /л. [2] 2. Мельников П.С. – Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.

Рекомендуемый литературой режим осаждения никелевого покрытия для выбранного электролита.

Режим №1

$D_k = 2 \text{ А /дм}^2$

$\tau = 30 \text{ мин}$

$$t^{\circ}\text{C} = 20$$

$$\text{pH} = 1$$

На образце получена толщина покрытия $\sigma = 25\div 45$ мкм. На поверхности образца значительные «подгары», которые свидетельствуют о большой плотности тока.

Режим №2

$$D_k = 0,5 \text{ А /дм}^2$$

$$\tau = 30 \text{ мин}$$

$$t^{\circ}\text{C} = 20$$

$$\text{pH} = 1$$

На образце получена толщина покрытия $\sigma = 11\div 14$ мкм. Толщина покрытия и отсутствие на поверхности образца «подгаров» свидетельствует о том, что режим выбран оптимально.

На основании полученных результатов после проведения лабораторной стадии по получению покрытия медь – никель – олово-висмут составим технологическую карту многослойного покрытия.

Таблица 1.1

Технологический карта получения покрытия медь – никель – олово-висмут

№ оп.	Наименование и содержание операции	Оборудование	Состав растворов и материалов		Температура	Плотность тока, А/дм ²	Время выдержки, мин	рН электролита
			Наименование	Количество г/л				
1	Травление	Ванна травления	NaOH	50	40÷50		0,5	
2	Промывка в теплой воде	Ванна промывки			40÷60		0,5÷1,0	
3	Промывка в холодной воде	Ванна промывки			15÷20		0,5÷1,0	
4	Осветление	Ванна осветления	HNO ₃	150÷300	5÷25		0,25	
5	Промывка в теплой воде	Ванна промывки			40÷60		0,5÷1,0	
6	Промывка в холодной воде	Ванна промывки			15÷20		0,5÷1,0	
7	Цинкатная обработка		NaOH ZnO	1000 200	15÷25		0,12 – 0,3	
8	Промывка в теплой воде	Ванна промывки			40÷60		0,5÷1,0	
9	Промывка в холодной воде	Ванна промывки			15÷20		0,5÷1,0	
10	Меднение	Ванна меднения	CuSO ₄ Na ₄ P ₂ O ₇ NH ₃	60 420 6	40÷60	0,25	45	8÷9

Продолжение таблицы 1.1

11	Промывка теплой воде	в	Ванна промывки			40÷60		0,5÷1,0	11
12	Промывка холодной воде	в	Ванна промывки			15÷20		0,5÷1,0	
13	Никелирование		Ванна никелирования	NiSO ₄ x7H ₂ O Na ₂ SO ₄ x10H ₂ O MgSO ₄ x7H ₂ O NaCl H ₃ BO ₃	360 100 60 20 50	15÷20	0,8	72	4,5÷5,5
14	Промывка теплой воде	в	Ванна промывки			40÷60		0,5÷1,0	
15	Промывка холодной воде	в	Ванна промывки			15÷20		0,5÷1,0	
16	Покрывтие сплавом олово-висмут		Ванна олово- висмут	SnSO ₄ BiSO ₄ H ₂ SO ₄ NaCl OC-20	120 3 220 1,6 10	15÷20	0,5	30	1
17	Промывка теплой воде	в	Ванна промывки			40÷60		0,5÷1,0	
18	Промывка холодной воде	в	Ванна промывки			15÷20		0,5÷1,0	
19	Сушка		Сушильный шкаф			100		10÷15	

ГЛАВА 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ ЛИНИИ МНОГОСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ

2.1 Выбор и обоснование выбора оборудования

2.1.1 Расчет производственной программы линий меднения, никелирования и олово-висмут.

Для определения размера фонда рабочего времени цеха установлен следующий режим его работы. Режим работы каждой гальванической линии трехсменный (по 8 часов смена). Производство прерывное с остановкой в праздничные и выходные дни.

Нормальный фонд времени:

$$T_{ном} = (T_{кал} - T_{вых} - T_{праз}) \cdot 8 \cdot 3 - (T_{пт} \cdot 1 \cdot 3), \text{ где} \quad (2.1)$$

$T_{кал}$ – календарный фонд времени, $T_{кал} = 365$ дней

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году, $T_{вых} = 104$ дня

$T_{праз}$ – количество праздничных дней в году, $T_{праз} = 12$ дней;

$T_{пт}$ – число предпраздничных дней, $T_{пт} = 8$ дней

$$T_{ном} = (365 - 104 - 12) \cdot 8 \cdot 3 - (8 \cdot 1 \cdot 3) = 5952 \text{ часов [5]}$$

Потери при работе на не автоматизированном оборудовании от номинального фонда времени составляют 4%. Эффективный фонд времени работы оборудования равен:

$$T_{д} = 5952 - 5952 \cdot 0,04 = 5738 \text{ часа}$$

Отсюда годовая производственная программа будет равна:

$$P_2 = P_ч \cdot T_{д}, \text{ где} \quad (2.2)$$

$P_ч$ – производственная программа линии, м²/час

P_2 – годовая производственная программа, м²

Для медного покрытия согласно скорости осаждения ($\tau = 45$ мин), полученного в результате проведения лабораторной стадии и размера существующих ванн 850x500x600 мм при коэффициенте загрузки 0,8 ванны производственная программа линии медного покрытия составит - 0,53 м²/ч,

для никелевого покрытия – 0,33 м²/ч, для покрытия олово-висмут – 0,8 м²/ч таким образом:

$$P_z = 5738 \cdot 0,53 = 3041 \text{ м}^2 \text{ – медное покрытие}$$

$$P_z = 5738 \cdot 0,33 = 1893 \text{ м}^2 \text{ – никелевое покрытие}$$

$$P_z = 5738 \cdot 0,8 = 4590 \text{ м}^2 \text{ – покрытие олово-висмут}$$

2.1.2 Расчет процесса меднения гальванической линии

Годовая программа получения медного покрытия на алюминии и алюминиевых сплавах равна 3041 м². Действительный годовой фонд времени работы оборудования при работе в три смены составляет 5738 ч. Средняя толщина медного покрытия составляет 12 мкм. Допустимое количество бракованных изделий - 2%. Рассчитаем продолжительность меднения по формуле:

$$\tau_0 = \frac{d \cdot 10^{-6} \cdot \gamma / 10^{-6} \cdot 60}{i_k \cdot g / 10^{-2} \cdot BT}, \text{ где} \quad (2.3)$$

τ – продолжительность меднения;

d - толщина покрытия, м ($d = 12 \cdot 10^{-6}$);

γ - удельный вес осаждаемого металла, г/м³ ($\gamma_{Cu} = 8,96 \text{ г/см}^3$);

i_k - плотность тока, А/м² ($i_k = 25 \text{ А/м}^2$);

g - электрохимический эквивалент осаждаемого металла, г/(А·ч)

($g_{Cu^{2+} \rightarrow Cu} = 1,19 \text{ г/А·ч}$);

BT - выход металла по току ($BT_{Cu} = 100\%$);

60 - коэффициент перевода часов в минуты. [5]

$$\tau = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{8,96}{10^{-6}}\right) \cdot 60}{25 \cdot \left(\frac{1,19}{10^{-2}}\right) \cdot 1} = 2,17 \text{ мин}$$

Количество ванн медного покрытия и других лимитирующих, по времени выдержки деталей в них, технологических операций определяют по формуле:

$$N = \frac{S(\tau_0 + \tau_s)}{nf60T_0K_s}, \text{ где} \quad (2.4)$$

N - количество ванн (округляется до целого числа в большую сторону);

S - годовая программа, m^2 ($S = 3041 m^2$);

τ_0 - продолжительность процесса в ванне, мин ($\tau_0 = 2,17$ мин);

τ_3 - продолжительность загрузки - выгрузки ванн, мин ($\tau_3 = 1$ мин);

n - количество рядов катодных штанг в ванне, шт ($n = 1$);

f - единовременная загрузка ванны, m^2 ($f = 0,4$);

T_0 - действительный годовой фонд времени работы оборудования, ч
($T_0 = 5738$ ч);

K_3 - коэффициент загрузки линии или ванны ($K_3 = 0,8$).

Для рассматриваемого процесса выбираем ванну с внутренними размерами $850 \times 500 \times 600$ мм, исходя из размера самой большой детали, планируемой обрабатываться в ванной $0,4 m^2$

Подставляем значения в формулу:

$$N = \frac{3041 \cdot (2,17 + 1)}{1 \cdot 0,4 \cdot 60 \cdot 5738 \cdot 0,8} = 0,08 \text{ шт}$$

Принимаем, что $N = 1$. Таким образом, для выпуска годовой программы медного покрытия в $3041 m^2$, требуется 1 ванна меднения.

Далее определим ритм R_i работы по каждой i -й лимитирующей операции (мин/загрузку) по формуле:

$$R_i = \frac{\tau_0 + \tau_3}{K_3 \cdot N}, \text{ где} \quad (2.5)$$

τ_0 - продолжительность процесса в ванне, мин ($\tau_{0Cu} = 2,17$ мин);

τ_3 - продолжительность загрузки - выгрузки ванн, мин ($\tau_3 = 1$ мин);

K_3 - коэффициент загрузки линии или ванны ($K_3 = 0,8$);

N - количество ванн, шт ($N = 1$ шт).

Ритм работы по операции меднения

$$Ri = \frac{2,17 + 1}{0,8 \cdot 1} = 3,96 \text{ шт}$$

Далее исходя из ритма работы ванны меднения определяем производительность F операции ($m^2/ч$) по формуле:

$$F = \frac{60 \cdot f}{R_{\text{линии}}}, \text{ где} \quad (2.6)$$

f - единовременная загрузка ванны, м² ($f = 0,4$);

$R_{\text{линии}}$ - ритм работы операции меднения ($R_i = 3,96$ мин).

$$F = \frac{60 \cdot 0,4}{3,96} = 6,06 \text{ м}^2/\text{ч}$$

Учитывая заданную возможность брака в 2% производительность операции меднения будет меньше производительности ванн меднения на величину брака. Производительность рассчитывается по формуле:

$$F_{\text{нк}} = F \cdot (1 - 0,01\alpha) \quad (2.7)$$

$$F = 6,06 \cdot (1 - 0,01 \cdot 2) = 5,93 \text{ м}^2/\text{ч}$$

2.1.3 Расчет материального баланса операции меднения

Площадь единовременной загрузки ванны $f = 0,4$ м², площадь одной детали $f = S_{\text{дет}}$. Тогда число деталей в ванне при одной загрузке будет $N_{\text{дет}} = 1$ шт.

Толщина медного покрытия составляет 12 мкм, тогда объем металла высадившегося на детали рассчитывается по формуле:

$$V = S_{\text{дет}} \cdot h, \text{ где} \quad (2.8)$$

h – толщина покрытия, м ($h = 12 \cdot 10^{-6}$)

$$V = 0,4 \cdot 12 \cdot 10^{-6} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Рассчитаем массу металла, высадившегося на детали:

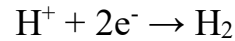
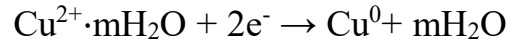
$$m = V \cdot \rho, \text{ где} \quad (2.9)$$

ρ – плотность меди, кг/м³ ($\rho_{\text{Cu}} = 8900$ кг/м³)

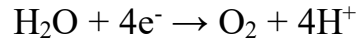
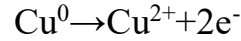
$$m = 4,8 \cdot 10^{-6} \cdot 8900 = 0,042 \text{ кг}$$

Масса меди, высадившейся при одной загрузке при ВТ = 100% составляет - 42 гр. Далее составим уравнения реакций, проходящих на катоде и аноде медного электролита.

Реакции на катоде:



Реакции на аноде:



По реакциям протекающим на катоде и аноде составим общее уравнение реакций протекающих в ванне меднения:



Расчет массы *i*-го компонента произведем по формуле:

$$G_i = \frac{m_{\text{Cu}} \cdot M_i}{M_{\text{Cu}}}, \text{ где} \quad (2.10)$$

m_{Cu} - масса меди, высадившейся при одной загрузке;

M_i - молекулярная масса *i*-го компонента, г/моль;

M_{Cu} - молекулярная масса меди, г/моль.

$$G_{\text{CuSO}_4} = \frac{42 \cdot 159,61}{63,54} = 105,5 \text{ г}$$

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{42 \cdot 18}{63,54} = 11,9 \text{ г}$$

$$G_{\text{Cu}_2\text{O}} = \frac{42 \cdot 79,54}{63,54} = 52,57 \text{ г}$$

$$G_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{42 \cdot 98,08}{63,54} = 64,83 \text{ г}$$

Результаты расчетов материального баланса по операции меднения сведем в таблицу

Таблица 2.1

Материальный баланс по операции меднения

Приход			Расход		
Статья баланса	г/0,4 м ²	%	Статья баланса	г/0,4 м ²	%
<u>CuSO₄</u>	105,5	89,8	Cu ₂ O	52,57	44,7
H ₂ O	11,9	10,2	H ₂ SO ₄	64,83	55,3
Итого:	117,4		Итого:	117,4	

Расчет относительной ошибки материального баланса операции меднения рассчитывается по формуле:

$$\Delta G = \frac{\Sigma P_p - \Sigma P_c}{\Sigma P_p} \cdot 100\% \quad (2.11)$$

$$\Delta G = \frac{117,4 - 117,4}{117,4} \cdot 100\% = 0\%$$

Отсутствие относительной ошибки говорит о том, что материальный баланс соблюдается полностью из-за 100% выхода по току медного покрытия

2.1.4 Расчет процесса никелирования гальванической линии

Годовая программа получения никелевого покрытия на алюминии и алюминиевых сплавах равна 1893 м². Режим работы гальванической линии трехсменный (24 часа). Действительный годовой фонд времени работы оборудования при работе в три смены составляет 5738 ч. Средняя толщина никелевого покрытия составляет 12 мкм. Допустимое количество бракованных изделий - 2%. Рассчитаем продолжительность никелирования по формуле:

$$\tau_0 = \frac{d \cdot 10^{-6} \cdot \gamma / 10^{-6} \cdot 60}{i_k \cdot g / 10^{-2} \cdot BT}, \text{ где} \quad (2.12)$$

τ – продолжительность никелирования;

d - толщина покрытия, м ($d = 12 \cdot 10^{-6}$);

γ - удельный вес осаждаемого металла, г/м³ ($\gamma_{Ni} = 8,9$ г/см³);

i_k - плотность тока, А/м² ($i_k = 80$ А/м²);

g - электрохимический эквивалент осаждаемого металла, г/(А·ч)

($g_{Ni^{3+} \rightarrow Ni} = 1,09$ г/ А·ч);

BT - выход металла по току ($BT_{Ni} \approx 100\%$);

60 - коэффициент перевода часов в минуты.

$$\tau = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{8,9}{10^{-6}}\right) \cdot 60}{80 \cdot \left(\frac{1,09}{10^{-2}}\right) \cdot 1} = 7,34 \text{ мин}$$

Количество ванн никелевого покрытия и других лимитирующих, по времени выдержки деталей в них, технологических операций определяют по формуле:

$$N = \frac{S(\tau_0 + \tau_3)}{nf60T_0K_3}, \text{ где} \quad (2.13)$$

N - количество ванн (округляется до целого числа в большую сторону);

S - годовая программа, м² ($S = 1893$ м²);

τ_0 - продолжительность процесса в ванне, мин ($\tau_0 = 7,34$ мин);

τ_3 - продолжительность загрузки - выгрузки ванн, мин ($\tau_3 = 1$ мин);

n - количество рядов катодных штанг в ванне, шт ($n = 1$);

f - единовременная загрузка ванны, м² ($f = 0,4$);

T_0 - действительный годовой фонд времени работы оборудования, ч ($T_0 = 5738$ ч);

K_3 - коэффициент загрузки линии или ванны ($K_3 = 0,8$).

Для рассматриваемого процесса выбираем ванну с внутренними размерами 850 × 500 × 600 мм, исходя из размера самой большой детали, планируемой обрабатываться в ванной 0,4 м²

Подставляем значения в формулу:

$$N = \frac{1893 \cdot (7,34 + 1)}{1 \cdot 0,4 \cdot 60 \cdot 5738 \cdot 0,8} = 0,14 \text{ шт}$$

Принимаем, что $N = 1$. Таким образом, для выпуска годовой программы в 1893 м², требуется 1 ванна никелирования.

Далее определим ритм R_i работы по каждой i -й лимитирующей операции (мин/загрузку) по формуле:

$$R_i = \frac{\tau_0 + \tau_3}{K_3 \cdot N}, \text{ где} \quad (2.14)$$

τ_0 - продолжительность процесса в ванне, мин ($\tau_{0Ni} = 7,34$ мин);

τ_3 - продолжительность загрузки - выгрузки ванн, мин ($\tau_3 = 1$ мин);

K_3 - коэффициент загрузки линии или ванны ($K_3 = 0,8$);

N - количество ванн, шт ($N = 1$ шт).

Ритм работы по операции никелирования:

$$Ri = \frac{7,34 + 1}{0,8 \cdot 1} = 10,42 \text{ шт}$$

Далее исходя из ритма работы ванны никелирования определяем производительность F операции ($\text{м}^2/\text{ч}$) по формуле:

$$F = \frac{60 \cdot f}{R_{\text{линии}}}, \text{ где} \quad (2.15)$$

f - единовременная загрузка ванны, м^2 ($f = 0,4$);

$R_{\text{линии}}$ - ритм работы операции никелирования ($R_i = 10,42$ шт).

$$F = \frac{60 \cdot 0,4}{10,42} = 2,30 \text{ м}^2/\text{ч}$$

Учитывая заданную возможность брака в 2% производительность операции никелирования будет меньше производительности ванн никелирования на величину брака. Производительность рассчитывается по формуле:

$$F_{\text{нк}} = F \cdot (1 - 0,01\alpha) \quad (2.16)$$

$$F = 2,30 \cdot (1 - 0,01 \cdot 2) = 2,25 \text{ м}^2/\text{ч}$$

2.1.5 Расчет материального баланса операции никелирования

Площадь единовременной загрузки ванны $f = 0,4 \text{ м}^2$, площадь одной детали $f = S_{\text{дет}}$. Тогда число деталей в ванне при одной загрузке будет $N_{\text{дет}} = 1$ шт

Толщина никелевого покрытия составляет 12 мкм, тогда объем металла высадившегося на детали рассчитывается по формуле:

$$V = S_{\text{дет}} \cdot h, \text{ где} \quad (2.17)$$

h – толщина покрытия, м ($h = 12 \cdot 10^{-6}$)

$$V = 0,4 \cdot 12 \cdot 10^{-6} = 48 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Рассчитаем массу металла, высадившегося на детали:

$$m = V \cdot \rho, \text{ где} \quad (2.18)$$

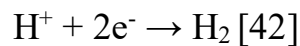
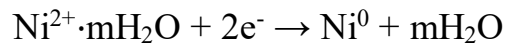
ρ – плотность никеля, кг/м³ ($\rho_{Ni} = 8907$ кг/м³)

$$m = 4,8 \cdot 10^{-6} \cdot 8907 = 0,042 \text{ кг}$$

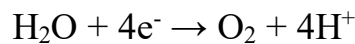
Масса никеля, высадившегося при одной загрузке при ВТ = 100% составляет - 42 гр.

Ниже представлены реакции, проходящие на катоде и аноде никелевого электролита.

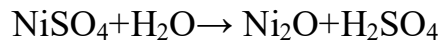
Реакции на катоде:



Реакции на аноде:



По реакциям протекающим на катоде и аноде составим общее уравнение реакций протекающих в ванне никелирования.



$$G_i = \frac{m_{Ni} \cdot M_i}{M_{Ni}}, \text{ где} \quad (2.19)$$

m_{Ni} - масса никеля, высадившейся при одной загрузке;

M_i - молекулярная масса i -го компонента, г/моль;

M_{Ni} - молекулярная масса никеля, г/моль.

$$G_{NiSO_4} = \frac{42 \cdot 154,75}{58,7} = 110,72 \text{ г}$$

$$G_{H_2O} = \frac{42 \cdot 18}{58,7} = 12,87 \text{ г}$$

$$G_{Ni_2O} = \frac{42 \cdot 74,69}{58,7} = 53,44 \text{ г}$$

$$G_{H_2SO_4} = \frac{42 \cdot 98,08}{58,7} = 70,15 \text{ г}$$

Результаты расчетов по операции никелирования сведем в таблицу

Таблица 2.2

Материальный баланс по операции никелирования

Приход			Расход		
Статья баланса	г/0,4 м ²	%	Статья баланса	г/0,4 м ²	%
<u>NiSO₄</u>	110,72	89,5	Ni ₂ O	53,44	43,2
H ₂ O	12,87	10,5	H ₂ SO ₄	70,15	56,8
Итого:	123,59		Итого:	123,59	

Расчет относительной ошибки материального баланса операции никелирования рассчитывается по формуле:

$$\Delta G = \frac{\Sigma Pr - \Sigma Pc}{\Sigma Pr} \cdot 100\% \quad , \text{ где} \quad (2.20)$$

$$\Delta G = \frac{123,59 - 123,59}{123,59} \cdot 100\% = 0 \%$$

Отсутствие относительной ошибки говорит о том, что материальный баланс соблюдается полностью из-за 100% выхода по току никелевого покрытия

2.1.6 Расчет процесса осаждения покрытия олово-висмут гальванической линии

Годовая программа получения покрытия олово-висмут на алюминии и алюминиевых сплавах равна 4590 м². Режим работы гальванической линии трехсменный (24 часа). Действительный годовой фонд времени работы оборудования при работе в три смены составляет 5691 ч. Средняя толщина покрытия олово-висмут составляет 12 мкм. Допустимое количество бракованных изделий - 2%. Рассчитаем продолжительность осаждения олово-висмут по формуле:

$$\tau_0 = \frac{d \cdot 10^{-6} \cdot \gamma / 10^{-6} \cdot 60}{i_k \cdot g / 10^{-2} \cdot BT}, \text{ где} \quad (2.21)$$

τ – продолжительность процесса осаждения олово-висмут;

d - толщина покрытия, м ($d = 12 \cdot 10^{-6}$);

γ - удельный вес осаждаемого металла, г/м³ ($\gamma_{Sn-Bi} = 7,3$ г/см³);

i_k - плотность тока, А/м² ($i_k = 80$ А/м²);

g - электрохимический эквивалент осаждаемого металла, г/(А·ч)

($g = 1,13$ г/ А·ч);

BT - выход металла по току (BT Ni \approx 100%);

60 - коэффициент перевода часов в минуты.

Время электролиза для получения покрытия олово-висмут и необходимое кол-во ванн:

$$\tau = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{7,3}{10^{-6}}\right) \cdot 60}{50 \cdot \left(\frac{1,13}{10^{-2}}\right) \cdot 1,0} = 9,3 \text{ мин}$$

Количество ванн покрытия олово-висмут и других лимитирующих, по времени выдержки деталей в них, технологических операций определяют по формуле:

$$N = \frac{S(\tau_0 + \tau_3)}{nf60T_0K_3}, \text{ где} \quad (2.22)$$

N - количество ванн (округляется до целого числа в большую сторону);

S - годовая программа, м² ($S = 4590$ м²);

τ_0 - продолжительность процесса в ванне, мин ($\tau_0 = 9,3$ мин);

τ_3 - продолжительность загрузки - выгрузки ванн, мин ($\tau_3 = 1$ мин);

n - количество рядов катодных штанг в ванне, шт ($n = 1$);

f - единовременная загрузка ванны, м² ($f = 0,4$);

T_0 - действительный годовой фонд времени работы оборудования, ч

($T_0 = 5738$ ч);

K_3 - коэффициент загрузки линии или ванны ($K_3 = 0,8$).

Для рассматриваемого процесса выбираем ванну с внутренними размерами $850 \times 500 \times 600$ мм, исходя из размера самой большой детали, планируемой обрабатываться в ванной

Подставляем значения в формулу:

$$N = \frac{4590 \cdot (9,3 + 1)}{1 \cdot 0,4 \cdot 60 \cdot 5738 \cdot 0,8} = 0,42 \text{ шт}$$

Принимаем, что $N = 1$. Таким образом, для выпуска годовой программы в 4590 м^2 , требуется 1 ванна олово-висмут.

Далее определим ритм R_i работы по каждой i -й лимитирующей операции (мин/загрузку) по формуле:

$$R_i = \frac{\tau_0 + \tau_3}{K_3 \cdot N}, \text{ где} \quad (2.23)$$

τ_0 - продолжительность процесса в ванне, мин ($\tau_{0Ni} = 9,3$ мин);

τ_3 - продолжительность загрузки - выгрузки ванн, мин ($\tau_3 = 1$ мин);

K_3 - коэффициент загрузки линии или ванны ($K_3 = 0,8$);

N - количество ванн, шт ($N = 1$ шт).

Ритм работы по операции олово-висмут:

$$Ri = \frac{9,3 + 1}{0,8 \cdot 1} = 12,87 \text{ шт}$$

Далее исходя из ритма работы ванны олово-висмут определяем производительность F операции ($\text{м}^2/\text{ч}$) по формуле:

$$F = \frac{60 \cdot f}{R_{\text{линии}}}, \text{ где} \quad (2.24)$$

f - единовременная загрузка ванны, м^2 ($f = 0,4$);

$R_{\text{линии}}$ - ритм работы операции олово-висмут ($R_i = 12,87$ шт).

$$F = \frac{60 \cdot 0,4}{12,87} = 1,86 \text{ м}^2/\text{ч}$$

Учитывая заданную возможность брака в 2% производительность операции олово-висмут будет меньше производительности ванн олово-висмут на величину брака. Производительность рассчитывается по формуле:

$$F_{\text{нк}} = F \cdot (1 - 0,01\alpha) \quad (2.25)$$

$$F = 1,86 \cdot (1 - 0,01 \cdot 2) = 1,82 \text{ м}^2/\text{ч}$$

2.1.7 Расчет материального баланса операции олово-висмут

Площадь единовременной загрузки ванны $f = 0,4 \text{ м}^2$, площадь одной детали $f = S_{\text{дет}}$. Тогда число деталей в ванне при одной загрузке будет $N_{\text{дет}} = 1$ шт. (уточнить площадь одной детали, пока за основу взято $0,4 \text{ м}^2$)

Толщина покрытия олово-висмут составляет 12 мкм , тогда объем металла высадившегося на детали рассчитывается по формуле:

$$V = S_{\text{дет}} \cdot h, \text{ где} \quad (2.26)$$

h – толщина покрытия, м ($h = 12 \cdot 10^{-6}$)

$$V = 0,4 \cdot 12 \cdot 10^{-6} = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Рассчитаем массу металла, высадившегося на детали:

$$m = V \cdot \rho, \text{ где} \quad (2.27)$$

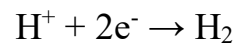
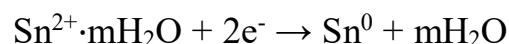
ρ – плотность сплава олово-висмут, $\text{кг}/\text{м}^3$ ($\rho_{\text{Sn-Bi}} = 7300 \text{ кг}/\text{м}^3$)

$$m = 4,8 \cdot 10^{-6} \cdot 7300 = 0,035 \text{ кг}$$

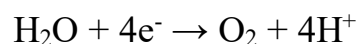
Масса сплава олово-висмут, высадившегося при одной загрузке при ВТ = 100% составляет - 35 гр.

Ниже представлены реакции, проходящие на катоде и аноде никелевого электролита.

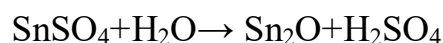
Реакции на катоде:



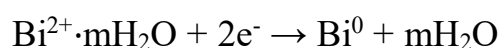
Реакции на аноде:

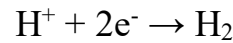


По реакциям протекающим на катоде и аноде составим общее уравнение реакций протекающих в ванне олово-висмут.

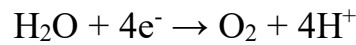


Реакция, проходящая на катоде:

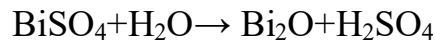




Реакция, проходящая на аноде:



По реакциям протекающим на катоде и аноде составим общее уравнение реакций протекающих в ванне олово-висмут.



$$G_i = \frac{m_{\text{Sn}} \cdot M_i}{M_{\text{Sn}}}, \text{ где} \quad (2.28)$$

m_{Sn} – масса олова, высадившейся при одной загрузке;

M_i – молекулярная масса i -го компонента, г/моль;

M_{Sn} – молекулярная масса олова, г/моль.

$$G_{\text{SnSO}_4} = \frac{35 \cdot 214,77}{118,71} = 63,32 \text{ г}$$

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{35 \cdot 18}{118,71} = 5,30 \text{ г}$$

$$G_{\text{Sn}_2\text{O}_3} = \frac{35 \cdot 134,71}{118,71} = 39,71 \text{ г}$$

$$G_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{35 \cdot 98,08}{118,71} = 28,91 \text{ г}$$

$$G_i = \frac{m_{\text{Bi}} \cdot M_i}{M_{\text{Bi}}}, \text{ где} \quad (2.29)$$

m_{Bi} – масса висмута, высадившейся при одной загрузке;

M_i – молекулярная масса i -го компонента, г/моль;

M_{Bi} – молекулярная масса висмута, г/моль.

$$G_{\text{BiSO}_4} = \frac{35 \cdot 208,98}{208,98} = 208,98 \text{ г}$$

$$G_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{35 \cdot 18}{208,98} = 3,01 \text{ г}$$

$$G_{\text{Bi}_2\text{O}_3} = \frac{35 \cdot 465,96}{208,98} = 78,03 \text{ г}$$

$$G_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{35 \cdot 98,08}{208,98} = 16,42 \text{ г}$$

Результаты расчетов по операции олово-висмут сведем в таблицу

Таблица 2.3

Материальный баланс по операции олово-висмут

Приход			Расход		
Статья баланса	г/0,4 м ²	%	Статья баланса	г/0,4 м ²	%
<u>SnSO₄</u>	63,32	33,3	Sn ₂ O	39,71	24,3
H ₂ O	5,30	2,7	H ₂ SO ₄	28,91	17,7
<u>BiSO₄</u>	118,26	62,2	Bi ₂ O	78,03	47,9
H ₂ O	3,01	1,5	H ₂ SO ₄	16,42	10,1
Итого:	189,89		Итого:	163,07	

Расчет относительной ошибки материального баланса операции олово-висмут рассчитывается по формуле:

$$\Delta G = \frac{\Sigma Pr - \Sigma Pc}{\Sigma Pr} \cdot 100\% \quad , \text{ где} \quad (2.30)$$

$$\Delta G = \frac{189,89 - 163,07}{189,89} \cdot 100\% = 14,1 \% [44]$$

Наличие относительной ошибки говорит о том, что материальный баланс соблюдается не полностью из-за контактного осаждения висмута на анодах

2.1.8 Выбор источников тока

Сила тока на ванну определяется:

$$I = S \cdot i_k \quad \text{где} \quad (2.31)$$

i_k – катодная плотность тока; $i_k = 0,25 \text{ А /дм}^2$

S – суммарная поверхность загрузки, м² [46]

Поверхность загрузки является суммой двух величин:

Рабочей поверхности деталей S_1 и не рабочей – S_2 , т.е. контактов изолированной части и поверхности материала навешивающихся приспособлений.

Следовательно, суммарная поверхность загрузки одной ванны (S) составит:

$$S = (S_1 + S_2) \cdot y, \text{ где} \quad (2.32)$$

y – количество подвесок в одной ванне (шт). $y = 1$ [46]

$$S_1 = 0,4 \text{ м}^2 = 40 \text{ дм}^2$$

S_2 – 5% от S_1

$$S = (40 + 40 \cdot 0,05) \cdot 1 = 42 \text{ дм}^2$$

Максимальная сила тока для операции электрохимического обезжиривания:

$$I = 42 \cdot 2 = 84 \text{ А}$$

Для операции меднения

$$I = 42 \cdot 0,25 = 10,5 \text{ А}$$

Для операции никелирования

$$I = 42 \cdot 0,8 = 33,6 \text{ А}$$

Для операции олово-висмут

$$I = 42 \cdot 0,5 = 21 \text{ А}$$

Далее рассчитаем баланс напряжений

Полное уравнение баланса напряжения имеет вид:

$$U = \Delta U_{\text{эха}} + \Delta U_{\text{шин}} + \Delta U_{\text{конт}}, \text{ где} \quad (2.33)$$

$\Delta U_{\text{эха}}$ – напряжение на электрохимическом аппарате, В

$\Delta U_{\text{шин}}$ – падение напряжения в шинопроводе

$\Delta U_{\text{конт}}$ – падение напряжения в контактах [46]

$$\Delta U_{\text{эха}} = E_a^i - E_k^i + \Delta U_{\text{эл-т}} = E_a^p - E_k^p + \Delta E_a - \Delta E_k + \Delta U_{\text{эл-т}}, \text{ где} \quad (2.34)$$

E_a^i - электродный потенциал катода, В

E_a^i - электродный потенциал анода, В

$\Delta U_{\text{эл-т}}$ – падение напряжения в электролите, В

E_k^p - равновесный потенциал катода, В

E_a^p – равновесный потенциал анода, В

ΔE_a - анодная поляризация; $\Delta E_a = +1,8 \text{ В}$

ΔE_k - катодная поляризация; $\Delta E_k = -0,8 \text{ В}$

Разность равновесных потенциалов рассчитывается по уравнению Гиббса-Гельмгольца:

$$E_a^p - E_k^p = \frac{\Delta G}{nF} = \frac{\Delta H}{nF} - T \cdot \frac{\Delta S}{nF}, \text{ где} \quad (2.35)$$

n – число электронов в уравнении реакции, относенное к одному молю

F - число Фарадея

ΔG - изменение термодинамического потенциала Гиббса

ΔH - изменение энтальпии системы в процессе электролиза, Дж.моль⁻¹

ΔS - изменение энтропии, Дж.моль⁻¹.К⁻¹

Анодная реакция: $\text{Cu}^0 \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2e^-$

Катодная реакция: $\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}^0$ – медный электролит

Анодная реакция: $\text{Ni}^0 \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2e^-$

Катодная реакция: $\text{Ni}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Ni}^0$ – никелевый электролит

Анодная реакция: $\text{Sn}^0 \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2e^-$

Катодная реакция: $\text{Sn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Sn}^0$

Анодная реакция: $\text{Bi}^0 \rightarrow \text{Bi}^{2+} + 2e^-$

Катодная реакция: $\text{Bi}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Bi}^0$ – электролит олово-висмут

Конечное и начальное состояние одинаковы, следовательно

$$\Delta H = 0, \Delta S = 0 \quad (2.36)$$

$$\Delta H = \Delta H_{\text{кон}} - \Delta H_{\text{нач}} = 0 \quad (2.37)$$

$$\Delta S = \Delta S - \Delta S_{\text{нач}} = 0 \quad (2.38)$$

$$E_a^p - E_k^p = \frac{0}{nF} - T \cdot \frac{0}{nF} = 0 \quad (2.39)$$

Падение напряжения на преодоление сопротивления электролита рассчитывается:

$$\Delta U_{\text{эл-т}} = \frac{i_{\text{ср}} \cdot l \cdot K_{\Gamma}}{\chi}, \text{ где} \quad (2.40)$$

$i_{\text{ср}} = \sqrt{i_{\text{к}} \cdot i_{\text{а}}}$ – средняя плотность тока, проходящая через электролит

i_k – катодная плотность тока, А/дм²

i_a – анодная плотность тока, А/дм²

$$S_a : S_k = 3 : 1$$

$$i_k = 10,5 \text{ А/дм}^2$$

$$i_a = 3,5 \text{ А/дм}^2$$

$$i_{cp} = \sqrt{10,5 \cdot 3,5} = 6,06 \text{ А/дм}^2$$

$K_T = 1$ - коэффициент газонаполнения

χ - удельная электропроводность электролита; $\chi = 167 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{дм}^{-1}$ /

L - расстояние между электродами; дм [49]

$$\Delta U_{(эл - \tau)} = 6,06 \cdot 10 \cdot 1/167 = 0,36 \text{ В}$$

$$\Delta U_{эха} = 0 + 1,8 - (-0,8) + 0,36 = 1,36 \text{ В}$$

Падение напряжения в шинопроводе:

$$\Delta U_{шин} = 0,05 \cdot \Delta U_{эха} \tag{2.41}$$

$$\Delta U_{шин} = 0,05 \cdot 1,36 = 0,068 \text{ В}$$

Падение напряжения в контактах:

$$\Delta U_{конт} = 0,05 \cdot 1,36 = 0,068 \text{ В}$$

$$U = 1,36 + 0,068 + 0,068 = 1,5 \text{ В}$$

Исходя из рассчитанного напряжения на источнике тока и силы тока для питания ванн меднения, никелирования и олово-висмут выбираются выпрямители тока со следующими характеристиками, представленными в таблице

Таблица 2.4

Характеристики выпрямителей тока

№	Ванна	Номинальный постоянный ток, А	Наибольшее постоянное напряжение, В	КПД, %	Коэффициент мощности	Габаритные размеры
1	Меднение	100	12	77-94	0,85- 0,91	370x230x170
2	Никелирование	100	12	77-94	0,85- 0,91	370x230x170
3	Олово-висмут	100	12	77-94	0,85- 0,91	370x230x170

2.2 Расчет расхода химикатов и воды на промывку (годовой расход)

2.2.1 Расчет расхода химикатов

Расход компонентов технологических растворов (химикатов) определяется их полезным расходом на образования покрытия, сменой отработанных растворов, технологически неизбежными потерями и приготовлением растворов при первичном запуске оборудования:

$$M_X = P_{ПК} + П + P_{см} + P_{зап}, \text{ где} \quad (2.42)$$

M_X - годовой расход химических веществ, кг;

$P_{ПК}$ - полезный расход химических веществ на образование покрытия, кг;

$П$ - технологические потери химических веществ, кг;

$P_{см}$ - расход химических веществ при замене отработанного раствора, кг;

$P_{зап}$ - расход химических веществ на приготовление растворов при первичном запуске оборудования, кг. [51]

$$M_X \text{ NaOH} = 273,94 + 194,28 + 7,5 = 475,72 \text{ кг/год}$$

$$M_X \text{ Na}_2\text{CO}_3 = 273,94 + 194,28 + 7,5 = 475,72 \text{ кг/год}$$

$$M_X \text{ Na}_3\text{PO}_4 = 365,26 + 259,05 + 10 = 634,31 \text{ кг/год}$$

$$M_X \text{ Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n = 45,65 + 32,38 + 1,25 = 79,28 \text{ кг/год}$$

$$M_X \text{ CuSO}_4 = 388,91 + 124,07 + 15 = 527,98 \text{ кг/год}$$

$$M_X \text{ HCl} = 1826,32 + 1295,26 + 50 = 3171,58 \text{ кг/год}$$

$$M_X \text{ Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 = 1224,59 + 868,50 + 105 = 2198,09 \text{ кг/год}$$

$$M_X \text{ NH}_3 = 17,49 + 12,40 + 1,5 = 31,39 \text{ кг/год}$$

$$M_X \text{ NiSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O} = 263,04 + 463,40 + 90 = 816,44 \text{ кг/год}$$

$$M_X \text{ Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O} = 181,50 + 128,72 + 25 = 335,22 \text{ кг/год}$$

$$M_X \text{ MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O} = 108,90 + 77,23 + 15 = 201,13 \text{ кг/год}$$

$$M_X \text{ NaCl} = 36,30 + 25,74 + 5 = 67,04 \text{ кг/год}$$

$$M_X \text{ H}_3\text{BO}_3 = 90,75 + 64,36 + 12,5 = 167,61 \text{ кг/год}$$

$$M_X \text{ SnSO}_4 = 738,83 + 374,54 + 30 = 1143,37 \text{ кг/год}$$

$$M_X \text{ BiSO}_4 = 738,83 + 6,24 + 0,5 = 745,57 \text{ кг/год}$$

$$M_{x \text{ H}_2\text{SO}_4} = 968,19 + 686,66 + 55 = 1709,85 \text{ кг/год}$$

$$M_{x \text{ NaCl}} = 5,28 + 3,74 + 0,3 = 9,32 \text{ кг/год}$$

Технологически потери химических веществ рассчитывают по формуле:

$$P = H \cdot K \cdot S \cdot (1 + 0,01 \cdot \alpha) \cdot c_0, \text{ где} \quad (2.43)$$

H - норматив технологических потерь, л/м² [35]

K - поправочный коэффициент;

S - годовая программа нанесения покрытия, м²/год;

α - количество бракованных покрытий, %;

c_0 - концентрация химических веществ в технологическом растворе, кг/л.

$$P_{\text{NaOH}} = 0,94 \cdot 9524 \cdot 1,02 \cdot 0,03 = 273,94 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 0,94 \cdot 9524 \cdot 1,02 \cdot 0,03 = 273,94 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{Na}_3\text{PO}_4} = 0,94 \cdot 9524 \cdot 1,02 \cdot 0,04 = 365,26 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n} = 0,94 \cdot 9524 \cdot 1,02 \cdot 0,005 = 45,65 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{HCl}} = 0,94 \cdot 9524 \cdot 1,02 \cdot 0,2 = 1826,32 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7} = 0,94 \cdot 3041 \cdot 1,02 \cdot 0,42 = 1224,59 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{NH}_3} = 0,94 \cdot 3041 \cdot 1,02 \cdot 0,006 = 17,49 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}} = 0,94 \cdot 1893 \cdot 1,02 \cdot 0,1 = 181,50 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}} = 0,94 \cdot 1893 \cdot 1,02 \cdot 0,06 = 108,90 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{NaCl}} = 0,94 \cdot 1893 \cdot 1,02 \cdot 0,02 = 36,30 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{H}_3\text{BO}_3} = 0,94 \cdot 1893 \cdot 1,02 \cdot 0,05 = 90,75 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 0,94 \cdot 4590 \cdot 1,02 \cdot 0,22 = 968,19 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{NaCl}} = 0,94 \cdot 4590 \cdot 1,02 \cdot 0,0012 = 5,28 \text{ кг/год}$$

Расход химикатов подлежащих замене отработанного раствора определяют по формуле:

$$P_{cm} = \frac{c \cdot S \cdot (1 + 0,01 \cdot \alpha)}{K_{cm}}, \text{ где} \quad (2.44)$$

$P_{\text{см}}$ - расход химиката при замене раствора, кг/год;

c - концентрация химиката в технологическом растворе, кг/л;

S - годовая программа нанесения покрытия, м²/год;

α - величина брака, %;

$K_{\text{см}}$ - удельная работоспособность технологических растворов

$$P_{\text{см NaOH}} = (0,03 \cdot 9524 \cdot 1,02) / 1,5 = 194,28 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см Na}_2\text{CO}_3} = 0,03 \cdot 9524 \cdot 1,02 / 1,5 = 194,28 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см Na}_3\text{PO}_4} = 0,04 \cdot 9524 \cdot 1,02 / 1,5 = 259,05 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n} = 0,005 \cdot 9524 \cdot 1,02 / 1,5 = 32,38 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см CuSO}_4} = 0,06 \cdot 3041 \cdot 1,02 / 1,5 = 124,07 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см HCl}} = 0,2 \cdot 9524 \cdot 1,02 / 1,5 = 1295,26 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см Na}_4\text{P}_2\text{O}_7} = 0,42 \cdot 3041 \cdot 1,02 / 1,5 = 868,50 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см NH}_3} = 0,006 \cdot 3041 \cdot 1,02 / 1,5 = 12,40 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}} = 0,36 \cdot 1893 \cdot 1,02 / 1,5 = 463,40 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}} = 0,1 \cdot 1893 \cdot 1,02 / 1,5 = 128,72 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}} = 0,06 \cdot 1893 \cdot 1,02 / 1,5 = 77,23 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см NaCl}} = 0,02 \cdot 1893 \cdot 1,02 / 1,5 = 25,74 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см H}_3\text{BO}_3} = 0,05 \cdot 1893 \cdot 1,02 / 1,5 = 64,36 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см SnSO}_4} = 0,12 \cdot 4590 \cdot 1,02 / 1,5 = 374,54 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см BiSO}_4} = 0,002 \cdot 4590 \cdot 1,02 / 1,5 = 6,24 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см H}_2\text{SO}_4} = 0,22 \cdot 4590 \cdot 1,02 / 1,5 = 686,66 \text{ кг/год}$$

$$P_{\text{см NaCl}} = 0,0012 \cdot 4590 \cdot 1,02 / 1,5 = 3,74 \text{ кг/год}$$

Запас химикатов на составление растворов при запуске нового оборудования определяют на основании объема ванны (рабочего) и рецептурного содержания компонентов по формуле:

$$P_{\text{зан}} = c_0 \cdot V / 1000, \text{ где} \quad (2.45)$$

$P_{\text{зап}}$ - расход химиката при запуске оборудования, кг;

c_0 - максимальная концентрация химиката в технологическом растворе, г/л;

V - объем ванны, л.

$$P_{\text{зап NaOH}} = 30 \cdot 250/1000 = 7,5 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап Na}_2\text{CO}_3} = 30 \cdot 250/1000 = 7,5 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап Na}_3\text{PO}_4} = 40 \cdot 250/1000 = 10 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n} = 5 \cdot 250/1000 = 1,25 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап CuSO}_4} = 60 \cdot 250/1000 = 15 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап HCl}} = 200 \cdot 250/1000 = 50 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап Na}_4\text{P}_2\text{O}_7} = 420 \cdot 250/1000 = 105 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап NH}_3} = 6 \cdot 250/1000 = 1,5 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}} = 360 \cdot 250/1000 = 90 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}} = 100 \cdot 250/1000 = 25 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}} = 60 \cdot 250/1000 = 15 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап NaCl}} = 20 \cdot 250/1000 = 5 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап H}_3\text{BO}_3} = 50 \cdot 250/1000 = 12,5 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап BiSO}_4} = 2 \cdot 250/1000 = 0,5 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап H}_2\text{SO}_4} = 220 \cdot 250/1000 = 55 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап SnSO}_4} = 120 \cdot 250/1000 = 30 \text{ кг}$$

$$P_{\text{зап NaCl}} = 1,2 \cdot 250/1000 = 0,3 \text{ кг}$$

При нанесении покрытий полезный расход и технологически неизбежные потери рабочих электролитов рассчитываются по формуле:

$$P_{\text{нк+П}} = H_{\text{рэ}} \cdot S \cdot (1 + 0,01 \cdot \alpha), \text{ где} \quad (2.46)$$

$P_{\text{нк}}$ - полезный расход химических веществ на образование покрытия, кг;

П - технологические потери химических веществ, кг/год;

$H_{\text{рэ}}$ - норматив расхода рабочего электролита;

S – годовая программа нанесения покрытия, м²/год;

α - величина брака, %;

$$(P_{\text{пк}}+\Pi)_{\text{Cu}} = 0,12538 \cdot 3041 \cdot (1 + 0,01 \cdot 2) = 388,91 \text{ кг / год}$$

$$(P_{\text{пк}}+\Pi)_{\text{Ni}} = 0,13623 \cdot 1893 \cdot (1 + 0,01 \cdot 2) = 263,04 \text{ кг / год}$$

$$(P_{\text{пк}}+\Pi)_{\text{Sn-Bi}} = 0,15781 \cdot 4590 \cdot (1 + 0,01 \cdot 2) = 738,83 \text{ кг / год}$$

Норматив расхода рабочего электролита рассчитывают по формуле:

$$H_{\text{вз}} = c \cdot (\Pi_{\text{д}} + \Pi_{\text{к}}) + d \cdot (p + \Pi_{\text{г}} \cdot c), \text{ где} \quad \underline{\underline{(2.47)}}$$

$H_{\text{вз}}$ - норматив расхода рабочего электролита, г/м²;

c - концентрация вещества в электролите, г/л;

d - средняя толщина покрытия, мкм;

$\Pi_{\text{д}}$ - потери электролита за счет уноса с деталями и приспособлениями, л/м²;

$$\Pi_{\text{д}}=0,05 \text{ л/м}^2 \text{ [9];}$$

$\Pi_{\text{к}}$ - потери электролита при корректировании, фильтровании и анализе, л/м²;

$$\Pi_{\text{к}}=0,05 \text{ л/м}^2;$$

p - количество вещества, необходимое для покрытия 1 м² при толщине слоя

$$1 \text{ мкм, } \underline{\underline{\Gamma/(M^2 \cdot \text{мкм})}}; p_{\text{Cu}} = 5,36 \text{ Г/(M}^2 \cdot \text{мкм)}; p_{\text{Ni}} = 5,32 \text{ Г/(M}^2 \cdot \text{мкм)} p_{\text{Sn-Bi}} = 4,41$$

$$\underline{\underline{\Gamma/(M^2 \cdot \text{мкм})}}$$

$\Pi_{\text{г}}$ - потери электролита за счет уноса в вентиляцию, $\underline{\underline{\text{л/(M}^2 \cdot \text{мкм})}}$; $\underline{\underline{\Pi_{\text{г}} = 0,18}}$

$\underline{\underline{\text{л/(M}^2 \cdot \text{мкм})}}$.

$$H_{\text{Cu}} = 60 \cdot (0,05+0,05) + 11 \cdot (0,0536 + 0,18 \cdot 60) = 125,38 \text{ г / м}^2$$

$$H_{\text{Ni}} = 60 \cdot (0,05+0,05) + 12 \cdot (0,0532 + 0,18 \cdot 60) = 136,23 \text{ г / м}^2$$

$$H_{\text{Sn-Bi}} = 60 \cdot (0,05+0,05) + 14 \cdot (0,0441 + 0,18 \cdot 60) = 157,81 \text{ г / м}^2$$

2.2.2 Расчет годового расхода воды на промывку

После каждой рабочей ванны схема промывки будет представлена следующим образом:



Рисунок 2.1 - Схема промывки после рабочих ванн: Т – технологическая ванна, П – одинарная ванна промывки

Тогда расход воды (годовой) на промывку деталей рассчитывается по формуле:

$$Q = 2 \cdot q \cdot F \cdot \sqrt{K}, \text{ где} \quad (2.48)$$

Q – расход воды на промывку, л/ч;

q – удельный вынос (унос) раствора, л/м²; для кислых электролитов – 0,2, для щелочных – 0,3

F – площадь обрабатываемой поверхности в единицу времени (производительность линии или технологической ванны);

K – кратность разбавления; [33]

Кратность разбавления определяется по формуле:

$$K = c_0 / c_n, \text{ где} \quad (2.49)$$

c_0 - концентрация отмываемого компонента в технологической ванне, г/л;

c_n - предельная концентрация отмываемого компонента в последней (по ходу движения деталей) ступени промывки, г/л (ЭХО – 0,1 г/л, травление – 0,1 г/л, активация – 0,1 г/л, меднение, никелирование, олово-висмут – 0,01 г/л)

Рассчитаем концентрацию отмываемых компонентов (c_0) в технологических ваннах.

Электрохимическое обезжиривание. Произведем пересчет максимальных концентраций компонентов электролита обезжиривания на NaOH

$\mathcal{E}_{\text{NaOH}} = 40 \text{ г/моль}$, $\mathcal{E}_{\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}} = 126,71 \text{ г/моль}$, $\mathcal{E}_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 53 \text{ г/моль}$
 $\mathcal{E}_{\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)} = 122,06 \text{ г/моль}$

30 г/л NaOH \equiv 30 г/л NaOH

40 г/л $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} \equiv 12,62 \text{ г/л NaOH}$

30 г/л $\text{Na}_2\text{CO}_3 \equiv 22,64$ г/л NaOH

5 г/л $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2) \equiv 1,63$ г/л NaOH

$30 + 12,62 + 22,64 + 1,63 = 66,89$ г/л NaOH .

Травление. Произведем пересчет максимальной концентрации HCl на H_2SO_4 :

$\mathcal{E}_{\text{HCl}} = 36,5$ г/моль, $\mathcal{E}_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 49$ г/моль.

200 г/л $\text{HCl} \equiv 268,49$ г/л H_2SO_4 .

Активация. Произведем пересчет максимальной концентрации H_2SO_4 на H_2SO_4 :

$\mathcal{E}_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 49$ г/моль.

150 г/л $\text{H}_2\text{SO}_4 \equiv 150$ г/л H_2SO_4

Меднение. Произведем пересчет максимальной концентрации CuSO_4 на Cu^{2+}

М.м. $\text{CuSO}_4 = 159,60$; А.м. $\text{Cu}^{2+} = 63,54$

60 г/л $\text{CuSO}_4 \equiv 23,88$ г/л Cu^{2+} .

Никелирование. Произведем пересчет максимальной концентрации NiSO_4 на Ni^{2+}

М.м. $\text{NiSO}_4 = 154,75$; А.м. $\text{Ni}^{2+} = 58,69$

360 г/л $\text{NiSO}_4 \equiv 136,53$ г/л Ni^{2+} .

Олово-висмут

М.м. $\text{SnSO}_4 = 214,77$; А.м. $\text{Sn}^{2+} = 118,71$

120 г/л $\text{SnSO}_4 \equiv 66,32$ г/л Sn^{2+} .

М.м. $\text{BiSO}_4 = 305,04$; А.м. $\text{Bi}^{2+} = 208,98$

2 г/л $\text{BiSO}_4 \equiv 11,92$ г/л Bi^{2+} .

Рассчитаем кратность разбавления электролитов:

$K_{\text{NaOH}} = 66,89 / 0,1 = 668,90$ раз

$K_{\text{HCl}} = 268,49 / 0,1 = 2684,90$ раз

$K_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 150 / 0,1 = 1500,00$ раз

$K_{\text{CuSO}_4} = 23,88 / 0,01 = 2388,00$ раз

$$K_{\text{NiSO}_4} = 136,53 / 0,01 = 13653,00 \text{ раз}$$

$$K_{\text{SnSO}_4} = 66,32 / 0,01 = 6632,00 \text{ раз}$$

$$K_{\text{BiSO}_4} = 11,92 / 0,01 = 1192,00 \text{ раз}$$

Рассчитаем расход воды на промывку, л/ч для электролитов обезжиривания, травления, активации, меднения, никелирования и олово-висмут;

$$Q_{\text{NaOH}} = 2 \cdot 0,3 \cdot 1,66 \cdot \sqrt{668,90} = 25,75 \text{ л/ч}$$

$$Q_{\text{HCl}} = 2 \cdot 0,2 \cdot 1,66 \cdot \sqrt{2684,90} = 34,40 \text{ л/ч}$$

$$Q_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 2 \cdot 0,2 \cdot 1,66 \cdot \sqrt{1500,00} = 25,71 \text{ л/ч}$$

$$Q_{\text{Cu}} = 2 \cdot 0,3 \cdot 0,53 \cdot \sqrt{13653,00} = 15,53 \text{ л/ч}$$

$$Q_{\text{Ni}} = 2 \cdot 0,2 \cdot 0,33 \cdot \sqrt{2388,00} = 15,42 \text{ л/ч}$$

$$Q_{\text{Sn-Bi}} = 2 \cdot 0,2 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{2388,00} = 28,30 \text{ л/ч}$$

Суммарный расход воды на промывку составит:

$$Q_{\text{суммарный}} = 25,75 + 34,40 + 25,71 + 15,53 + 15,42 + 28,30 = 145,11 \text{ л/ч}$$

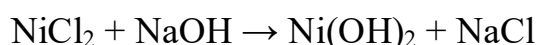
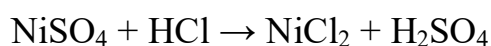
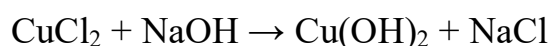
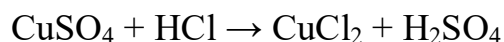
Умножим действительный годовой фонд времени на суммарный расход воды получим:

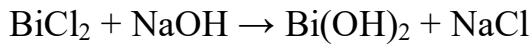
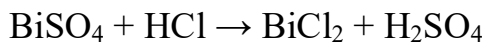
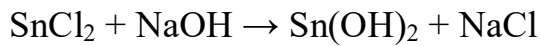
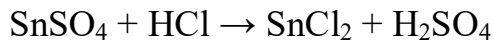
$$\text{Суточный объем расхода воды} = 145,11 \cdot 24 = 3482,64 \text{ л/сутки}$$

$$\text{Годовой объем расхода воды} = 145,11 \cdot 5738 = 832641,18 \text{ л/год}$$

2.2.3 Расчет расхода реагентов по очистке сточных вод

Очистка стоков, содержащих в себе медные, никелевые и осадки олово-висмут будет производиться реагентным методом. Основными компонентами в реакциях выступают кислота соляная и натрия гидроксид. Процесс очистки будет проходить по следующим уравнениям реакций:





Примем значение концентрации меди, никеля и олово-висмут в стоках и умножим на действительный годовой фонд времени вместе с общим количеством воды на промывку

$$5738 \cdot 15,53 = 89111,14 \text{ г/год}$$

$$5738 \cdot 15,42 = 88479,96 \text{ г/год}$$

$$5738 \cdot 28,30 = 162385,40 \text{ г/год}$$

По формуле находим количество реагентов

$$m_1 = \frac{m_2 \cdot M_1}{M_2}, \text{ где} \quad (2.50)$$

m_1, m_2 – масса первого и второго вещества соответственно, кг

M_1, M_2 – молярная масса первого и второго вещества соответственно, кг/кмоль

$$m_{\text{HCl}} = \frac{89111,14 \cdot 36}{160} = 20050,00 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{CuCl}_2} = \frac{89111,14 \cdot 134}{160} = 74630,57 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{89111,14 \cdot 98}{160} = 54580,57 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{NaOH}} = \frac{89111,14 \cdot 40}{134} = 26600,34 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{Cu(OH)}_2} = \frac{89111,14 \cdot 98}{134} = 65170,83 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{NaCl}} = \frac{89111,14 \cdot 58}{134} = 38570,49 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{HCl}} = \frac{88479,96 \cdot 36}{155} = 20550,18 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{NiCl}_2} = \frac{88479,96 \cdot 129}{155} = 73638,16 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{88479,96 \cdot 98}{155} = 54580,57 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{NaOH}} = \frac{88479,96 \cdot 40}{129} = 27435,64 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{Ni(OH)}_2} = \frac{88479,96 \cdot 93}{129} = 63787,87 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{NaCl}} = \frac{88479,96 \cdot 58}{129} = 39781,68 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{HCl}} = \frac{162385,40 \cdot 36}{215} = 27190,11 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{SnCl}_2} = \frac{162385,40 \cdot 189}{215} = 142748,09 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{162385,40 \cdot 98}{215} = 74017,53 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{NaOH}} = \frac{162385,40 \cdot 40}{189} = 34367,28 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{Sn(OH)}_2} = \frac{162385,40 \cdot 153}{189} = 131454,84 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{NaCl}} = \frac{162385,40 \cdot 58}{189} = 49832,55 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{HCl}} = \frac{162385,40 \cdot 36}{305} = 19166,80 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{BiCl}_2} = \frac{162385,40 \cdot 279}{305} = 148542,71 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{162385,40 \cdot 98}{305} = 52176,29 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{NaOH}} = \frac{162385,40 \cdot 40}{279} = 23281,06 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{Bi(OH)}_2} = \frac{162385,40 \cdot 243}{279} = 141432,44 \text{ г/год}$$

$$m_{\text{NaCl}} = \frac{162385,40 \cdot 58}{279} = 33757,53 \text{ г/год}$$

На основе полученных результатов составим таблицу материального баланса процесса очистки сточных вод меднения, никелирования и олово-висмут

Таблица 2.5

Материальный баланс процесса очистки сточных вод меднения, никелирования и олово-висмут

Приход			Расход		
Статья баланса	г/год	%	Статья баланса	г/год	%
CuSO ₄	89111	12,71	H ₂ SO ₄	235353	33,57
HCl	86957	12,40	NaCl	63805	9,10
NaOH	111684	15,93	Cu(OH) ₂	65170	9,29
NiSO ₄	88479	12,62	Ni(OH) ₂	63787	9,09
SnSO ₄	162385	23,16	Sn(OH) ₂	131454	18,75
BiSO ₄	162385	23,16	Bi(OH) ₂	141432	20,17
Итого	701001	100	Итого	701001	100

2.2.4 Расчет потребности анодов на первоначальный пуск и на выполнение годовой программы

При расчёте расхода анодного металла на первоначальный пуск оборудования учитывается соотношение катодной и анодной поверхности. Расход растворимых анодов определяется расходом металла, идущего на покрытие деталей, неиспользуемых остатков, шлакообразования и неизбежными потерями из-за покрытия неизолированных частей подвесок.

Размещение анодов в ванне

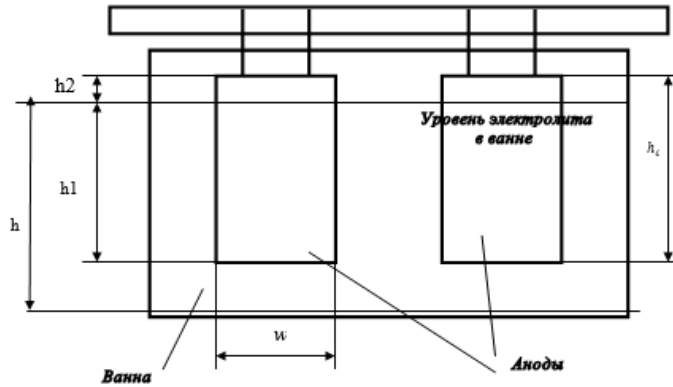


Рисунок 2.2 – Расположение анодов в ванне

Суммарная длина анода:

$$l_a = 0,7 \cdot l_{\text{внут}} \cdot 2, \text{ где} \quad (2.51)$$

$$l_{\text{внут}} = 830 \text{ мм}$$

$$l_a = 0,7 \cdot 830 \cdot 2 = 1162 \text{ мм}$$

Толщина анода:

Для ванн меднения, никелирования и олово-висмут $\delta_{a1} = 10 \text{ мм}$

Для ЭХО $\delta_{a2} = 4 \text{ мм}$

Высота анода: $h_a = 0,8 \cdot h_{\text{внут}}$, где

$$h_{\text{внут}} = 580 \text{ мм}$$

$$h_a = 0,8 \cdot 580 = 464 \text{ мм}$$

Ширину анода принимаем равную $w_a = 150 \text{ мм}$

Количество анодов на одной штанге:

$$n = \frac{l_a}{w_a} \quad (2.52)$$

$$\frac{1162}{150} = 7,74 \text{ шт}$$

Принимаем $n = 7$ шт, для равномерного распределения силовых линий на обоих анодных штангах разместим по 3 анода, всего 6 шт.

Объем анодов

$$V_a = h_a \cdot \delta_{a1} \cdot w_a, \text{ где} \quad (2.53)$$

h_a – длина анода, мм

δ_{a1} – толщина анода, мм

w_a – ширина анода [33]

Потребность в анодах на первоначальный пуск:

$$m_a = 2,7 \cdot V_a \cdot n \cdot d, \text{ где} \quad (2.54)$$

V_a – объем анода

n - количество ванн; $n = 1$

d – плотность $X18H10T = 7,86 \text{ г/см}^3 = 7,86 \cdot 10^3 \text{ г/дм}^3$

d – плотность меди = $8,96 \text{ г/см}^3 = 8,96 \cdot 10^3 \text{ г/дм}^3$

d – плотность никеля = $8,91 \text{ г/см}^3 = 8,91 \cdot 10^3 \text{ г/дм}^3$

d – плотность олова = $7,30 \text{ г/см}^3 = 7,30 \cdot 10^3 \text{ г/дм}^3$

Для ванны ЭХО

$$V_a(X18H10T) = 1162 \cdot 4 \cdot 150 = 697000 \text{ мм}^3 = 0,69 \text{ дм}^3$$

$$m_a(X18H10T) = 2,7 \cdot 0,69 \cdot 1 \cdot 7,86 \cdot 10^3 = 14643 \text{ г} = 14,643 \text{ кг}$$

При расчете нерастворимых электродов (катодов) на выполнение годовой программы учитывается количество их смен в году. Примем, что их замена происходит 2 раза в год, тогда расход катодов на выполнение годовой программы составит:

$$m = m_a \cdot 2 \quad (2.55)$$

$$m = 14,643 \cdot 2 = 29,286 \text{ кг}$$

Для ванны меднения

$$V_a(Cu) = 1162 \cdot 10 \cdot 150 = 1743 \text{ мм}^3 = 1,74 \text{ дм}^3$$

$$m_a(Cu) = 2,7 \cdot 1,74 \cdot 1 \cdot 8,96 \cdot 10^3 = 42094 \text{ г} = 42,094 \text{ кг}$$

Для ванны никелирования

$$V_a(Ni) = 1162 \cdot 10 \cdot 150 = 1743 \text{ мм}^3 = 1,74 \text{ дм}^3$$

$$m_a(Ni) = 2,7 \cdot 1,74 \cdot 1 \cdot 8,91 \cdot 10^3 = 41859 \text{ г} = 41,859 \text{ кг}$$

Для ванны олово-висмут

$$V_a(Sn) = 1162 \cdot 10 \cdot 150 = 1743 \text{ мм}^3 = 1,74 \text{ дм}^3$$

$$m_a(Sn) = 2,7 \cdot 1,74 \cdot 1 \cdot 7,30 \cdot 10^3 = 34295 \text{ г} = 34,295 \text{ кг}$$

Расход растворимых электродов (анодов) на выполнение годовой программы:

$$m = (P + \Delta P) \cdot \delta \cdot d + \Delta m, \text{ где} \quad (2.56)$$

δ - толщина покрытия;

$$\delta_{Cu} = 11 \text{ мкм}; \delta_{Ni} = 12 \text{ мкм}; \delta_{Sn} = 14 \text{ мкм}$$

d – плотность анодного металла;

$$d \text{ меди} = 8,96 \text{ г/см}^3; d \text{ никеля} = 8,91 \text{ г/см}^3; d \text{ олова} = 7,30 \text{ г/см}^3$$

$$\Delta m = 0,2 \cdot (P + \Delta P) \cdot \delta \cdot d \text{ [33]} \quad (2.57)$$

Преобразуем формулу:

$$m = (P + \Delta P) \cdot \delta \cdot d + 0,2 \cdot (P + \Delta P) \cdot \delta \cdot d \quad (2.58)$$

Для ванны меднения

$$m = (17520+1752) \cdot 11 \cdot 8,96 + 0,2 \cdot (17520 + 1752) \cdot 11 \cdot 8,96 = 2279337 \text{ г} = 2279,337 \text{ кг}$$

Для ванны никелирования

$$m = (17520+1752) \cdot 12 \cdot 8,91 + 0,2 \cdot (17520 + 1752) \cdot 12 \cdot 8,91 = 2472674 \text{ г} = 2472,674 \text{ кг}$$

Для ванны олово-висмут

$$m = (17520+1752) \cdot 14 \cdot 7,30 + 0,2 \cdot (17520 + 1752) \cdot 14 \cdot 7,30 = 2363517 \text{ г} = 2363,517 \text{ кг}$$

2.Компоновка линии медь - никель – олово-висмут

На основании составленной технологической карты и проведенных расчетов сформируем компоновку линии по нанесению многослойного покрытия медь – никель – олово-висмут.

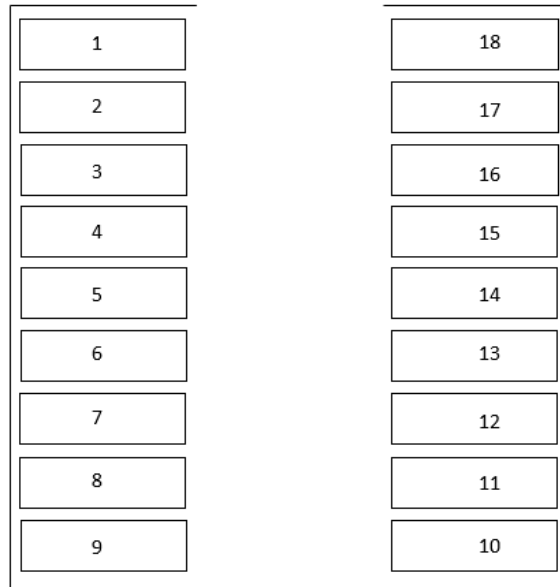


Рисунок 2.3 – Эскиз расположения ванн линии медь-никель-олово-висмут

Техническое задание на проектирование линии медь – никель – олово-висмут

Позиция ванн:

- | | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Ванна травления | 10. Ванна <u>меднения</u> |
| 2. Горячая промывка | 11. Горячая промывка |
| 3. Холодная промывка | 12. Холодная промывка |
| 4. Ванна осветления | 13. Ванна никелирования |
| 5. Горячая промывка | 14. Горячая промывка |
| 6. Холодная промывка | 15. Холодная промывка |
| 7. Ванна <u>цинкатной</u> обработки | 16. Ванна покрытия олово-висмутом |
| 8. Горячая промывка | 17. Горячая промывка |
| 9. Холодная промывка | 18. Холодная промывка |

1. Ванны 1, 2, 5, 8, 11, 14, 17 – оснастить ТЭНами с корпусом из нержавеющей стали марки 08Х18Н9Т. Мощность ТЭНов – 3 кВт
2. Ванны 10, 13 оснастить ТЭНами с корпусом из титана марки ВТ1
Мощность ТЭНов – 3 кВт
3. Ванны 10, 13, 16 оснастить рН электродами
4. Установить двухсторонние бортовые отсосы на ванны 1/2, 4/5, 7/8, 10/11, 13/14, 16/17
5. Установить односторонние бортовые отсосы на ванны 1, 4, 7, 10, 13, 16
6. Ванны 10, 13, 16 подключить к выпрямителям
7. К ваннам 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18 подвести воду через систему насосов и шлангов

ГЛАВА 3 ВЫБОР МЕТОДИК ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА И КОРРЕКТИРОВКИ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Качество гальванических покрытий в большой степени зависит от состава электролита или раствора, в связи с чем возникает необходимость быстрого и точного их контроля.

В данной главе приведены методики анализа медного пирофосфатного электролита, сернокислого никелевого электролита и серно-кислого электролита олово-висмут. Методика анализа каждого электролита содержит состав анализируемого электролита, описание хода анализа и количественный расчет составляющих. Используются такие методы как трилонометрический, алкалиметрический, аргентометрический и колориметрические методы.

3.1 Анализ цинкатного электролита

Состав электролита:

ZnO – 200 гр/л

NaOH – 1000 гр/л

Определение оксида цинка

Ход анализа:

Электролит развести в мерной колбе, отобрать в коническую колбу емкостью 250 мл аликвотную часть раствора, содержащую 1 мл электролита, разбавить водой до 100 мл, 10 капель 30% - ной перекиси водорода и кипятить 30 минут.

Полученный раствор охладить до комнатной температуры, прилить 5 мл буферного раствора, 0,3 – 0,5 г хромогена черного и титровать 0,1 Н раствором Трилона Б до перехода окраски из винно-красной в синюю

Содержание ZnO вычисляют по формуле:

$$\text{ZnO} = a \cdot 3,27 \cdot 1,25 \quad (3.1)$$

a – количество 0,1 Н Трилона Б, израсходованного на титрование, мл

3,27 – титр 0,1 Н раствора Трилона Б

Определение едкого натра

Ход анализа

В коническую колбу 250 мл отобрать 1 мл раствора, добавить 100 мл воды дистиллированной, для связывания свободного цинка добавить желтой кровяной соли – 10 мл., для связывания карбоната натрия добавить хлористый барий 10% - 10 мл, 3-4 капли фенолфталеина и титруют 0,1 Н раствором соляной кислоты до обесцвечивания.

Содержание щелочи вычисляют по формуле:

$$\text{NaOH} = a \cdot 4 \text{ г/л} \quad (3.2)$$

a – количество соляной кислоты, пошедшее на титрование, мл

0,004 – титр соляной кислоты по едкому натру

3.2 Анализ медного пиррофосфатного электролита

Состав электролита

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 60 гр /л.

$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ – 420 гр /л.

NH_3 – 6 мл /л.

Определение сернокислой меди объемным трилонометрическим методом

Ход анализа

Электролит развести в мерной колбе, отобрать в коническую колбу емкостью 250 мл аликвотную часть раствора, содержащую 1 мл электролита, разбавить водой до 100 мл, прилить одну-две капли метилового оранжевого и нейтрализовать раствором аммиака до появления желтой окраски, прилить 3-4 мл буферного раствора, добавить 0,3-0,5 г мурексида и титровать полученный раствор 0,1 н раствором трилона Б до появления малиново-фиолетовой окраски.

Содержание сернокислой меди в граммах на литр рассчитать по формуле

$$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = (a \cdot T \cdot 3,93 \cdot 1000) / m, \text{ где} \quad (3.3)$$

a – количество 0,1 раствора трилона Б, израсходованное на титрование,

мл;

T – титр 0,1 н. раствора трилона Б по меди (теоретический титр 0,003177), г/мл;

m – количество электролита, взятое на анализ, мл;

3,93 – коэффициент пересчета с меди на сернокислую медь [4]

Алкалиметрический метод определения пирофосфатного натрия

Ход анализа

К 20 мл разбавленного в 10 раз электролита (2 мл исходного) в конической колбе емкостью 250 мл добавляют 40 мл воды, 3-4 капли индикатора и нейтрализуют едким натром. Добавляют 15 мл сульфата цинка и образовавшуюся кислоту титруют едким натром.

$$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 = (v \cdot 0,0223 \cdot k \cdot 1000) / m, \text{ где} \quad (3.4)$$

v – количество 0,1 н. едкого натра, израсходованное на титрование, мл;

k – коэффициент нормальности 0,1 н. едкого натра

0,0223 – теоретический титр 0,1 н. едкого натра по пирофосфату натрия,

г /мл

m – количество электролита, взятого для анализа, мл [4]

3.3 Анализ сернокислого никелевого электролита

Состав электролита:

$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 360 гр /л.

$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 60 гр /л.

$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ – 100 гр /л.

NaCl – 20 гр /л.

H_3BO_3 – 50 гр /л. [1]

Примеси: медь, железо. Концентрация водородных ионов $\text{pH} = 5,2 - 5,8$

Определение магния объемным трилонометрическим методом

Реактивы и растворы:

Трилон Б 0,1 Н раствор – приготовлен из фиксаля

Ксиленоловый оранжевый – растворят в ступке с нитратом калия (KNO_3) в соотношении 1 : 100. Смесь очень устойчива.

Аммиак водный 25% раствор

Кислота уксусная концентрированная

Азотнокислый свинец 0,1 н раствор $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – взвесить 16,55 г соли и растворить в 1 л дистиллированной воды.

Ход анализа

1 мл электролита, 100 г воды, 25 мл 0,1 н раствора трилона Б точно отмерить пипеткой, 0,1 г ксиленолового оранжевого, по каплям концентрированной NH_3 до фиолетовой окраски, а затем по каплям концентрированную уксусную кислоту до желтого цвета. Затем титруют избыток трилона Б 0,1 н раствором азотнокислого свинца ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) до перехода желтой окраски в фиолетовую. Содержание сульфата никеля вычисляется по формуле:

$$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = (V_1 \cdot 0,002936 \cdot 1000 \cdot 4,785) / V \quad (3.5)$$

V_1 – объем 0,1 н раствора трилона Б, связанного с никелем, в мл.

$$V_1 = 25 - V_2$$

V_2 – объем 0,1 н $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, израсходованный на титрование избытка трилона Б, в мл

25 – объем 0,1 н трилона Б, добавленный к пробе, в мл

0,002936 – титр 0,1 н трилона Б по никелю

4,785 – коэффициент пересчета никеля на сернокислый никель

V – объем электролита, взятый на анализ

При $V = 1$ мл

$$\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = (25 - V_2) \cdot 14,05 \quad (3.6)$$

Определение сернокислого магния $\text{Mg}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

Реактивы и растворы:

Трилон Б 0,1н

Аммиак разбавленный 1:1

Индикаторная смесь:

2 в.ч – эриохром черный

1 в.ч – тропеолин

100 в.ч – NaCl

Растереть в ступке

Ход анализа

1 мл электролита, 100 мл воды, 25 мл 0,1 н трилона Б отмеренный пипеткой, 5 мл раствора аммиака, разбавленный 1:1, 0,1 г индикаторной смеси и титруется избыток 0,1 н трилона Б 0,1 н раствором $Mg(SO_4)_2$ до перехода зеленой окраски раствора в красную. Содержание $Mg(SO_4) \cdot 7H_2O$ вычисляют по формуле:

$$Mg(SO_4) \cdot 7H_2O = ((25 - V_1) - (25 - V_2) \cdot 0,001216 \cdot 1000 \cdot 10,137) / V \quad (3.65)$$

V_1 – объем 0,1 н $Mg(SO_4)_2$ израсходованный на титрование избытка трилона Б, в мл

V_2 – объем 0,1 н $Pb(NO_3)_2$

V – объем электролита, взятый на анализ, в мл

0,001216 – титр 0,1 н раствора трилона Б по магнию

10,137 – коэффициент пересчета с магния на сернокислый магний

При $V = 1$ мл

$$Mg(SO_4) \cdot 7H_2O = 12,33 \cdot ((25 - V_1) - (25 - V_2)), \text{ г/л} \quad (3.7)$$

Определение борной кислоты H_3BO_3 объемным ацидиметрическим
методом с применением комплексующей смеси

Сущность метода

Метод основан на титровании борной кислоты едким натром в присутствии комплексующей смеси: глицерина и натрия щавелевокислого

Растворы и реактивы

Натр едкий, 0,1 н раствор фенолфталеин 1% - ный спиртовой раствор: растворяют 1 г фенолфталеина в 70 мл этанола и добавляют 30 мл воды

Комплексующая смесь:

37 г щавелевокислого натрия

400 мл глицерина помещают в мерную колбу емкостью 1000 мл, доливают водой до метки и перемешивают

Ход анализа

1 мл электролита помещают в коническую колбу емкостью 250 мл, добавляют 20 мл воды, 20 мл комплексующей смеси, 10 капель фенолфталеина и титруют 0,1 н раствором NaOH до появления пурпурного окрашивания

Содержание борной кислоты H_3BO_3 в электролите вычисляют по формуле

$$H_3BO_3 = (V_1 \cdot 0,00618 \cdot 1000)/V, \text{ где} \quad (3.8)$$

V_1 – объем 0,1 н NaOH, израсходованный на титрование, мл

0,00618 – титр 0,1н раствора NaOH по борной кислоте

V – объем электролита, взятый на анализ, мл

При $V = 1$

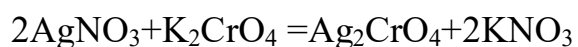
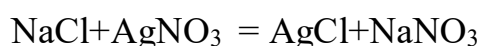
$$H_3BO_3 = 6,18 \cdot V_1$$

Определение хлористого натрия NaCl

Метод Мора

Сущность метода

Метод основан на осаждении ионов хлора азотнокислым серебром в присутствии в качестве индикатора ионов хромата, дающих с азотнокислым серебром осадок красного цвета:



Реактивы и растворы

Калий хромовокислый, 10% - ный раствор

Серебро азотнокислое 0,1 н раствор – 17,0 г $AgNO_3$ поместить в колбу емкостью 1 л, долить водой до метки, перемешать.

Ход анализа

1 мл электролита помещают в колбу на 250 мл, приливают 50 мл воды, 0,5 мл 10% - ного хромовокислого калия. Раствор титруют 0,1 н раствором

AgNO₃ до появления не исчезающей красной окраски. Содержание хлористого натрия в электролите вычисляют по формуле

$$\text{NaCl} = (V_1 \cdot 0,00584 \cdot 1000)/V, \text{ где}$$

V_1 – объем 0,1 н AgNO₃, израсходованный на титрование, в мл

0,00584 – титр 0,1 н AgNO₃ по хлористому натрию

V – объем электролита, взятый на анализ, в мл

При $V = 1$

$$\text{NaCl} = 5,84 \cdot V_1 \quad (3.9)$$

Меркуриметрический метод

Сущность метода

Ионы хлора при титровании раствором нитрата окиси ртути образуют малодиссоциированные соли хлорида ртути. Конец реакции в эквивалентной точке отмечают по образованию интенсивно окрашенного соединения нитрата окиси ртути с индикатором дифенилкарбазоном

Титрование проводят в спиртовой среде, которая способствует увеличению резкости перехода цвета перехода

Реактивы и растворы

Нитрат окиси ртути 1 – водный, 0,1 н раствор: 17,13 г Hg(NO₃)₂ · H₂O поместить в мерную колбу емкостью 1 л, растворить в воде добавляя 10 мл HNO₃ плотностью 1,4 довести до метки водой и перемешать.

Азотная кислота, 0,5 н раствор 33,6 мл HNO₃ плотностью 1,4, разбавляют до метки водой в колбе емкостью 1 л

Дифенилкарбазон, 1% - ный спиртовой раствор: 1 г дифенилкарбазона (оранжево-красный кристаллический порошок) растворяют в 100 мл этилового спирта. Хранят в склянке из темного стекла. Раствор имеет вишнево-красный цвет. Срок годности раствора 15 дней.

Ход анализа

1 мл электролита отбирают в коническую колбу емкостью 250 мл и выпаривают досуха на песчаной бане. Сухой остаток растворяют при перемешивании в 1 мл 0,5 н HNO_3 и 1 мл воды, добавляют 20 мл спирта этилового, 2-3 капли 1% - ного спиртового раствора дифенилкарбазона и титруют из микробюретки 0,1 н раствором $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ до появления фиолетового окрашивания.

Содержание хлорида натрия в электролите вычисляют по формуле:

$$\text{NaCl} = (V_1 \cdot 0,005845 \cdot 1000)/V, \text{ где} \quad (3.10)$$

V_1 – объем 0,1 н $\text{HgNO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, израсходованный на титрование, в мл

0,00584 – титр 0,1 н $\text{HgNO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ по хлористому натрию

V – объем электролита, взятый на анализ, в мл

При $V = 1$

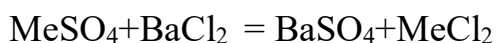
$$\text{NaCl} = 5,845 \cdot V_1 \quad (3.11)$$

Определение сернокислого натрия $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

Весовой метод

Сущность метода

Сульфаты осаждают хлоридом бария в виде сульфата бария:



Осадок прокаливают в муфеле и взвешивают. Количество сульфата натрия вычисляют по разности между общим содержанием сульфатов в электролите и сульфатов, связанных с никелем и магнием

Реактивы и растворы

Барий хлористый, 10% - ный раствор. Кислота соляная, плотность 1,19 г/см³

Ход анализа

1 мл электролита отбирают в стакан емкостью 400 мл, разбавляют водой до 100 мл, добавляют 3-5 мл концентрированной соляной кислоты, нагревают

раствор до кипения и приливают медленно при перемешивании 15-20 мл горячего 10% -ного раствора хлористого бария

Раствор с осадком сернокислого бария отстаивают в теплом месте два - четыре часа, отфильтровывают через фильтр «синяя лента» (плотный), промывают горячей водой, сушат, прокаливают при $t = 800 - 900^{\circ}\text{C}$ в течении 30 - 40 минут, охлаждают и взвешивают. Содержание SO_4 вычисляют по формуле

$$\text{SO}_4^{2-} = (a \cdot 0,4115 \cdot 1000)/b, \text{ где} \quad (3.12)$$

a – вес осадка сернокислого бария

0,4115 – коэффициент пересчета с сернокислого бария на анион серной

кислоты

b – количество электролита, взятое на анализ, мл

при $b = 1$ мл

$$\text{SO}_4^{2-} = 411,5 \cdot a$$

Содержание сульфата натрия вычисляют по формуле:

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} = (c - (a \cdot 0,342 + b \cdot 0,389)) \cdot 3,35, \text{ где} \quad (3.13)$$

$C = 411,5 \cdot a$ – общее количество сульфатов в электролите

A – количество сернокислого никеля в электролите

B – количество сернокислого магния в электролите

0,342 – коэффициент пересчета с сернокислого никеля на анион серной

кислоты

0,389 – коэффициент пересчета с сернокислого магния на анион серной

кислоты

3,35 – коэффициент пересчета с аниона серной кислоты на сернокислый натрий

В итоге:

$$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} = (411,5 \cdot a - (A_{\text{Ni}} \cdot 0,342 + B_{\text{Mg}} \cdot 0,389)) \cdot 3,35 \quad (3.14)$$

3.4 Анализ сернокислого электролита олово-висмут

Состав электролита:

$\text{SnSO}_4 - 120$ гр /л.

BiSO_4 – 3 гр /л.

H_2SO_4 – 220 гр /л.

NaCl – 1,6 гр /л.

OC-20 – 10 гр /л.

Метод колориметрического титрования (дублирования)

Ход анализа

Отбирают 0,2 – 0,5 мл электролита (в зависимости от содержания азотнокислого висмута) микропипеткой в мерный цилиндр с притертой пробкой емкостью 50 мл, добавляют 15 мл соляной кислоты, 5 мл тиомочевины, 5 мл иодистого калия, 3 мл фтористого натрия, разбавляют водой до метки, закрывают пробкой и перемешивают. В другой цилиндр емкостью 50 мл вводят те же реактивы в количествах и последовательности предусмотренных для испытуемой пробы (при анализе электролита по рецепту 1 добавляют еще 0,5 мл раствора ОП-10 или ОП-7) и добавляют по каплям из микробюретки стандартный раствор висмута при перемешивании до уравнения окраски с окраской испытуемого раствора. Содержание г/л

$$\text{BiSO}_4 = (v \cdot a \cdot 1000 \cdot 1,818) / m, \text{ где} \quad (3.15)$$

v – количество стандартного раствора висмута, израсходованного на уравнение окраски, мл

a – содержание висмута в 1 мл стандартного раствора, г

m – количество электролита, взятого для анализа, мл

1,818 – коэффициент пересчета с висмута на сернокислый висмут [3]

Метод определения серной кислоты

Ход анализа

В коническую колбу емкостью 250 мл поместить 1 мл цехового электролита, долить 100 мл воды, 3-4 капли метилового оранжевого и титровать 0,5 NaOH до перехода окраски в желтую

Содержание серной кислоты вычисляется по формуле:

$$\text{H}_2\text{SO}_4 = 4,9 \cdot A \cdot 5 \text{ (если 0,5 Н NaOH), где} \quad (3.16)$$

A – количество щелочи, пошедшее на титрование

4,9 – коэффициент расчета H_2SO_4

Метод определения олова

В коническую колбу, емкостью 250 мл, поместить 1 мл цехового электролита, добавить 50 мл дистиллированной воды, 5 мл соляной кислоты, кусочек мрамора и титровать 0,1 н. раствором йода в присутствии крахмала до появления синей не исчезающей окраски раствора.

Содержание сернокислого олова вычисляется по формуле

$$SnSO_4 = (a \cdot 0,00593 \cdot 1000 \cdot 1,81) / m, \text{ где} \quad (3.17)$$

a – количество 0,1 н раствора йода, израсходованного на титрование, мл;

0,00593 – титр 0,1 н раствора йода по Sn (теоретический), мл;

1,81 – коэффициент пересчета с Sn на $SnSO_4$;

m – количество электролита, взятое на анализ, мл.

ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА В ГАЛЬВАНИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

4.1 Бережливое производство

Современный этап развития российской экономики на базе новых технологических укладов (IV – V технологический уклады) и эффективных рыночных институтов требует высокой конкурентоспособности продукции российских промышленных предприятий, которые определяют темпы и качество экономического развития страны.

В этих условиях концепция управления предприятием «Бережливое производство» становится важным фактором повышения конкурентоспособности промышленного предприятия, является наиболее эффективным, надежным и малозатратным способом увеличения конкурентоспособности продукции промышленных предприятий.

Бережливое производство (lean production) – концепция управления производством, основанная на стремлении к устранению всех видов потерь. Бережливое производство предполагает вовлечение в процесс оптимизации производственного процесса всех сотрудников и максимальную ориентацию на потребителя.

Всё, что не добавляет ценности для потребителя, с точки зрения бережливого производства, классифицируется как потери, и должно быть устранено. [29]

Один из основоположников концепции «бережливого производства» японский инженер компании «Тойота» Тайити Оно выделяет следующие виды потерь, представленные на Рисунке 4.1



Рисунок 4.1 – Виды потерь с точки зрения бережливого производства

4.2 Постановка проблемы

В гальваническом производстве, как одном из видов производства покрытий на металлах, одной из самых существенных потерь является потеря, связанная с перепроизводством (производство на склад). Кроме затрат на хранение и учет появляется проблема изменения качества покрытия во времени, особенно это проявляется на покрытиях сплавами олова и олово-висмут. Оловянные покрытия характеризуются низкой твердостью, хорошим сцеплением с основным металлом, эластичностью, устойчивостью к сероводороду и органическим кислотам, а также воздействию тропического климата.

Основное назначение оловянных покрытий – придание свойств паяемости поверхности при одновременной защите от коррозии. Свежеосажденные покрытия хорошо паяются, а оплавленные не теряют этого свойства в течении длительного времени. Во времени свойства паяемости ухудшаются, в литературе указано [2] [4], что при продолжительном хранении даже в хороших условиях способность к пайке ухудшается, через две-три

недели она ухудшается настолько, что детали приходится подвергать повторному облуживанию или оплавлению.

Основным компонентом сплава является олово. При низких температурах (ниже $13,2^{\circ}\text{C}$) олово склонно к переходу в серую модификацию и рассыпается в порошок. Процесс этот значительно ускоряется и начинается при более высоких температурах, если происходит «заражение» компактного металлического олова β – модификации кристаллами серого α – олова. Это явление известное под названием «оловянной чумы», необходимо учитывать при хранении изделий.

Так же при хранении оловянных деталей отмечались многочисленные случаи самопроизвольного роста нитевидных кристаллов перпендикулярно поверхности, представляющих собой олово β – модификации. Длина нитевидных кристаллов, называемых «усами» или «вискерами», достигает 4 – 5 мм при толщине 0,5 – 2 мкм, а иногда и более. Нитевидные кристаллы прорастают даже через изоляционные пленки и вызывают замыкание цепей в приборах и радиотехнических изделиях. [32] [36]

Так же получило широкое применение оловянное покрытие, легированное висмутом в количестве 0,5 – 1,5% висмута. Этот вид покрытия в отличие от чистого олова значительно лучше сохраняет способность к пайке и поэтому не нуждается в оплавлении. Считается, что легирование оловянного осадка висмутом предотвращает переход олова в α – модификацию и снижается вероятность иглообразования, но, не исключает ее во времени, так как на практике были зафиксированы случаи образования нитевидных кристаллов на матовом покрытии олово – висмут [38] [40]

Отсюда появляется проблема определения оптимального объема партии произведенной продукции и времени ее хранения на складе в зависимости от его размера.

4.3 Математическая модель

Константы в соответствии с реальными условиями производства:

Количество производимых приборов в год 600 штук, в месяц в среднем 49 штук плюс различные комплектующие для производства 1 – 5 приборов в дальнейшем, что в усредненном варианте дает 50 приборов.

T – финансовый месяц 30 дней, состоящий из равных декад:

- t_1 – первая декада с 1 по 10 число;
- t_2 - вторая декада с 11 по 20 число;
- t_3 – третья декада с 21 по 30 число с вариацией в зависимости от месяца 28, 29, 31 число.

П – площадь склада участка нанесения покрытий равная 18 м^2 .

Номенклатура изделий участка нанесения покрытий:

- Крышка прибора (штуки) при площади одной стороны поверхности $\Pi_1' = 0,34 \text{ м}^2$
- Основание прибора (штуки) при площади одной стороны поверхности $\Pi_2' = 0,39 \text{ м}^2$
- Корпус блока питания (штуки) при площади одной стороны поверхности $\Pi_3' = 0,15 \text{ м}^2$.

Изделия в силу специфики хранения не могут лежать друг на друге и касаться краями, поэтому нормативно необходимо добавить 20% к площади каждого изделия и по правилам инженерных расчетов округлить в большую сторону до сотых. Таким образом, в итоге расчетная площадь:

- $\Pi_1 = 0,41 \text{ м}^2$
- $\Pi_2 = 0,47 \text{ м}^2$
- $\Pi_3 = 0,18 \text{ м}^2$.

Склад - это стеллажи из нейтрального к изделиям материала длиной 3 м и шириной 1 м шесть в ряд по высоте. При этом они отодвинуты от стены на 0,2 м и так как изделия могут частично выступать за полку стеллажа, можно не учитывать геометрию расположения изделий на полках склада.

Переменная величина и коэффициент ее значимости:

Технология нанесения покрытия регламентирована и по срокам изменена быть не может. В стандартный рабочий день может производиться 7 изделий одного вида. Естественно за счет увеличения времени работы в день, в неделю, в месяц число производимых изделий может быть увеличено за счет увеличения расходов за счет сверхурочных работ. Поэтому условное число единицы произведенной за рабочий день продукции x_i кратно 7 штукам и соответственно является безразмерной величиной, а занимаемая группой из 7 штук площадь увеличивается в 7 раз по отношению к любому изделию (таблица 1). Таким образом, в месяц необходимо расчетно производить 49 изделий каждой номенклатуры. При этом возникающие запасы рабочего времени используются для производства дополнительных комплектующих и в случае необходимости замене покрытия.

Главным узким местом данного производства и складирования является время нахождения изделия до окончания процесса пайки на следующей стадии производства. Это время согласно вышеизложенному ограничено 3 неделями, то есть 2 декадами календарного месяца: одна декада приходится на нанесение покрытия и пролеживание на складе участка нанесения покрытия, вторая декада на участок пайки и пролеживание на его складе до пайки. Так как на участке пайки часть изделий сразу поступает в производство (при аналогичном складе), то размеры склада участка пайки в расчет не берутся. При этом в нетестовом варианте модели учитывается в зависимости от возможностей участка пайки: последовательность производства изделий, количество возможных в данной декаде в зависимости от различных факторов: отпуска, больничные, отгулы, праздники и т.п.

Норма прибыли на каждый вид изделия обратно пропорциональна для данной стадии производства площади изделия, что связана с пропорциональным размером потерь: во-первых с необратимым изменением кристаллической решетки покрытия и утратой необходимых свойств паяемости при пролеживании более 3 недель, а значит с необходимостью счищать слой и

покрыть заново, во вторых с пожелтением и потемнением покрытия оловяноцинк во времени. Кроме времени хранения на складе на качество покрытия еще влияют температура – она не должна быть ниже 14 градусов, исключается попадание прямого солнечного света и так далее. Пожелтение/потемнение деталей происходит постепенно во времени из-за того, что отсутствует подслой меди, который не позволяет через поры покрытия наверх проступить железу с основы. Для предотвращения пожелтения/потемнения покрытия необходима протирка деталей органическими растворителями, а именно спирто-бензиновой смесью. Ну а в случае серьезного пожелтения/потемнения необходимо счищать слой и покрыть заново: оба процесса по затратам пропорциональны площади поверхности нанесенного слоя, поэтому значимость изделия для планирования на данном участке определяется:

$$Z_1 = \Pi_1' / (\Pi_1' + \Pi_2' + \Pi_3') = 0,39$$

$$Z_2 = \Pi_2' / (\Pi_1' + \Pi_2' + \Pi_3') = 0,44$$

$$Z_3 = \Pi_3' / (\Pi_1' + \Pi_2' + \Pi_3') = 0,17$$

Таким образом, исходные данные для тестового расчета программы производства на участке нанесения покрытий представлены в таблице 1.

Таблица 4.1

Исходные данные для расчета тестовой месячной программы производства

Декада	Изделие	Переменная	Ограничение снизу	Ограничение сверху	Значимость	Площадь x_i , м ²
Первая t_1	Крышка прибора	x_1	0	7	0,39	2,87
	Основание прибора	x_2	0	7	0,44	3,29
	Корпус блока питания	x_3	0	7	0,17	1,26
Вторая t_2	Крышка прибора	x_4	0	7	0,39	2,87
	Основание прибора	x_5	0	7	0,44	3,29

	Корпус блока питания	x_6	0	7	0,17	1,26
--	----------------------	-------	---	---	------	------

Продолжение таблицы 4.1

Третья t_3	Крышка прибора	x_7	0	7	0,39	2,87
	Основание прибора	x_8	0	7	0,44	3,29
	Корпус блока питания	x_9	0	7	0,17	1,26

В нетестовом варианте реального производства ограничение сверху практически всегда для нескольких переменных менее 7. Это связано с ограниченным количеством рабочих занимающихся пайкой и их ограничениями рабочего времени и т.п., что было описано выше.

Определим максимальное значение целевой функции при условии целочисленных значений x_i

$$F(X) = Z_1x_1 + Z_2x_2 + Z_3x_3 + Z_1x_4 + Z_2x_5 + Z_3x_6 + Z_1x_7 + Z_2x_8 + Z_3x_9$$

(1)

при следующих условиях-ограничениях:

$$x_1 + x_4 + x_7 = 7 \quad (4.1)$$

$$x_2 + x_5 + x_8 = 7 \quad (4.2)$$

$$x_3 + x_6 + x_9 = 7 \quad (4.3)$$

$$7\Pi_1x_1 + 7\Pi_2x_2 + 7\Pi_3x_3 \leq 18 \quad (4.4)$$

$$7\Pi_1x_4 + 7\Pi_2x_5 + 7\Pi_3x_6 \leq 18 \quad (4.5)$$

$$7\Pi_1x_7 + 7\Pi_2x_8 + 7\Pi_3x_9 \leq 18 \quad (4.6)$$

Как было указано выше число ограничений x_i в реальности обычно возрастает и в обычных не форс-мажорных условиях равняется в среднем трем.

4.4 Апробация результатов исследования

Первоначально была решена тестовая задача при стандартных семи ограничениях:

Решим прямую задачу линейного программирования симплекс-методом.

Определим максимальное значение целевой функции при условии целочисленных значений x_i

$$F(X) = 0.39x_1 + 0.44x_2 + 0.17x_3 + 0.39x_4 + 0.44x_5 + 0.17x_6 + 0.39x_7 + 0.44x_8 + 0.17x_9$$

при следующих условиях-ограничениях

$$x_1 + x_4 + x_7 = 7$$

$$x_2 + x_5 + x_8 = 7$$

$$x_3 + x_6 + x_9 = 7$$

$$2.87x_1 + 3.29x_2 + 1.26x_3 \leq 18$$

$$2.87x_4 + 3.29x_5 + 1.26x_6 \leq 18$$

$$2.87x_7 + 3.29x_8 + 1.26x_9 \leq 18$$

Задача решается стандартным расчетным методом ветвей и границ использующим:

- построение опорных планов систем неравенств и приведением к системе уравнений путем введения дополнительных переменных;
- разбиением задач на две подзадачи в случае нецелочисленных значений x_i и нахождением текущего целочисленного рекорда и его значения;
- ветвлением по переменной x_i .

Приведем полученные расчеты в приложении 1:

Итоговый ответ:

$$F(X) = 7$$

$$x_1 = 0$$

$$x_2 = 5$$

$$x_3 = 0$$

$$x_4 = 5$$

$$x_5 = 1$$

$$x_6 = 0$$

$$x_7 = 2$$

$$x_8 = 1$$

$$x_9 = 7$$

Из ответа можно сделать однозначный вывод о работоспособности модели и об имеющихся возможностях введения реальных дополнительных ограничений. При этом попытка расчета при уменьшении размера склада дает отрицательный результат. Поэтому нами был сделан расчет для первого квартала 2019 года, который представлен в таблице 2.

Таблица 4.2

Результаты расчета для первого квартала 2019 года

	Месяцы первого квартала 2019 года					
	январь		февраль		март	
	Дополнительные ограничения	Результат расчета	Дополнительные ограничения	Результат расчета	Дополнительные ограничения	Результат расчета
Значения переменных x_i и целевой функции и $F(X)$	$x_2 \leq 3$ $x_6 \leq 4$ $x_8 \leq 5$	$F(X) = 7$ $x_1 = 6$ $x_2 = 0$ $x_3 = 0$ $x_4 = 1$ $x_5 = 3$ $x_6 = 4$ $x_7 = 0$ $x_8 = 4$ $x_9 = 3$	$x_8 \leq 1$ $x_6 \leq 3$ $x_9 \leq 3$	$F(X) = 7$ $x_1 = 0$ $x_2 = 4$ $x_3 = 3$ $x_4 = 3$ $x_5 = 2$ $x_6 = 2$ $x_7 = 4$ $x_8 = 1$ $x_9 = 2$	$x_1 \leq 3$ $x_5 \leq 2$ $x_9 \leq 4$	$F(X) = 7$ $x_1 = 0$ $x_2 = 5$ $x_3 = 1$ $x_4 = 5$ $x_5 = 0$ $x_6 = 2$ $x_7 = 2$ $x_8 = 2$ $x_9 = 4$

Можно сделать вывод, что дополнительные условия в значительной степени уменьшают возможности для маневрирования фондами. Спецификой января являются шесть праздничных дней (реально восемь – десять) выходных, но в связи со спецификой производства часть из них (3, 4, 5, 8, 9, 10 января) являлись рабочими в этом году в полном соответствии с моделью. Специфика третьей декады февраля (восемь дней, из которых один 23 февраля праздничный) вынудил остальные дни сделать рабочими. Специфика марта (дополнительный праздничный день 8 марта в первой декаде) также отражен в расчете автоматически за счет дополнительных ограничений.

ГЛАВА 5. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПОКРЫТИЯ МЕДЬ – НИКЕЛЬ ОЛОВО-ВИСМУТ НА АЛЮМИНИИ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

5.1 Проведение многофакторного анализа качества медного покрытия

Многофакторный эксперимент широко используется в современной научной деятельности и является эффективным средством обработки и планирования экспериментальных исследований. [13] [47]

Произведем многофакторный анализ покрытия медь-никель-олово-висмут.

За факторы, влияющие на ход эксперимента примем параметры электролитического осаждения:

плотность тока, А/дм² – X₁

время выдержки, мин – X₂

температура, t°С – X₃

водородный показатель, рН, б.в – X₄

Число степеней свободы f линейной модели определяется по формуле:

$$f = N - (k + 1), \text{ где} \quad (5.1)$$

N – число опытов,

k – число факторов

Количество факторов k = 4, отсюда следует, что кол-во опытов N, которое необходимо провести равняется 16. Факторы и их произведения покрывают все возможные их сочетания X₁, X₂, X₃, X₄, X₁X₂, X₁X₃, X₁X₄, X₂X₃, X₂X₄, X₃X₄, X₁X₂X₃, X₁X₂X₄, X₁X₃X₄, X₂X₃X₄, X₁X₂X₃X₄. Таким образом, количество степеней свободы системы равно 11-ти.

Начнем с определения пределов варьирования факторов. Максимальным значением плотности тока будет 1 А/дм², минимальным – 0,25 А/дм². Это будут пределы варьирования фактора – 1 - 0,25 А/дм². Аналогично для оставшихся факторов: время выдержки 45 - 45 мин, температура 60 - 40 t°С, рН 9 - 8. Для удобства обозначим факторы буквенными символами: плотность тока – I, время выдержки – τ, температура – t, рН – р.

Составим обобщенную формулу зависимости. Базовая формула будет иметь вид: $y = f(I, \tau, t, p)$. Составим таблицу факторов и их пределов.

Таблица 5.1

Факторы и их пределы

Факторы	Плотность тока, А/дм ²	Время выдержки, мин	Температура, <u>toC</u>	<u>pH</u>	Толщина покрытия
Принятое обозначение	I	τ	t	p	σ
Обозначение в МФЭ	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y
Верхний предел (1)	1	45	60	9	24
Основной уровень (0)	0,5	45	50	8,5	17
Нижний предел (-1)	0,25	45	40	8	10

Составим полную матрицу для проведения четырехфакторного эксперимента

Таблица 5.2

Полная матрица четырехфакторного эксперимента

№	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₁ x ₄	x ₂ x ₃	x ₂ x ₄	x ₃ x ₄	x ₁ x ₂ x ₃	x ₂ x ₃ x ₄	x ₁ x ₂ x ₄	x ₁ x ₃ x ₄	x ₁ x ₂ x ₃ x ₄	Результаты опытов					Ср.знач
																	1	2	3	4	5	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14	13	11	12	14	12,8
2	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	13	13	14	12	11	12,6
3	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	11	12	13	12	14	12,4
4	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	12	14	12	13	11	12,4
5	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	11	11	14	12	13	12,2
6	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	14	14	11	12	12	12,6
7	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	13	14	11	13	12	12,6
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	14	11	14	12	13	12,8
9	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	13	12	14	11	14	12,8
10	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	12	14	11	13	14	12,8
11	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	14	11	12	14	13	12,8
12	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	11	13	12	14	12	12,4
13	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	14	13	14	11	12	12,8
14	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	12	13	13	13	11	12,4
15	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	13	13	11	14	14	13
16	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	12	11	14	13	14	12,8

Определим коэффициенты регрессии уравнения, представленного в общем виде:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4 + b_{123}X_1X_2X_3 + b_{234}X_2X_3X_4 + b_{124}X_1X_2X_4 + b_{134}X_1X_3X_4 + b_{1234}X_1X_2X_3X_4 \quad (5.2)$$

Произведем расчеты коэффициентов регрессии используя среднее значение Y (результат 5 измерений) и матрицу коэффициентов варьирования факторов. Полученные результаты сумм произведений, являются коэффициентами уравнения.

$$b_0 = X_0 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 + 12,4 + 12,4 + 12,2 + 12,6 + 12,6 + 12,8 + 12,8 + 12,8 + 12,8 + 12,4 + 12,8 + 12,4 + 13 + 12,8 = 189,4 / 16 = 11,84$$

$$b_1 = X_1 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 + 12,4 - 12,4 + 12,2 - 12,6 + 12,6 - 12,8 + 12,8 - 12,8 + 12,8 - 12,4 + 12,8 - 12,4 + 13 - 12,8 = 13,4 / 16 = 0,84$$

$$b_2 = X_2 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 - 12,4 - 12,4 + 12,2 + 12,6 - 12,6 - 12,8 + 12,8 + 12,8 - 12,8 - 12,4 + 12,8 + 12,4 - 13 - 12,8 = 12,6 / 16 = 0,79$$

$$b_3 = X_3 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 + 12,4 + 12,4 - 12,2 - 12,6 - 12,6 - 12,8 + 12,8 + 12,8 + 12,8 + 12,4 - 12,8 - 12,4 - 13 - 12,8 = 12,6 / 16 = 0,79$$

$$b_4 = X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 + 12,4 + 12,4 + 12,2 + 12,6 + 12,6 + 12,8 - 12,8 - 12,8 - 12,8 - 12,4 - 12,8 - 12,4 - 13 - 12,8 = 11,4 / 16 = 0,71$$

$$b_5 = X_1X_2 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 - 12,4 + 12,4 + 12,2 - 12,6 - 12,6 + 12,8 + 12,8 - 12,8 - 12,8 + 12,4 + 12,8 - 12,4 - 13 + 12,8 = -13 / 16 = -0,81$$

$$b_6 = X_1X_3 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 + 12,4 - 12,4 - 12,2 + 12,6 - 12,6 + 12,8 + 12,8 - 12,8 + 12,8 - 12,4 - 12,8 + 12,4 - 13 + 12,8 = -12,2 / 16 = -0,76$$

$$b_7 = X_1X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 + 12,4 - 12,4 + 12,2 - 12,6 + 12,6 - 12,8 + 12,8 - 12,8 + 12,8 - 12,4 + 12,8 - 12,4 + 13 - 12,8 = -14,2 / 16 = -0,89$$

$$b_8 = X_2 X_3 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 - 12,4 - 12,4 - 12,2 - 12,6 + 12,6 + 12,8 + 12,8 + 12,8 - 12,8 - 12,4 - 12,8 - 12,4 + 13 + 12,8 = -10,6/16 = -0,66$$

$$b_9 = X_2 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 - 12,4 - 12,4 + 12,2 + 12,6 - 12,6 - 12,8 - 12,8 - 12,8 + 12,8 + 12,4 - 12,8 - 12,4 + 13 + 12,8 = -12,6/16 = -0,79$$

$$b_{10} = X_3 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 + 12,4 + 12,4 - 12,2 - 12,6 - 12,6 - 12,8 - 12,8 - 12,8 - 12,8 - 12,4 + 12,8 + 12,4 + 13 + 12,8 = -12,6/16 = -0,79$$

$$b_{11} = X_1 X_2 X_3 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 - 12,4 + 12,4 - 12,2 + 12,6 + 12,6 - 12,8 + 12,8 - 12,8 - 12,8 + 12,4 - 12,8 + 12,4 + 13 - 12,8 = 12,6/16 = 0,79$$

$$b_{12} = X_1 X_2 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 - 12,4 - 12,4 - 12,2 - 12,6 + 12,6 + 12,8 - 12,8 - 12,8 - 12,8 + 12,8 + 12,4 + 12,8 + 12,4 - 13 - 12,8 = 13/16 = 0,81$$

$$b_{13} = X_1 X_3 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 - 12,4 + 12,4 + 12,2 - 12,6 - 12,6 + 12,8 - 12,8 + 12,8 + 12,8 - 12,4 - 12,8 + 12,4 + 13 - 12,8 = 13/16 = 0,81$$

$$b_{14} = X_2 X_3 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 + 12,4 - 12,4 - 12,2 + 12,6 - 12,6 + 12,8 - 12,8 + 12,8 - 12,8 + 12,4 + 12,8 - 12,4 + 13 - 12,8 = 13,8/16 = 0,86$$

$$b_{15} = X_1 X_2 X_3 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 - 12,4 + 12,4 - 12,2 + 12,6 + 12,6 - 12,8 - 12,8 + 12,8 + 12,8 - 12,4 + 12,8 - 12,4 - 13 + 12,8 = -11,8/16 = -0,73$$

Таким образом уравнение регрессии примет вид:

$$Y = 11,84 + 0,84x_1 + 0,79x_2 + 0,79x_3 + 0,71x_4 - 0,81x_1x_2 - 0,76x_1x_3 - 0,89x_1x_4 - 0,66x_2x_3 - 0,79x_2x_4 - 0,79x_3x_4 + 0,79x_1x_2x_3 + 0,81x_1x_2x_4 + 0,81x_1x_3x_4 + 0,86x_2x_3x_4 - 0,73x_1x_2x_3x_4$$

Оценим значимость коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента

Найдем дисперсию воспроизводимости S_j^2 по формуле:

$$S_{\{y\}}^2 = \frac{1}{n \cdot (m-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_j)^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_j)^2 \right) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S_j^2, \quad (5.3)$$

В этом уравнении внутренние суммы S_j^2 являются выборочными дисперсиями результатов опытов для j -го эксперимента ($j=1, \dots, 16$). Рассчитаем выборочные дисперсии.

Таблица 5.3

Расчет выборочных дисперсий

j	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y _{jcp}	(Y _{j1} - Y _{jcp}) ²	(Y _{j2} - Y _{jcp}) ²	(Y _{j3} - Y _{jcp}) ²	(Y _{j4} - Y _{jcp}) ²	(Y _{j5} - Y _{jcp}) ²	S _j ²
1	14	13	11	12	14	12,8	1,44	0,04	3,24	0,64	1,44	1,7
2	13	13	14	12	11	12,6	0,16	0,16	1,96	0,36	2,56	1,3
3	11	12	13	12	14	12,4	1,96	0,16	0,36	0,16	2,56	1,3
4	12	14	12	13	11	12,4	0,16	2,56	0,16	0,36	1,96	1,3
5	11	11	14	12	13	12,2	1,44	1,44	3,24	0,04	0,64	1,7
6	14	14	11	12	12	12,6	1,96	1,96	2,56	0,36	0,36	1,8
7	13	14	11	13	12	12,6	0,16	1,96	2,56	0,16	0,36	1,3
8	14	11	14	12	13	12,8	1,44	3,24	1,44	0,64	0,04	1,7
9	13	12	14	11	14	12,8	0,04	0,64	1,44	3,24	1,44	1,7
10	12	14	11	13	14	12,8	0,64	1,44	3,24	0,04	1,44	1,7
11	14	11	12	14	13	12,8	1,44	3,24	0,64	1,44	0,04	1,7
12	11	13	12	14	12	12,4	1,96	0,36	0,16	2,56	0,16	1,3
13	14	13	14	11	12	12,8	1,44	0,04	1,44	3,24	0,64	1,7
14	12	13	13	13	11	12,4	0,16	0,36	0,36	0,36	1,96	0,8
15	13	13	11	14	14	13	0	0	4	1	1	1,5
16	12	11	14	13	14	12,8	0,64	3,24	1,44	0,04	1,44	1,7

Суммируя элементы последнего столбца таблицы получаем:

$$\sum_{j=1}^{16} S_j^2 = 24,2$$

Дисперсия воспроизводимости будет равна:

$$S^2_{\{y\}} = 1/16 \sum_{j=1}^{16} S_j^2 = 1/16 \cdot 24,2 = 1,51$$

Определяем среднее квадратическое отклонение коэффициентов:

$$S_{\text{коэф}} = \sqrt{\frac{S^2_{\{y\}}}{n \cdot m}} = \sqrt{\frac{1,51}{16 \cdot 5}} = 0,137$$

Из таблицы распределения Стьюдента по числу степеней свободы $n(m-1) = 16 \cdot (5-1) = 64$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ находим $t_{\text{кр}} = 2,00$.

Отсюда $t_{\text{кр}} \cdot S_{\text{коэф}} = 2,00 \cdot 0,137 = 0,274$

Сравниваем полученное значение с коэффициентами уравнения регрессии

Таблица 5.4

Коэффициенты регрессии

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{23}	b_{24}	b_{34}	b_{123}	b_{234}	b_{124}	b_{134}	b_{1234}
11,84	0,84	0,79	0,79	0,71	-	-	-	-	-	-	0,79	0,81	0,81	0,86	-
					0,81	0,76	0,89	0,66	0,79	0,79					0,73

Видно, что все коэффициенты больше по абсолютной величине, чем 0,274. Следовательно, все коэффициенты уравнения значимы. Таким образом, уравнение регрессии окончательно будет иметь тот же вид, что и приведен ранее.

Проведем исследование уравнения на адекватность по критерию Фишера. Для вычисления расчетного значения критерия $F_{\text{расч}}$ необходимо вычислить остаточную дисперсию $S^2_{\text{ост}}$. Для этого найдем значения изучаемого параметра по полученному уравнению регрессии \hat{y}_j ($j = \underline{1, \dots, 16}$) подставляем +1 или -1 вместо x_i в соответствии с номером j эксперимента из таблицы

$$\hat{y}_1 = 11,84 + 0,84 + 0,79 + 0,79 + 0,71 - 0,81 - 0,76 - 0,89 - 0,66 - 0,79 - 0,79 + 0,79 + 0,81 + 0,81 + 0,86 - 0,73 = 12,81$$

$$\hat{y}_2 = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79 + 0,79 + 0,71 - 0,81(-1) - 0,76(-1) - 0,89(-1) - 0,66 - 0,79 - 0,79 + 0,79(-1) + 0,81 + 0,81(-1) + 0,86(-1) - 0,73(-1) = 13,91$$

$$\tilde{y}_3 = 11,84 + 0,84 + 0,79(-1) + 0,79 + 0,71 - 0,81(-1) - 0,76 - 0,89 - 0,66(-1) - 0,79(-1) - 0,79 + 0,79(-1) + 0,81(-1) + 0,81(-1) + 0,86 - 0,73(-1) = 12,39$$

$$\tilde{y}_4 = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79(-1) + 0,79 + 0,71 - 0,81 - 0,76(-1) - 0,89(-1) - 0,66(-1) - 0,79(-1) - 0,79 + 0,79 + 0,81(-1) + 0,81 + 0,86(-1) - 0,73 = 12,41$$

$$\tilde{y}_5 = 11,84 + 0,84 + 0,79 + 0,79(-1) + 0,71 - 0,81 - 0,76(-1) - 0,89 - 0,66(-1) - 0,79 - 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,81(-1) + 0,81 + 0,86(-1) - 0,73(-1) = 12,19$$

$$\tilde{y}_6 = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79 + 0,79(-1) + 0,71 - 0,81(-1) - 0,76 - 0,89(-1) - 0,66(-1) - 0,79 - 0,79(-1) + 0,79 + 0,81(-1) + 0,81(-1) + 0,86 - 0,73 = 12,61$$

$$\tilde{y}_7 = 11,84 + 0,84 + 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,71 - 0,81(-1) - 0,76(-1) - 0,89 - 0,66 - 0,79(-1) - 0,79(-1) + 0,79 + 0,81 + 0,81(-1) + 0,86(-1) - 0,73 = 12,61$$

$$\tilde{y}_8 = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,71 - 0,81 - 0,76 - 0,89(-1) - 0,66 - 0,79(-1) - 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,81 + 0,81 + 0,86 - 0,73(-1) = 12,79$$

$$\tilde{y}_9 = 11,84 + 0,84 + 0,79 + 0,79 + 0,71(-1) - 0,81 - 0,76 - 0,89(-1) - 0,66 - 0,79(-1) - 0,79(-1) + 0,79 + 0,81(-1) + 0,81(-1) + 0,86(-1) - 0,73(-1) = 12,83$$

$$\tilde{y}_{10} = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79 + 0,79 + 0,71(-1) - 0,81(-1) - 0,76(-1) - 0,89 - 0,66 - 0,79(-1) - 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,81(-1) + 0,81 + 0,86 - 0,73 = 12,81$$

$$\tilde{y}_{11} = 11,84 + 0,84 + 0,79(-1) + 0,79 + 0,71(-1) - 0,81(-1) - 0,76 - 0,89(-1) - 0,66(-1) - 0,79 - 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,81 + 0,81 + 0,86(-1) - 0,73 = 12,81$$

$$\tilde{y}_{12} = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79(-1) + 0,79 + 0,71(-1) - 0,81 - 0,76(-1) - 0,89 - 0,66(-1) - 0,79 - 0,79(-1) + 0,79 + 0,81 + 0,81(-1) + 0,86 - 0,73(-1) = 12,39$$

$$\tilde{y}_{13} = 11,84 + 0,84 + 0,79 + 0,79(-1) + 0,71(-1) - 0,81 - 0,76(-1) - 0,89(-1) - 0,66(-1) - 0,79(-1) - 0,79 + 0,79(-1) + 0,81 + 0,81(-1) + 0,86 - 0,73 = 13,60$$

$$\tilde{y}_{14} = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79 + 0,79(-1) + 0,71(-1) - 0,81(-1) - 0,76 - 0,89 - 0,66(-1) - 0,79(-1) - 0,79 + 0,79 + 0,81 + 0,81 + 0,86(-1) - 0,73(-1) = 12,39$$

$$\tilde{y}_{15} = 11,84 + 0,84 + 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,71(-1) - 0,81(-1) - 0,76(-1) - 0,89(-1) - 0,66 - 0,79 - 0,79 + 0,79 + 0,81(-1) + 0,81 + 0,86 - 0,73(-1) = 12,99$$

$$\tilde{y}_{16} = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,71(-1) - 0,81 - 0,76 - 0,89 - 0,66 - 0,79 - 0,79 + 0,79(-1) + 0,81(-1) + 0,81(-1) + 0,86(-1) - 0,73 = 12,76$$

Остаточную дисперсию $S^2_{ост}$ вычисляем по формуле:

$$S^2_{ост} = \frac{m}{n-r} \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - \bar{y}_j)^2, \text{ где} \quad (5.4)$$

n – число экспериментов;

m – число опытов в каждом эксперименте;

r – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии;

\tilde{y}_j – значение изучаемого параметра, вычисленное по уравнению регрессии со значимыми коэффициентами для j -ого эксперимента;

\bar{y}_{jcp} – среднее выборочное значение наблюдений для j -ого эксперимента

$$S^2_{ост} = (12,81-12,8)^2+(13,91-12,6)^2+(12,39-12,4)^2+(12,41-12,4)^2+(12,19-12,2)^2+(12,61-12,6)^2+(12,61-12,6)^2+(12,79-12,8)^2+(12,83-12,8)^2+(12,81-12,8)^2+(12,81-12,8)^2+(12,39-12,4)^2+(13,60-12,8)^2+(12,39-12,4)^2+(12,99-13)^2+(12,76-12,8)^2 = 2,3582$$

Расчетное значение критерия Фишера $F_{расч}$ определим по формуле:

$$F_{расч} = \frac{S^2_{ост}}{S^2_{\{y\}}} \quad (5.5)$$

$$F_{расч} = 2,3582/1,51 = 1,56$$

Табличное значение критерия Фишера находим по таблице критических точек распределения Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и по соответствующим степеням свободы $k_1 = 1$ $k_2 = 64$. $F_{табл} = 3,98$, так как $F_{расч} < F_{табл}$, то уравнение регрессии адекватно. Проведем интерпретацию полученных коэффициентов регрессии:

$$Y = 11,84 + 0,84x_1 + 0,79x_2 + 0,79x_3 + 0,71x_4 - 0,81x_1x_2 - 0,76x_1x_3 - 0,89x_1x_4 - 0,66x_2x_3 - 0,79x_2x_4 - 0,79x_3x_4 + 0,79x_1x_2x_3 + 0,81x_1x_2x_4 + 0,81x_1x_3x_4 + 0,86x_2x_3x_4 - 0,73x_1x_2x_3x_4$$

По уравнению видно, что наибольшее сильное влияние оказывают сочетание факторов x_1x_4 – плотность тока и рН электролита, так как они имеют наибольший по абсолютной величине коэффициент

Далее по силе влияния на отклик идет: тройное взаимодействие $x_2x_3x_4$ – время выдержки, температура $t^{\circ}\text{C}$ и рН электролита, а так же тройные взаимодействия $x_1x_2x_4$ и $x_1x_3x_4$ и двойное взаимодействие x_1x_2 – остальные факторы и их сочетания играют меньшую роль.

Так как все 4 одинарных фактора x_1, x_2, x_3, x_4 положительны, то с увеличением этих факторов растет отклик т.е увеличивается толщина медного покрытия. Коэффициенты при $x_1x_2, x_1x_3, x_1x_4, x_2x_3, x_2x_4, x_3x_4$ отрицательны, это означает, что с уменьшением взаимодействующих факторов значение отклика будет возрастать, а с увеличением – убывать.

5.2 Проведение многофакторного анализа качества никелевого покрытия

Составим обобщенную формулу зависимости. Базовая формула будет иметь вид: $y = f(I, \tau, t, p)$. Составим таблицу факторов и их пределов.

Таблица 5.5

Факторы и их пределы

Факторы	Плотность тока, А/дм ²	Время выдержки, мин	Температура, t°С	pH	Толщина покрытия
Принятое обозначение	I	τ	t	p	σ
Обозначение в МФЭ	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y
Верхний предел (1)	1,0	72	18	5,5	16
Основной уровень (0)	0,8	72	18	5,0	12,5
Нижний предел (-1)	0,6	72	18	4,5	9

Составим полную матрицу для проведения четырехфакторного эксперимента

Таблица 5.6

Полная матрица четырехфакторного эксперимента

№	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₁ x ₄	x ₂ x ₃	x ₂ x ₄	x ₃ x ₄	x ₁ x ₂ x ₃	x ₂ x ₃ x ₄	x ₁ x ₂ x ₄	x ₁ x ₃ x ₄	x ₁ x ₂ x ₃ x ₄	Результаты опытов					Ср.знач
																	1	2	3	4	5	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	13	14	12	14	12,8
2	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	14	13	14	12	11	12,8
3	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	12	12	13	13	14	12,8
4	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	12	14	12	13	11	12,4
5	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	11	11	14	12	13	12,2
6	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	14	14	12	12	12	12,8
7	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	13	14	11	13	12	12,6
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	14	11	14	12	13	12,8
9	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	13	12	14	11	14	12,8
10	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	12	14	11	13	14	12,8
11	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	14	11	11	11	13	12
12	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	11	13	12	14	12	12,4
13	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	14	13	14	11	12	12,8
14	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	12	13	13	13	11	12,4
15	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	13	13	11	14	14	13
16	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	12	11	14	13	14	12,8

Определим коэффициенты регрессии уравнения, представленного в общем виде:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4 + b_{123}X_1X_2X_3 + b_{234}X_2X_3X_4 + b_{124}X_1X_2X_4 + b_{134}X_1X_3X_4 + b_{1234}X_1X_2X_3X_4 \quad (5.6)$$

Произведем расчеты коэффициентов регрессии используя среднее значение Y (результат 5 измерений) и матрицу коэффициентов варьирования факторов. Полученные результаты суммы произведений, являются коэффициентами уравнения.

$$b_0 = X_0 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 + 13,4 + 13 + 12,8 + 12,6 + 13,8 + 13,2 + 13,8 + 12,2 + 12,6 + 11,4 + 13,4 + 13,2 + 13,2 + 13 = 207/16 = 11,83$$

$$1,4 + 13,4 + 13,2 + 13,2 + 13 = 207/16 = 11,83$$

$$b_1 = X_1 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 + 13,4 - 13 + 12,8 - 12,6 + 13,8 - 13,2 + 13,8 - 12,2 + 12,6 - 11,4 + 13,4 - 13,2 + 13,2 - 13 = 4,6/16 = 0,78$$

$$11,4 + 13,4 - 13,2 + 13,2 - 13 = 4,6/16 = 0,78$$

$$b_2 = X_2 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 - 13,4 - 13 + 12,8 + 12,6 - 13,8 - 13,2 + 13,8 + 12,2 - 12,6 - 11,4 + 13,4 + 13,2 - 13,2 - 13 = -0,2/16 = 0,84$$

$$11,4 + 13,4 + 13,2 - 13,2 - 13 = -0,2/16 = 0,84$$

$$b_3 = X_3 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 + 13,4 + 13 - 12,8 - 12,6 - 13,8 - 13,2 + 13,8 + 12,2 + 12,6 + 11,4 - 13,4 - 13,2 - 13,2 - 13 = -3,4/16 = 0,76$$

$$13,2 + 13,8 + 12,2 + 12,6 + 11,4 - 13,4 - 13,2 - 13,2 - 13 = -3,4/16 = 0,76$$

$$b_4 = X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 + 13,4 + 13 + 12,8 + 12,6 + 13,8 + 13,2 - 13,8 - 12,2 - 12,6 - 11,4 - 13,4 - 13,2 - 13,2 - 13 = 1,4/16 = 0,81$$

$$11,4 - 13,4 - 13,2 - 13,2 - 13 = 1,4/16 = 0,81$$

$$b_5 = X_1X_2 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 - 13,4 + 13 + 12,8 - 12,6 - 13,8 + 13,2 + 13,8 - 12,2 - 12,6 + 11,4 + 13,4 - 13,2 - 13,2 + 13 = -0,2/16 = -0,81$$

$$12,6 + 11,4 + 13,4 - 13,2 - 13,2 + 13 = -0,2/16 = -0,81$$

$$b_6 = X_1X_3 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 + 13,4 - 13 - 12,8 + 12,6 - 13,8 + 13,2 + 13,8 - 12,2 + 12,6 - 11,4 - 13,4 + 13,2 - 13,2 + 13 = 2,2/16 = -0,79$$

$$11,4 - 13,4 + 13,2 - 13,2 + 13 = 2,2/16 = -0,79$$

$$b_7 = X_1X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 + 13,4 - 13 + 12,8 - 12,6 + 13,8 - 13,2 + 13,8 - 12,2 + 12,6 - 11,4 + 13,4 - 13,2 + 13,2 - 13 = -1,8/16 = -0,84$$

$$11,4 + 13,4 - 13,2 + 13,2 - 13 = -1,8/16 = -0,84$$

$$b_8 = X_2 X_3 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 - 13,4 - 13 - 12,8 - 12,6 + 13,8 + 13,2 + 13,8 + 12,2 - 12,6 - 11,4 - 13,4 - 13,2 + 13,2 + 13 = 2,2/16 = -0,64$$

$$b_9 = X_2 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 - 13,4 - 13 + 12,8 + 12,6 - 13,8 - 13,2 - 13,8 - 12,2 + 12,6 + 11,4 - 13,4 - 13,2 + 13,2 + 13 = -5/16 = -0,84$$

$$b_{10} = X_3 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 + 13,4 + 13 - 12,8 - 12,6 - 13,8 - 13,2 - 13,8 - 12,2 - 12,6 - 11,4 + 13,4 + 13,2 + 13,2 + 13 = 2,2/16 = -,071$$

$$b_{11} = X_1 X_2 X_3 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 - 13,4 + 13 - 12,8 + 12,6 + 13,8 - 13,2 + 13,8 - 12,2 - 12,6 + 11,4 - 13,4 + 13,2 + 13,2 - 13 = 0,6/16 = 0,81$$

$$b_{12} = X_1 X_2 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 + 12,6 - 13,4 - 13 - 12,8 - 12,6 + 13,8 + 13,2 - 13,8 - 12,2 - 12,6 + 11,4 + 13,4 + 13,2 - 13,2 - 13 = -1/16 = 0,73$$

$$b_{13} = X_1 X_3 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 - 13,4 + 13 + 12,8 - 12,6 - 13,8 + 13,2 - 13,8 + 12,2 + 12,6 - 11,4 - 13,4 + 13,2 + 13,2 - 13 = -1/16 = 0,71$$

$$b_{14} = X_2 X_3 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 + 13,4 - 13 - 12,8 + 12,6 - 13,8 + 13,2 - 13,8 + 12,2 - 12,6 + 11,4 + 13,4 - 13,2 + 13,2 - 13 = -2,6/16 = 0,94$$

$$b_{15} = X_1 X_2 X_3 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 12,8 - 12,6 - 13,4 + 13 - 12,8 + 12,6 + 13,8 - 13,2 - 13,8 + 12,2 + 12,6 - 11,4 + 13,4 - 13,2 - 13,2 + 13 = -0,2/16 = -0,81$$

Таким образом уравнение регрессии примет вид:

$$Y = 11,83 + 0,78x_1 + 0,83x_2 + 0,76x_3 + 0,81x_4 + 0,81x_1x_2 - 0,78x_1x_3 - 0,83x_1x_4 - 0,63x_2x_3 - 0,83x_2x_4 - 0,71x_3x_4 + 0,81x_1x_2x_3 + 0,73x_1x_2x_4 + 0,71x_1x_3x_4 - 0,93x_2x_3x_4 - 0,81x_1x_2x_3x_4$$

Оценим значимость коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента

Рассчитаем выборочные дисперсии.

Таблица 5.7

Расчет выборочных дисперсий

j	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y _{jcp}	(Y _{j1} - Y _{jcp}) ²	(Y _{j2} - Y _{jcp}) ²	(Y _{j3} - Y _{jcp}) ²	(Y _{j4} - Y _{jcp}) ²	(Y _{j5} - Y _{jcp}) ²	S _j ²
1	11	13	14	12	14	12,8	3,24	0,04	1,44	0,64	1,44	1,7
2	14	13	14	12	11	12,8	1,44	0,04	1,44	0,64	3,24	1,7
3	12	12	13	13	14	12,8	0,64	0,64	0,04	0,04	1,44	0,7
4	12	14	12	13	11	12,4	0,16	2,56	0,16	0,36	1,96	1,3
5	11	11	14	12	13	12,2	1,44	1,44	3,24	0,04	0,64	1,7
6	14	14	12	12	12	12,8	1,44	1,44	0,64	0,64	0,64	1,2
7	13	14	11	13	12	12,6	0,16	1,96	2,56	0,16	0,36	1,3
8	14	11	14	12	13	12,8	1,44	3,24	1,44	0,64	0,04	1,7
9	13	12	14	11	14	12,8	0,04	0,64	1,44	3,24	1,44	1,7
10	12	14	11	13	14	12,8	0,64	1,44	3,24	0,04	1,44	1,7
11	14	11	11	11	13	12	4	1	1	1	1	2
12	11	13	12	14	12	12,4	1,96	0,36	0,16	2,56	0,16	1,3
13	14	13	14	11	12	12,8	1,44	0,04	1,44	3,24	0,64	1,7
14	12	13	13	13	11	12,4	0,16	0,36	0,36	0,36	1,96	0,8
15	13	13	11	14	14	13	0	0	4	1	1	1,5
16	12	11	14	13	14	12,8	0,64	3,24	1,44	0,04	1,44	1,7

Суммируем элементы последнего столбца:

$$\sum_{j=1}^{16} S_j^2 = 23,7$$

Дисперсия воспроизводимости будет равна:

$$S^2_{\{y\}} = 1/16 \sum_{j=1}^{16} S_j^2 = 1/16 \cdot 23,7 = 1,48$$

Определяем среднее квадратическое отклонение коэффициентов:

$$S_{\text{коэф}} = \sqrt{\frac{S^2_{\{y\}}}{n \cdot m}} = \sqrt{\frac{1,48}{16 \cdot 5}} = 0,136$$

Из таблицы распределения Стьюдента по числу степеней свободы

$n(m-1) = 16 \cdot (5-1) = 64$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ находим $t_{кр} = 2,00$.

Отсюда $t_{кр} \cdot S_{\text{коэф}} = 2,00 \cdot 0,136 = 0,272$

Сравниваем полученное значение с коэффициентами уравнения регрессии

Таблица 5.8

Коэффициенты регрессии

b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₁₂	b ₁₃	b ₁₄	b ₂₃	b ₂₄	b ₃₄	b ₁₂₃	b ₂₃₄	b ₁₂₄	b ₁₃₄	b ₁₂₃₄
11,84	0,84	0,79	0,79	0,71	-	-	-	-	-	-	0,79	0,81	0,81	0,86	-
					0,81	0,76	0,89	0,66	0,79	0,79					0,73

Видно, что все коэффициенты больше по абсолютной величине, чем 0,272. Следовательно, все коэффициенты уравнения значимы. Таким образом, уравнение регрессии окончательно будет иметь тот же вид, что и приведен ранее.

Проведем исследование уравнения на адекватность по критерию Фишера. Для вычисления расчетного значения критерия $F_{расч}$ необходимо вычислить остаточную дисперсию $S^2_{ост}$. Для этого найдем значения изучаемого параметра по полученному уравнению регрессии \tilde{y}_j ($j = \underline{1}, \dots, 16$) подставляем +1 или -1 вместо x_i в соответствии с номером j эксперимента из таблицы

$$\tilde{y}_1 = 11,84 + 0,84 + 0,79 + 0,79 + 0,71 - 0,81 - 0,76 - 0,89 - 0,66 - 0,79 - 0,79 + 0,79 + 0,81 + 0,81 + 0,86 - 0,73 = 12,81$$

$$\tilde{y}_2 = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79 + 0,79 + 0,71 - 0,81(-1) - 0,76(-1) - 0,89(-1) - 0,66 - 0,79 - 0,79 + 0,79(-1) + 0,81 + 0,81(-1) + 0,86(-1) - 0,73(-1) = 13,91$$

$$\tilde{y}_3 = 11,84 + 0,84 + 0,79(-1) + 0,79 + 0,71 - 0,81(-1) - 0,76 - 0,89 - 0,66(-1) - 0,79(-1) - 0,79 + 0,79(-1) + 0,81(-1) + 0,81(-1) + 0,86 - 0,73(-1) = 12,39$$

$$\tilde{y}_4 = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79(-1) + 0,79 + 0,71 - 0,81 - 0,76(-1) - 0,89(-1) - 0,66(-1) - 0,79(-1) - 0,79 + 0,79 + 0,81(-1) + 0,81 + 0,86(-1) - 0,73 = 12,41$$

$$\tilde{y}_5 = 11,84 + 0,84 + 0,79 + 0,79(-1) + 0,71 - 0,81 - 0,76(-1) - 0,89 - 0,66(-1) - 0,79 - 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,81(-1) + 0,81 + 0,86(-1) - 0,73(-1) = 12,19$$

$$\tilde{y}_6 = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79 + 0,79(-1) + 0,71 - 0,81(-1) - 0,76 - 0,89(-1) - 0,66(-1) - 0,79 - 0,79(-1) + 0,79 + 0,81(-1) + 0,81(-1) + 0,86 - 0,73 = 12,61$$

$$\tilde{y}_7 = 11,84 + 0,84 + 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,71 - 0,81(-1) - 0,76(-1) - 0,89 - 0,66 - 0,79(-1) - 0,79(-1) + 0,79 + 0,81 + 0,81(-1) + 0,86(-1) - 0,73 = 12,61$$

$$\tilde{y}_8 = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,71 - 0,81 - 0,76 - 0,89(-1) - 0,66 - 0,79(-1) - 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,81 + 0,81 + 0,86 - 0,73(-1) = 12,79$$

$$\tilde{y}_9 = 11,84 + 0,84 + 0,79 + 0,79 + 0,71(-1) - 0,81 - 0,76 - 0,89(-1) - 0,66 - 0,79(-1) - 0,79(-1) + 0,79 + 0,81(-1) + 0,81(-1) + 0,86(-1) - 0,73(-1) = 12,83$$

$$\tilde{y}_{10} = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79 + 0,79 + 0,71(-1) - 0,81(-1) - 0,76(-1) - 0,89 - 0,66 - 0,79(-1) - 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,81(-1) + 0,81 + 0,86 - 0,73 = 12,81$$

$$\tilde{y}_{11} = 11,84 + 0,84 + 0,79(-1) + 0,79 + 0,71(-1) - 0,81(-1) - 0,76 - 0,89(-1) - 0,66(-1) - 0,79 - 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,81 + 0,81 + 0,86(-1) - 0,73 = 12,81$$

$$\tilde{y}_{12} = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79(-1) + 0,79 + 0,71(-1) - 0,81 - 0,76(-1) - 0,89 - 0,66(-1) - 0,79 - 0,79(-1) + 0,79 + 0,81 + 0,81(-1) + 0,86 - 0,73(-1) = 12,39$$

$$\tilde{y}_{13} = 11,84 + 0,84 + 0,79 + 0,79(-1) + 0,71(-1) - 0,81 - 0,76(-1) - 0,89(-1) - 0,66(-1) - 0,79(-1) - 0,79 + 0,79(-1) + 0,81 + 0,81(-1) + 0,86 - 0,73 = 13,60$$

$$\tilde{y}_{14} = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79 + 0,79(-1) + 0,71(-1) - 0,81(-1) - 0,76 - 0,89 - 0,66(-1) - 0,79(-1) - 0,79 + 0,79 + 0,81 + 0,81 + 0,86(-1) - 0,73(-1) = 12,39$$

$$\tilde{y}_{15} = 11,84 + 0,84 + 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,71(-1) - 0,81(-1) - 0,76(-1) - 0,89(-1) - 0,66 - 0,79 - 0,79 + 0,79 + 0,81(-1) + 0,81 + 0,86 - 0,73(-1) = 12,99$$

$$\tilde{y}_{16} = 11,84 + 0,84(-1) + 0,79(-1) + 0,79(-1) + 0,71(-1) - 0,81 - 0,76 - 0,89 - 0,66 - 0,79 - 0,79 + 0,79(-1) + 0,81(-1) + 0,81(-1) + 0,86(-1) - 0,73 = 12,76$$

Остаточную дисперсию $S_{\text{ост}}^2$ вычисляем по формуле:

$$S_{\text{ост.}}^2 = \frac{m}{n-r} \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - \bar{y}_j)^2$$

, где

(5.7)

n – число экспериментов;

m – число опытов в каждом эксперименте;

r – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии;

\tilde{y}_j – значение изучаемого параметра, вычисленное по уравнению регрессии со значимыми коэффициентами для j -ого эксперимента;

\bar{Y}_{jcp} – среднее выборочное значение наблюдений для j -ого эксперимента

$$S^2_{ост} = (12,79-12,8)^2+(12,79-12,8)^2+(12,79-12,8)^2+(12,39-12,4)^2+(12,19-12,2)^2+(12,79-12,8)^2+(12,59-12,6)^2+(12,79-12,8)^2+(12,79-12,8)^2+(12,79-12,8)^2+(11,99-12)^2+(12,75-12,4)^2+(12,39-12,8)^2+(12,39-12,4)^2+(12,99-13)^2+(12,77-12,8)^2 = 0,1248$$

Расчетное значение критерия Фишера $F_{расч}$ определим по формуле:

$$F_{расч} = \frac{S^2_{ост}}{S^2_{\{y\}}} \quad (5.8)$$

$$F_{расч} = 0,1248/1,48 = 0,08$$

Табличное значение критерия Фишера находим по таблице критических точек распределения Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и по соответствующим степеням свободы $k_1 = 1$ $k_2 = 64$. $F_{табл} = 3,98$, так как

$F_{расч} < F_{табл}$, то уравнение регрессии адекватно. Проведем интерпретацию полученных коэффициентов регрессии:

$$Y = 11,83 + 0,78x_1 + 0,83x_2 + 0,76x_3 + 0,81x_4 + 0,81x_1x_2 - 0,78x_1x_3 - 0,83x_1x_4 - 0,63x_2x_3 - 0,83x_2x_4 - 0,71x_3x_4 + 0,81x_1x_2x_3 + 0,73x_1x_2x_4 + 0,71x_1x_3x_4 - 0,93x_2x_3x_4 - 0,81x_1x_2x_3x_4$$

По уравнению видно, что наибольшее сильное влияние на толщину покрытия оказывают сочетание факторов $x_2x_3x_4$ – время выдержки электролиза, температура и рН электролита, так как они имеют наибольший по абсолютной величине коэффициент

Далее по силе влияния на отклик идет: фактор x_2 , а так же двойное взаимодействие факторов x_2x_4 . Остальные факторы и их сочетания играют меньшую роль.

Так как все 4 одинарных фактора x_1, x_2, x_3, x_4 положительны, то с увеличением этих факторов растет отклик т.е увеличивается толщина

никелевого покрытия. Коэффициенты при x_1x_3 , x_1x_4 , x_2x_3 , x_2x_4 , x_3x_4 , $x_2x_3x_4$, $x_1x_2x_3x_4$ отрицательны, это означает, что с уменьшением взаимодействующих факторов значение отклика будет возрастать, а с увеличением – убывать.

5.3 Проведение многофакторного анализа качества покрытия олово-висмут

Составим обобщенную формулу зависимости. Базовая формула будет иметь вид: $y = f(I, \tau, t, p)$. Составим таблицу факторов и их пределов.

Таблица 5.9

Факторы и их пределы

Факторы	Плотность тока, А/дм ²	Время выдержки, мин	Температура, t°С	pH	Толщина покрытия
Принятое обозначение	I	τ	t	p	σ
Обозначение в МФЭ	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	Y
Верхний предел (1)	2,0	30	20	2	25
Основной уровень (0)	1,25	30	20	1,5	18
Нижний предел (-1)	0,5	30	20	1	11

Составим полную матрицу для проведения четырехфакторного эксперимента

Таблица 5.10

Полная матрица четырехфакторного эксперимента

№	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₁ x ₄	x ₂ x ₃	x ₂ x ₄	x ₃ x ₄	x ₁ x ₂ x ₃	x ₂ x ₃ x ₄	x ₁ x ₂ x ₄	x ₁ x ₃ x ₄	x ₁ x ₂ x ₃ x ₄	Результаты опытов					
																	1	2	3	4	5	Ср.знач
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12	14	14	12	14	13,2
2	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	16	13	11	12	11	12,6
3	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	12	11	13	13	14	12,6
4	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1	12	13	12	13	11	12,2
5	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	11	11	15	11	13	12,2
6	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	1	14	14	12	12	12	12,8
7	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	11	12	11	13	12	11,8
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	14	11	14	12	13	12,8
9	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	12	12	12	11	14	12,2
10	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	12	14	11	13	14	12,8
11	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	14	11	11	11	13	12
12	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	11	13	11	14	12	12,2
13	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	14	13	11	11	12	12,2
14	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	12	13	13	13	11	12,4
15	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	13	13	11	14	14	13
16	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	12	11	14	13	14	12,8

Определим коэффициенты регрессии уравнения, представленного в общем виде:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4 + b_{123}X_1X_2X_3 + b_{234}X_2X_3X_4 + b_{124}X_1X_2X_4 + b_{134}X_1X_3X_4 + b_{1234}X_1X_2X_3X_4$$

Произведем расчеты коэффициентов регрессии используя среднее значение Y (результат 5 измерений) и матрицу коэффициентов варьирования факторов. Полученные результаты суммы произведений, являются коэффициентами уравнения.

$$b_0 = X_0 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 + 12,6 + 12,6 + 12,2 + 12,2 + 12,8 + 11,8 + 12,8 + 12,2 + 12,8 + 12,2 + 12,2 + 12,4 + 13 + 12,8 = 187/16 = 11,68$$

$$b_1 = X_1 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 - 12,6 + 12,6 - 12,2 + 12,2 - 12,8 + 11,8 - 12,8 + 12,2 - 12,8 + 12,2 + 12,2 - 12,4 + 13 - 12,8 = 11,4/16 = 0,71$$

$$b_2 = X_2 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 + 12,6 - 12,6 - 12,2 + 12,2 + 12,8 - 11,8 - 12,8 + 12,2 + 12,8 - 12,2 + 12,2 + 12,4 - 13 - 12,8 = 13,8/16 = 0,86$$

$$b_3 = X_3 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 + 12,6 + 12,6 + 12,2 - 12,2 - 12,8 - 11,8 - 12,8 + 12,2 + 12,8 + 12,2 - 12,2 - 12,4 - 13 - 12,8 = 12,6/16 = 0,78$$

$$b_4 = X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 + 12,6 + 12,6 + 12,2 + 12,2 + 12,8 + 11,8 + 12,8 - 12,2 - 12,8 - 12,2 - 12,2 - 12,4 - 13 - 12,8 = 13,4/16 = 0,83$$

$$b_5 = X_1X_2 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 - 12,6 - 12,6 + 12,2 + 12,2 - 12,8 - 11,8 + 12,8 + 12,2 - 12,8 - 12,2 + 12,2 - 12,4 - 13 + 12,8 = -13/16 = -0,81$$

$$b_6 = X_1X_3 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 - 12,6 + 12,6 - 12,2 - 12,2 + 12,8 - 11,8 + 12,8 + 12,2 - 12,8 + 12,2 - 12,2 + 12,4 - 13 + 12,8 = -11/16 = -0,68$$

$$b_7 = X_1X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 - 12,6 + 12,6 - 12,2 + 12,2 - 12,8 + 11,8 - 12,8 + 12,2 - 12,8 + 12,2 + 12,2 - 12,4 + 13 - 12,8 = -12,6/16 = -0,78$$

$$b_8 = X_2X_3 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 - 12,6 - 12,6 + 12,2 + 12,2 - 12,8 - 11,8 + 12,8 + 12,2 - 12,8 - 12,2 + 12,2 - 12,4 - 13 + 12,8 = -13/16 = -0,81$$

$$b_9 = X_2X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 + 12,6 - 12,6 - 12,2 + 12,2 + 12,8 + 11,8 + 12,8 - 12,2 - 12,8 - 12,2 - 12,2 - 12,4 - 13 - 12,8 = 13,4/16 = 0,83$$

$$b_{10} = X_3X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 + 12,6 + 12,6 + 12,2 - 12,2 - 12,8 - 11,8 - 12,8 + 12,2 + 12,8 + 12,2 - 12,2 - 12,4 - 13 - 12,8 = 12,6/16 = 0,78$$

$$b_{11} = X_1X_2X_3 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 - 12,6 - 12,6 + 12,2 + 12,2 - 12,8 - 11,8 + 12,8 + 12,2 - 12,8 - 12,2 + 12,2 - 12,4 - 13 + 12,8 = -13/16 = -0,81$$

$$b_{12} = X_1X_2X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 - 12,6 - 12,6 + 12,2 + 12,2 - 12,8 - 11,8 + 12,8 + 12,2 - 12,8 - 12,2 + 12,2 - 12,4 - 13 + 12,8 = -13/16 = -0,81$$

$$b_{13} = X_1X_3X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 - 12,6 + 12,6 - 12,2 - 12,2 + 12,8 - 11,8 + 12,8 + 12,2 - 12,8 + 12,2 - 12,2 + 12,4 - 13 + 12,8 = -11/16 = -0,68$$

$$b_{14} = X_2X_3X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 + 12,6 - 12,6 - 12,2 + 12,2 + 12,8 + 11,8 + 12,8 - 12,2 - 12,8 - 12,2 + 12,2 - 12,4 - 13 + 12,8 = 13,4/16 = 0,83$$

$$b_{15} = X_1X_2X_3X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 - 12,6 - 12,6 + 12,2 + 12,2 - 12,8 - 11,8 + 12,8 + 12,2 - 12,8 - 12,2 + 12,2 - 12,4 - 13 + 12,8 = -13/16 = -0,81$$

$$b_8 = X_2 X_3 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 + 12,6 - 12,6 - 12,2 - 12,2 - 12,8 + 11,8 + 12,8 + 12,2 + 12,8 - 12,2 - 12,2 - 12,4 + 13 + 12,8 = -10,2/16 = -0,63$$

$$b_9 = X_2 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 + 12,6 - 12,6 - 12,2 + 12,2 + 12,8 - 11,8 - 12,8 - 12,2 - 12,8 + 12 + 12,2 - 12,2 - 12,4 + 13 + 12,8 = -11/16 = -0,68$$

$$b_{10} = X_3 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 + 12,6 + 12,6 + 12,2 - 12,2 - 12,8 - 11,8 - 12,8 - 12,2 - 12,8 - 12,2 + 12,2 + 12,4 + 13 + 12,8 = -10,6/16 = -0,66$$

$$b_{11} = X_1 X_2 X_3 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 - 12,6 - 12,6 + 12,2 - 12,2 + 12,8 + 11,8 - 12,8 + 12,2 - 12,8 - 12 + 12,2 - 12,2 + 12,4 + 13 - 12,8 = 12,6/16 = 0,78$$

$$b_{12} = X_1 X_2 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 + 12,6 - 12,6 - 12,2 - 12,2 - 12,8 + 11,8 + 12,8 - 12,2 - 12,8 - 12 + 12,2 + 12,2 + 12,4 - 13 - 12,8 = 11,4/16 = 0,71$$

$$b_{13} = X_1 X_3 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 - 12,6 - 12,6 + 12,2 + 12,2 - 12,8 - 11,8 + 12,8 - 12,2 + 12,8 + 12 - 12,2 - 12,2 + 12,4 + 13 - 12,8 = 14,2/16 = 0,88$$

$$b_{14} = X_2 X_3 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 - 12,6 + 12,6 - 12,2 - 12,2 + 12,8 - 11,8 + 12,8 - 12,2 + 12,8 - 12 + 12,2 + 12,2 - 12,4 + 13 - 12,8 = 16,2/16 = 1,01$$

$$b_{15} = X_1 X_2 X_3 X_4 = \sum_{k=1}^{k=16} x = 13,2 - 12,6 - 12,6 + 12,2 - 12,2 + 12,8 + 11,8 - 12,8 - 12,2 + 12,8 + 12 - 12,2 + 12,2 - 12,4 - 13 + 12,8 = -13/16 = -0,81$$

Таким образом уравнение регрессии примет вид:

$$Y = 11,68 + 0,71x_1 + 0,86x_2 + 0,78x_3 + 0,83x_4 - 0,81x_1x_2 - 0,68x_1x_3 - 0,78x_1x_4 - 0,63x_2x_3 - 0,68x_2x_4 - 0,66x_3x_4 + 0,78x_1x_2x_3 + 0,71x_1x_2x_4 + 0,88x_1x_3x_4 + 1,01x_2x_3x_4 - 0,81x_1x_2x_3x_4$$

Оценим значимость коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента

Рассчитаем выборочные дисперсии.

Таблица 5.11

Расчет выборочных дисперсий

j	Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y _{jcp}	(Y _{j1} - Y _{jcp}) ²	(Y _{j2} - Y _{jcp}) ²	(Y _{j3} - Y _{jcp}) ²	(Y _{j4} - Y _{jcp}) ²	(Y _{j5} - Y _{jcp}) ²	S _j ²
1	12	14	14	12	14	13,2	1,44	0,64	0,64	1,44	0,64	1,2
2	16	13	11	12	11	12,6	11,56	0,16	2,56	0,36	2,56	4,3
3	12	11	13	13	14	12,6	0,36	2,56	0,16	0,16	1,96	1,3
4	12	13	12	13	11	12,2	0,04	0,64	0,04	0,64	1,44	0,7
5	11	11	15	11	13	12,2	1,44	1,44	7,84	1,44	0,64	3,2
6	14	14	12	12	12	12,8	1,44	1,44	0,64	0,64	0,64	1,2
7	11	12	11	13	12	11,8	0,64	0,04	0,64	1,44	0,04	0,7
8	14	11	14	12	13	12,8	1,44	3,24	1,44	0,64	0,04	1,7
9	12	12	12	11	14	12,2	0,04	0,04	0,04	1,44	3,24	1,2
10	12	14	11	13	14	12,8	0,64	1,44	3,24	0,04	1,44	1,7
11	14	11	11	11	13	12	4	1	1	1	1	2
12	11	13	11	14	12	12,2	1,44	0,64	1,44	3,24	0,04	1,7
13	14	13	11	11	12	12,2	3,24	0,64	1,44	1,44	0,04	1,7
14	12	13	13	13	11	12,4	0,16	0,36	0,36	0,36	1,96	0,8
15	13	13	11	14	14	13	0	0	4	1	1	1,5
16	12	11	14	13	14	12,8	0,64	3,24	1,44	0,04	1,44	1,7

Суммируем элементы последнего столбца:

$$\sum_{j=1}^{16} S_j^2 = 26,6$$

Дисперсия воспроизводимости будет равна:

$$S^2_{\{y\}} = 1/16 \sum_{j=1}^{16} S_j^2 = 1/16 \cdot 26,6 = 1,66$$

Определяем среднее квадратическое отклонение коэффициентов:

$$S_{\text{коэф}} = \sqrt{\frac{S^2_{\{y\}}}{n \cdot m}} = \sqrt{\frac{1,66}{16 \cdot 5}} = 0,144$$

Из таблицы распределения Стьюдента по числу степеней свободы $n(m-1) = 16 \cdot (5-1) = 64$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ находим $t_{\text{кр}} = 2,00$.

Отсюда $t_{\text{кр}} \cdot S_{\text{коэф}} = 2,00 \cdot 0,144 = 0,288$

Сравниваем полученное значение с коэффициентами уравнения регрессии

Таблица 5.12

Коэффициенты регрессии

b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₁₂	b ₁₃	b ₁₄	b ₂₃	b ₂₄	b ₃₄	b ₁₂₃	b ₂₃₄	b ₁₂₄	b ₁₃₄	b ₁₂₃₄
11,83	0,78	0,83	0,76	0,81	-	-	-	-	-	-	0,81	0,73	0,71	0,93	-
					0,81	0,78	0,83	0,63	0,83	0,71					0,81

Видно, что все коэффициенты больше по абсолютной величине, чем 0,288. Следовательно, все коэффициенты уравнения значимы. Таким образом, уравнение регрессии окончательно будет иметь тот же вид, что и приведен ранее.

Проведем исследование уравнения на адекватность по критерию Фишера. Для вычисления расчетного значения критерия $F_{\text{расч}}$ необходимо вычислить остаточную дисперсию $S^2_{\text{ост}}$. Для этого найдем значения изучаемого параметра по полученному уравнению регрессии \hat{y}_j ($j = \underline{1, \dots, 16}$) подставляем +1 или -1 вместо x_i в соответствии с номером j эксперимента из таблицы

$$\tilde{y}_1=11,83+0,78+0,83+0,76+0,81-0,81-0,78-0,83-0,63-0,83-0,71+0,81+0,73+0,71+0,93-0,81 = 12,79$$

$$\tilde{y}_2=11,83+0,78(-1)+0,83+0,76+0,81-0,81(-1)-0,78(-1)-0,83(-1)-0,63-0,83-0,71+0,81(-1)+0,73+0,71(-1)+0,93(-1)-0,81(-1) = 12,79$$

$$\tilde{y}_3=11,83+0,78+0,83(-1)+0,76+0,81-0,81(-1)-0,78-0,83-0,63(-1)-0,83(-1)-0,71+0,81(-1)+0,73(-1)+0,71(-1)+0,93-0,81(-1) = 12,79$$

$$\tilde{y}_4=11,83+0,78(-1)+0,83(-1)+0,76+0,81-0,81-0,78(-1)-0,83(-1)-0,63(-1)-0,83(-1)-0,71+0,81+0,73(-1)+0,71+0,93(-1)-0,81 = 12,39$$

$$\tilde{y}_5=11,83+0,78+0,83+0,76(-1)+0,81-0,81-0,78(-1)-0,83-0,63(-1)-0,83-0,71(-1)+0,81(-1)+0,73(-1)+0,71+0,93(-1)-0,81(-1) = 12,19$$

$$\tilde{y}_6=11,83+0,78(-1)+0,83+0,76(-1)+0,81-0,81(-1)-0,78-0,83(-1)-0,63(-1)-0,83-0,71(-1)+0,81+0,73(-1)+0,71(-1)+0,93-0,81 = 12,79$$

$$\tilde{y}_7=11,83+0,78+0,83(-1)+0,76(-1)+0,81-0,81(-1)-0,78(-1)-0,83-0,63-0,83(-1)-0,71(-1)+0,81+0,73+0,71(-1)+0,93(-1)-0,81 = 12,59$$

$$\tilde{y}_8=11,83+0,78(-1)+0,83(-1)+0,76(-1)+0,81-0,81-0,78-0,83(-1)-0,63-0,83(-1)-0,71(-1)+0,81(-1)+0,73+0,71+0,93-0,81(-1) = 12,79$$

$$\tilde{y}_9=11,83+0,78+0,83+0,76+0,81(-1)-0,81-0,78-0,83(-1)-0,63-0,83(-1)-0,71(-1)+0,81+0,73(-1)+0,71(-1)+0,93(-1)-0,81(-1) = 12,79$$

$$\tilde{y}_{10}=11,83+0,78(-1)+0,83+0,76+0,81(-1)-0,81(-1)-0,78(-1)-0,83-0,63-0,83(-1)-0,71(-1)+0,81(-1)+0,73(-1)+0,71+0,93-0,81 = 12,79$$

$$\tilde{y}_{11}=11,83+0,78+0,83(-1)+0,76+0,81(-1)-0,81(-1)-0,78-0,83(-1)-0,63(-1)-0,83-0,71(-1)+0,81(-1)+0,73+0,71+0,93(-1)-0,81 = 11,99$$

$$\tilde{y}_{12}=11,83+0,78(-1)+0,83(-1)+0,76+0,81(-1)-0,81-0,78(-1)-0,83-0,63(-1)-0,83-0,71(-1)+0,81+0,73+0,71(-1)+0,93-0,81(-1) = 12,39$$

$$\tilde{y}_{13}=11,83+0,78+0,83+0,76(-1)+0,81(-1)-0,81-0,78(-1)-0,83(-1)-0,63(-1)-0,83(-1)-0,71+0,81(-1)+0,73+0,71(-1)+0,93-0,81 = 12,75$$

$$\tilde{y}_{14}=11,83+0,78(-1)+0,83+0,76(-1)+0,81(-1)-0,81(-1)-0,78-0,83-0,63(-1)-0,83(-1)-0,71+0,81+0,73+0,71+0,93(-1)-0,81(-1) = 12,39$$

$$\tilde{y}_{15}=11,83+0,78+0,83(-1)+0,76(-1)+0,81(-1)-0,81(-1)-0,78(-1)-0,83(-1)-0,63-0,83-0,71+0,81+0,73(-1)+0,71+0,93-0,81(-1) = 12,99$$

$$\tilde{y}_{16}=11,83+0,78(-1)+0,83(-1)+0,76(-1)+0,81(-1)-0,81-0,78-0,83-0,63-0,83-0,71+0,81(-1)+0,73(-1)+0,71(-1)+0,93(-1)-0,81 = 12,77$$

Остаточную дисперсию $S^2_{ост}$ вычисляем по формуле:

$$S^2_{ост} = \frac{m}{n-r} \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - \bar{y}_j)^2$$

, где (5.9)

n – число экспериментов;

m – число опытов в каждом эксперименте;

r – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии;

\tilde{y}_j - значение изучаемого параметра, вычисленное по уравнению регрессии со значимыми коэффициентами для j -ого эксперимента;

\bar{y}_j - среднее выборочное значение наблюдений для j -ого эксперимента

$$S^2_{ост} = (13,2-13,19)^2+(12,6-12,59)^2+(12,6-12,59)^2+(12,2-12,15)^2+(12,2-12,19)^2+(12,8-12,79)^2+(11,8-11,79)^2+(12,8-12,79)^2+(12,2-12,19)^2+(12,8-12,79)^2+(12-11,99)^2+(12,2-12,19)^2+(12,2-12,19)^2+(12,4-12,39)^2+(13-12,99)^2+(12,8-12,79)^2 = 0,0040$$

Расчетное значение критерия Фишера $F_{расч}$ определим по формуле:

$$F_{расч} = \frac{S^2_{ост}}{S^2_{\{y\}}}$$

(5.10)

$$F_{расч} = 0,0040/1,66 = 0,002$$

Табличное значение критерия Фишера находим по таблице критических точек распределения Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и по соответствующим степеням свободы $k_1 = 1$ $k_2 = 64$. $F_{\text{табл}} = 3,98$, так как $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, то уравнение регрессии адекватно. Проведем интерпретацию полученных коэффициентов регрессии:

$$Y = 11,68 + 0,71x_1 + 0,86x_2 + 0,78x_3 + 0,83x_4 - 0,81x_1x_2 - 0,68x_1x_3 - 0,78x_1x_4 - 0,63x_2x_3 - 0,68x_2x_4 - 0,66x_3x_4 + 0,78x_1x_2x_3 + 0,71x_1x_2x_4 + 0,88x_1x_3x_4 + 1,01x_2x_3x_4 - 0,81x_1x_2x_3x_4$$

По уравнению видно, что наибольшее сильное влияние на толщину покрытия оказывают сочетание факторов $x_2x_3x_4$ – время выдержки электролиза, температура и рН, так как они имеют наибольший по абсолютной величине коэффициент

Далее по силе влияния на отклик идет: тройное взаимодействие факторов $x_1x_3x_4$ – плотность тока, температура и рН электролита, а так же одинарный фактор x_2 . Остальные факторы и их сочетания играют меньшую роль.

Так как все 4 одинарных фактора x_1, x_2, x_3, x_4 положительны, то с увеличением этих факторов растет отклик т.е увеличивается толщина никелевого покрытия. Коэффициенты при $x_1x_2, x_1x_3, x_1x_4, x_2x_3, x_2x_4, x_3x_4, x_1x_2x_3x_4$ – отрицательны, это означает, что с уменьшением взаимодействующих факторов значение отклика будет возрастать, а с увеличением – убывать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была произведена разработка проекта нового электрохимического производства (линия по получению гальванических покрытий медь – никель – олово-висмут на алюминии и его сплавах) в рамках действующего производства, разработан проект и составлено техническое задание на организации нового участка в рамках действующего производства применены мат. методы оценки качества получаемых покрытий и произведена математическая оценка необходимого количества запасов изделия на складе.

Приведены методики анализа медного пиррофосфатного электролита, сернокислого никелевого электролита и серно-кислого электролита олово-висмут. Методика анализа каждого электролита содержит состав анализируемого электролита, описание хода анализа и количественный расчет составляющих. Используются такие методы как трилометрический, алкалометрический, аргентометрический и колориметрические методы.

В связи с поставленными задачами были получены следующие результаты

1. Был произведен выбор и оптимизация параметров технологии нанесения нового комплекса покрытия. Из литературных источников был произведен выбор и обоснование выбора электролитов для меднения, никелирования и покрытия олово-висмут. Так же из литературных источников были выбраны рекомендуемые режимы осаждения, далее происходила корректировка режимов в зависимости от качества получаемых покрытий, в качестве показателя качества выступала толщина покрытия.
2. Был произведен выбор и расчет параметров оборудования;
3. Произведены Расчеты материального баланса различных технологических операций. Были произведены: расчеты производственной программы линий меднения, никелирования и олово-висмут, расчеты процессов, расчеты материальных балансов операций, расчет расхода химикатов, расчет годового расхода воды на промывку,

расчет потребности анодов на первоначальный пуск и на выполнение годовой программы, составлены компоновка линии медь - никель – олово-висмут и техническое задание на сооружение линии

4. Была создана технологическая схема очистки сточных вод. Произведен расчет расхода реагентов по очистке сточных вод

5. Разработан математического аппарата для оценки оптимального количества изделий на складе. Рассмотрены проблемы гальванических сплавов: олово-цинк и олово-висмут. Рассмотрены факторы влияющие на возникновение дефектов покрытия и методы их устранения. Приведены математическая модель и апробация результатов построения модели на примере действующего производства. Построена математическая модель, описывающая расчет программы производства на участке нанесения покрытий. При апробации была решена тестовая задача при стандартных ограничениях. Разработанная модель может быть использована для внедрения в отдел планирования производства в цехе покрытий машиностроительного предприятия. Модель позволяет оценить оптимальное количество необходимого для производства количества изделий без производства «на склад».

6. По разработанной методике была произведена оценка качества (толщины покрытия) в зависимости от различных факторов. Проведен многофакторный анализ качества (толщины) многослойного покрытия. Построены уравнения регрессии факторов влияющих на толщину покрытия. Произведена проверка, как коэффициентов уравнения регрессии, так и самого уравнения на адекватность по критериям Стьюдента и Фишера. Интерпретированы коэффициенты уравнения.

Основными положительными сторонами разработанной математической модели является возможность четкого контроля за запасами изделий на складе, а так же максимально точное отображение требований и нужд предприятия.

Оценка качества получаемых покрытий позволяет по уравнению регрессии (расчет производился по известной методике получения уравнения регрессии, оценки его адекватности и его коэффициентов) достаточно достоверно оценить влияние различных факторов на толщину покрытия.

В целом данную работу можно рекомендовать к использованию при проектировании и организации нового участка комплекса покрытий медь – никель – олово-висмут на алюминии и алюминиевых сплавах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1971. – 282 с.
2. Беленький М.А. – Электроосаждение металлических покрытий. Справочник. – М.: Металлургия, 1985. – 288 с.
3. Богорад, Л.Я. Хромирование [Текст]: учеб./ Л.Я. Богорад - 5-е изд., испр. и доп. - СПб.: Машиностроение, 1984. - 94 с.: ил.
4. Вайнер Я.В. – Технология электрохимических покрытий. - М.: Машгиз, 1962. – 468 с. 1 глава
5. Виноградов С. С. Организация гальванического производства. Оборудование, расчет производства, нормирование [Текст]: под редакцией проф. В. Н. Кудрявцева. - 2-е изд., перераб., доп. - М.: Глобус, 2005. - 256 с.
6. Виноградов С.С. Экологически безопасное гальваническое производство / Под. Ред. В.Н. Кудрявцева. – М.: Глобус, 1999. – 302 с.
7. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник под ред. М.А. Шлугера. – М.: Машиностроение, - т.1. – 1988. – 224 с.
8. Гамбург, Ю.Д. Гальванические покрытия. Справочник по применению [Текст]: учеб./ Ю.Д. Гамбург - М.: Техносфера, 2006. - 216 с.: ил.
9. Гибкие автоматизированные гальванические линии: справочник [Текст] / В. Л. Зубченко, В. И. Захаров, В. М. Рогов [и др.] - М.: Машиностроение, 1989.
10. Гибкие автоматизированные гальванические линии: Справочник / В.Л. Зубченко, В.И. Захаров. В.И. Рогов и др.; Под общ. ред. В.Л. Зубченко – М. Машиностроение. 1989- 672 с: ил.
11. Гинберг А.М. – Гальванотехника. Справочник. - М.: Металлургия, 1987. – 735 с. 1 глава
12. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. – 10-е изд., стер.– М.: Высшая школа, 2004. – 479с. 5 глава

13. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: учеб. пособие. – 8-е изд., стер.– М.: Высшая школа, 2003. – 405с.
14. Грилихес, С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов [Текст]: учеб./ С.Я. Грилихес - СПб.: Машиностроение, 1983. - 101 с.: ил. 2 глава
15. ГОСТ 4165-78 Реферат и аннотация. – Москва: Изд-во стандартов, 1979. – 7 с
16. ГОСТ 342-77 Реферат и аннотация. – Москва: Изд-во стандартов, 1978. – 8 с
17. ГОСТ 3760-79 Реферат и аннотация. – Москва: Изд-во стандартов, 1980. – 10 с
18. ГОСТ 4465-74 Реферат и аннотация. – Москва: Изд-во стандартов, 1975. – 11 с
19. ГОСТ 4171-76 Реферат и аннотация. – Москва: Изд-во стандартов, 1978. – 16 с
20. ГОСТ 4523-77 Реферат и аннотация. – Москва: Изд-во стандартов, 1978. – 12 с
21. ГОСТ 4233-77 Реферат и аннотация. – Москва: Изд-во стандартов, 1978. – 19 с
22. ГОСТ 9656-75 Реферат и аннотация. – Москва: Изд-во стандартов, 1977. – 10 с
23. ГОСТ 10216-75 Реферат и аннотация. – Москва: Изд-во стандартов, 1976. – 10 с
24. ГОСТ 4204-77 Реферат и аннотация. – Москва: Изд-во стандартов, 1978. – 14 с
25. ГОСТ 4233-77 Реферат и аннотация. – Москва: Изд-во стандартов, 1978. – 19 с
26. ГОСТ 9.314-90. Реферат и аннотация. – Москва: Изд-во стандартов, 1991. – 15 с

27. ГОСТ 9.074-75. Реферат и аннотация. – Москва: Изд-во стандартов, 1976. - 72 с.
28. ГОСТ 9.305-84. Реферат и аннотация. – Москва: Изд-во стандартов, 1984. - 104 с.
29. Давыдова Н.С., Клочков Ю.П. - Бережливое производство на предприятиях машиностроения: теория и практика внедрения. – М.: Академия естествознания, 2012. – 111 с.
30. Дасоян М.А., Пальмская И.Я. Оборудование цехов электрохимических покрытий. – Л.: Машиностроение, 1979. - 287 с.
31. Зальцман Л.Г., Черная С.М. – Спутник гальваника. К.: Тэхника, 1989. – 191 с.
32. Ильин В.А. – Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание. – Л.: Машиностроение, 1983. – 87 с.
33. Медведев Г.И., Новиков В.Т, Суров И.И. Методические указания к курсовому и дипломному проектированию по выполнению расчетов вспомогательного оборудования цехов гальванопокрытий. – Мж МХТИ, 1978. – 49 с.
34. Жендарева О.Г. – Методы анализа гальванических ванн. – М.: НТИ ОБОРОНГИЗ, 1963
35. Оборудование для нанесения гальванических, химических и анодно-оксидных покрытий. Каталог. Москва , 1985. – 222 с.
36. Ильин В.А. – Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание. Л.: Машиностроение, 1983. – 87 с.
37. Каданер Л.И. – Справочник по гальваностегии. – К.: Техника, 1976. – 254 с.
38. Короткин А.И. – Технология нанесения гальванических покрытий. – М.: Высш. Шк., 1984. – 200 с
39. Котик Ф.И. – Ускоренный контроль электролитов, растворов и расплавов. Справочник – М.: Машиностроение, 1978

40. Мельников П.С. – Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1979 – 296 с.
41. Мельников П.С. – Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
42. Механизм гальванического сернокислого никелирования// Сайт НПП Электрохимия URL: <https://zctc.ru/sections/nickel> (дата обращения 01.04.2019)
43. Организация гальванического производства. Оборудование, расчет производства, нормирование./ Под редакцией проф. В.Н. Кудрявцева. – Изд. 2-е, перераб. И доп.; "Глобус". М. 2005-256 с.
44. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию [Текст] / Г.С. Борисов, В.П. Брыков, Ю.И. Дытнерский [и др.] - 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. Ю.И. Дытнерского - М.: Химия, 1991
45. ОСТ Г0.054.076
46. Учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию./ Медведев Г.И., Помогаев В.М., Шмачкова И.Г. и др./ Новомосковск: НИ РХТУ, 1993г. – 71 с.
47. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой и текстильной промышленности). – М.: Легкая индустрия, 1974. – 262 с.
48. Характеристики сплава олово-висмут // Сайт Российское общество гальванотехников и специалистов в области обработки поверхности URL: <http://www.galvanicus.ru/qa/?answer=82> (дата обращения 01.04.2019) 1 глава
49. [1] Хранилов, Ю.П. Автооператорные гальванические линии. Курсовое и дипломное проектирование [Текст]: учеб. пособие: специальность 240302 и для студентов направления подготовки бакалавров 240100.62 всех форм обучения / ВятГУ, ХФ, каф. ТЭП; Ю. П. Хранилов, В. И. Мамаев. - Киров, 2012. - 86 с.;
50. Электролиты для меднения // Сайт Студопедия URL: https://studopedia.ru/19_331836_elektroliti-dlya-medneniya.html (дата обращения 02.04.2019)

51. Ямпольский, А.М. Краткий справочник гальванотехника [Текст]: учеб. / А.М. Ямпольский, В.А. Ильин. - М.: МАШГИЗ, 1962. - 244 с.
52. Ямпольский А.М – Краткий справочник гальванотехника. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1981. – 269 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ ЧЕРТЕЖИ И СПЕЦИФИКАЦИЯ НА
ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ВАННЫ, КАРКАСЫ ДЛЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ
ВАНН И БОРТОВЫЕ ОТСОСЫ**

Формат Зона Пол.	ОБОЗНАЧЕНИЕ		НАИМЕНОВАНИЕ		Кол.	Примечание
	№ докум.	Пол.	№ докум.	Пол.		
<u>Документация</u>						
	УГВ-000000СБ		Сборочный чертёж			
<u>Детали</u>						
1	УГВ-001001		Дно		1	
2	УГВ-001002		Стенка		2	L-830
3	УГВ-001002-01		Стенка		2	L-492
4	УГВ-001003		Планка		2	L-910
5	УГВ-001003-01		Планка		2	L-480
6	УГВ-001004		Ребро		2	
7	УГВ-001004-01		Ребро		2	
УГВ-000000						
Изм.	Лист	№ докум.	Пол.	Дата	Лит. Лист Листов	
Разраб.					Универсальная гальваническая ванна	
Проект.						
И.контр.						
Усть.						

Рисунок 1 – Спецификация на универсальную гальваническую ванну
УГВ - 000000

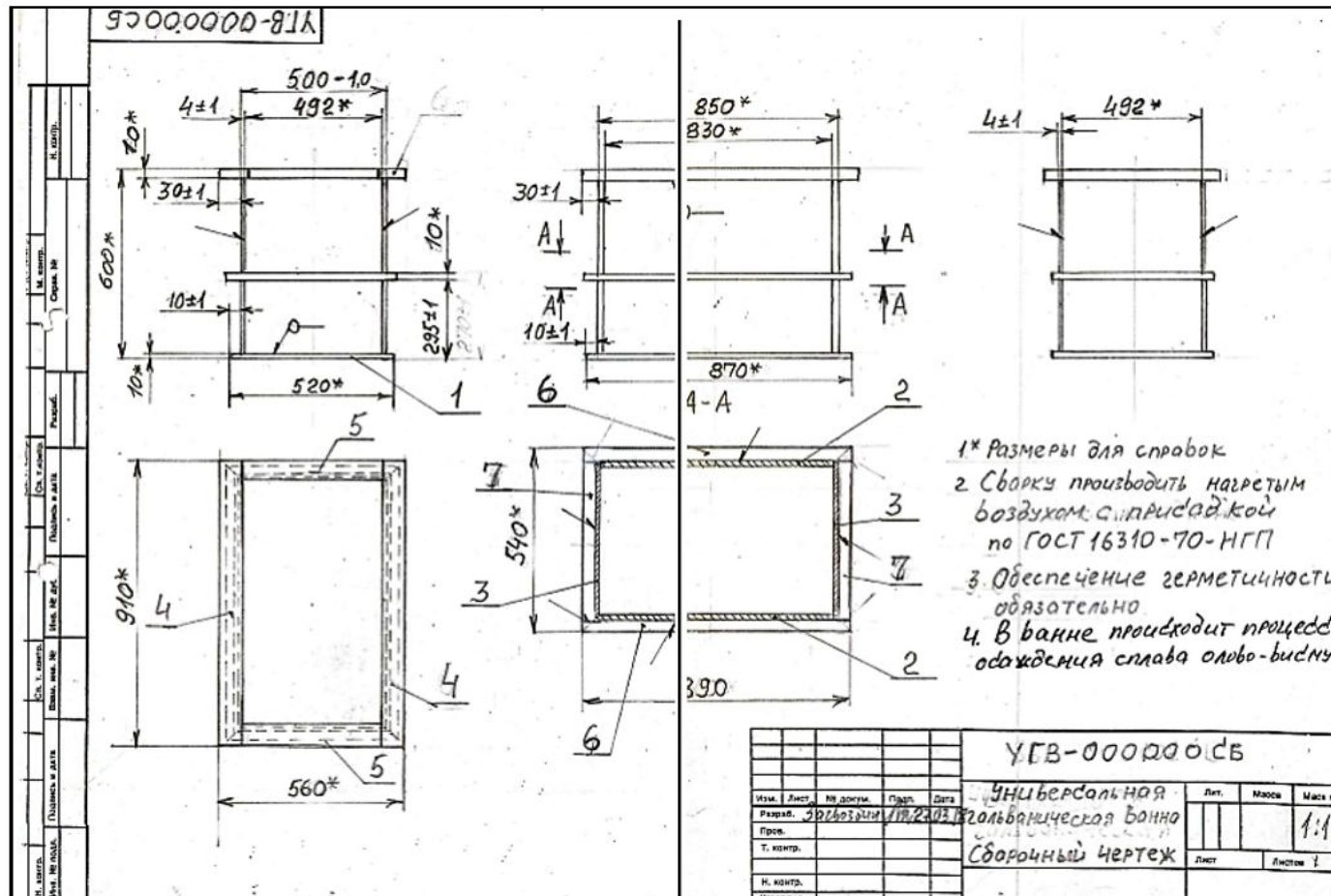


Рисунок 2 - Сборочный чертёж универсальной гальванической ванны УГВ-000000

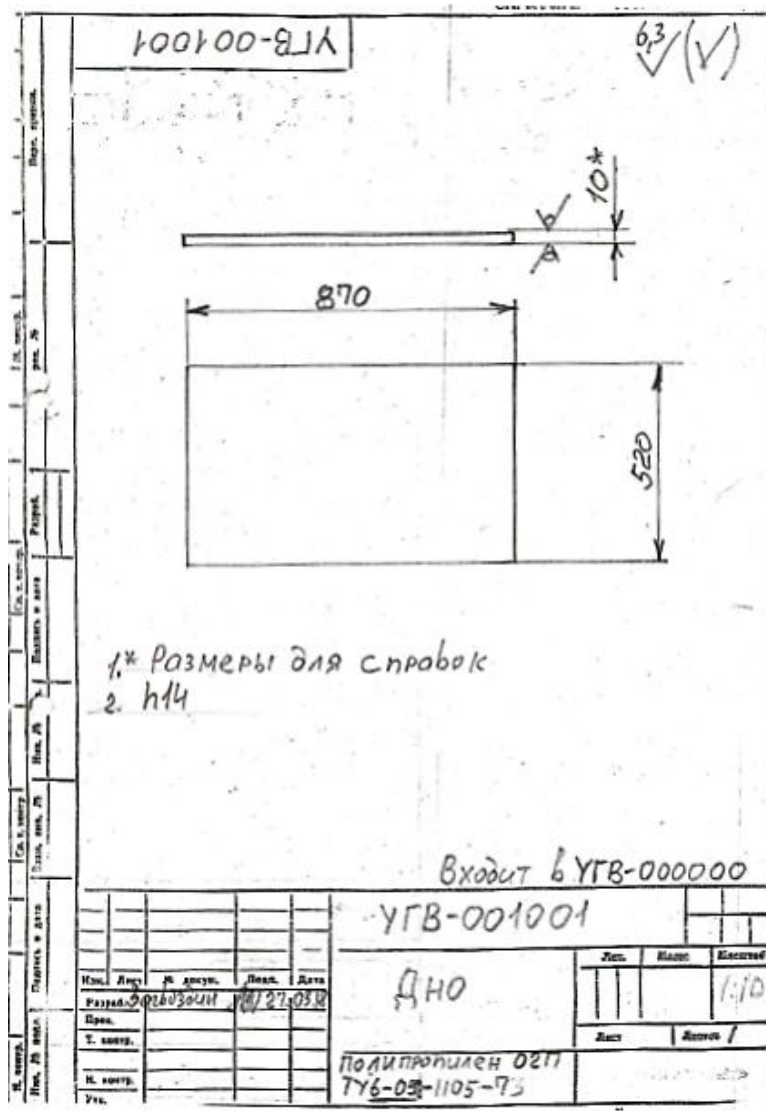


Рисунок 3 - Чертеж детали УГВ – 001001 «Дно» универсальной гальванической ванны

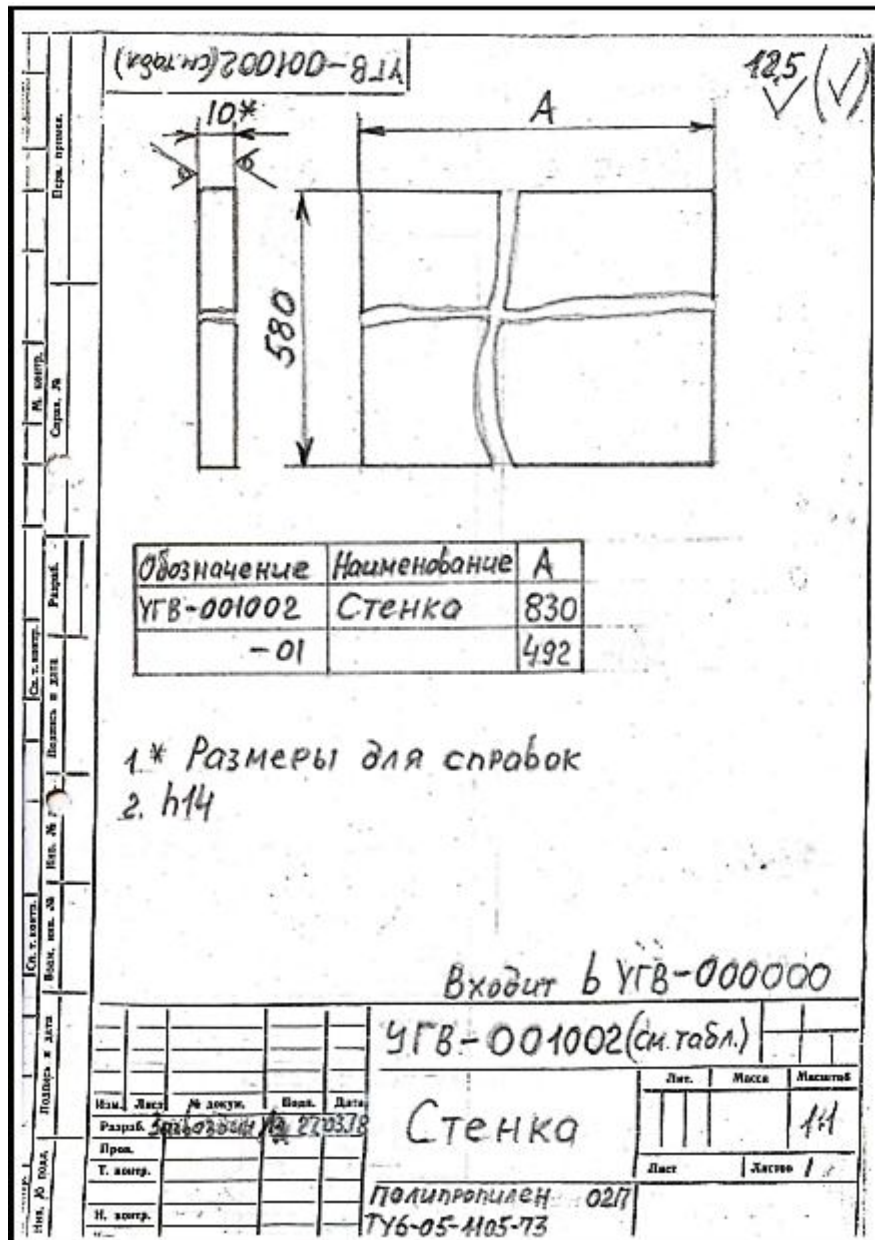


Рисунок 4 - Чертеж детали УГВ – 001002 «Стенка» универсальной гальванической ванны

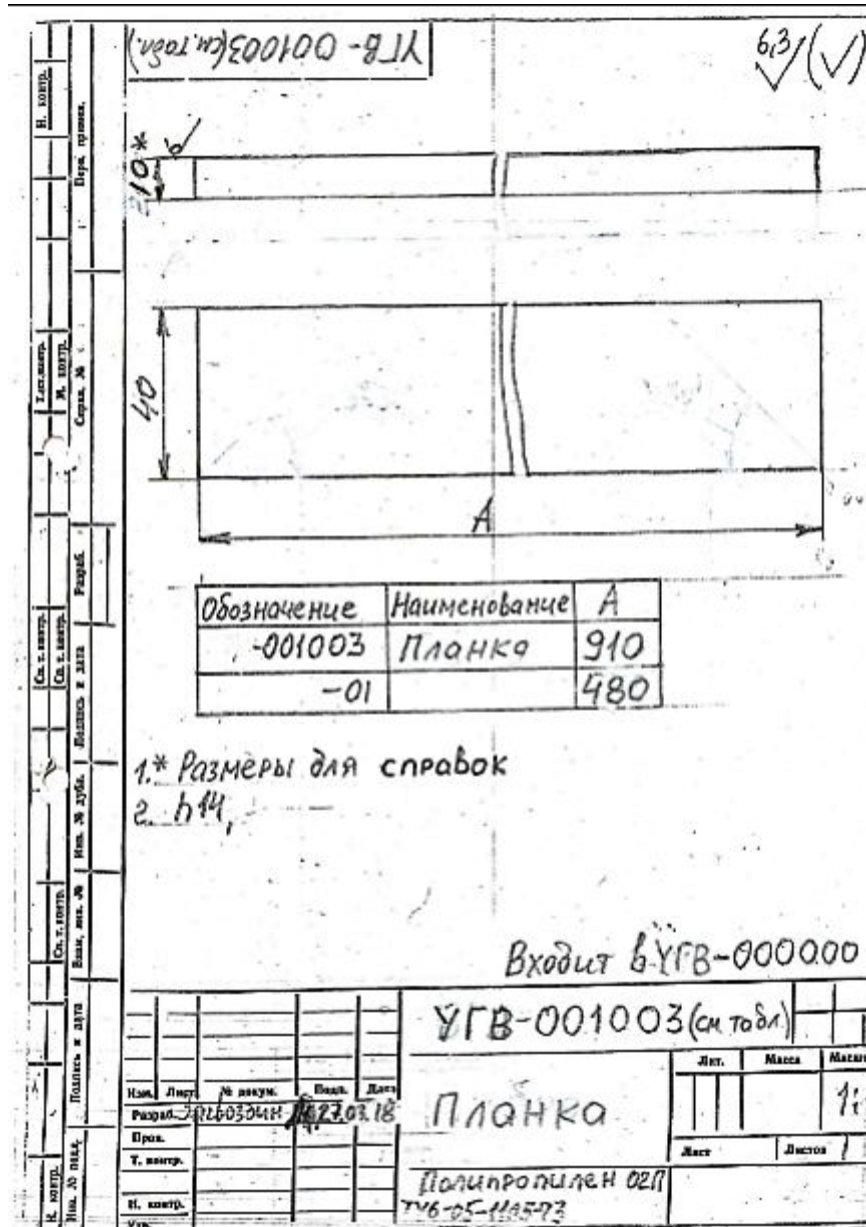


Рисунок 5 - Чертеж детали УГВ – 001003 «Планка» универсальной гальванической ванны

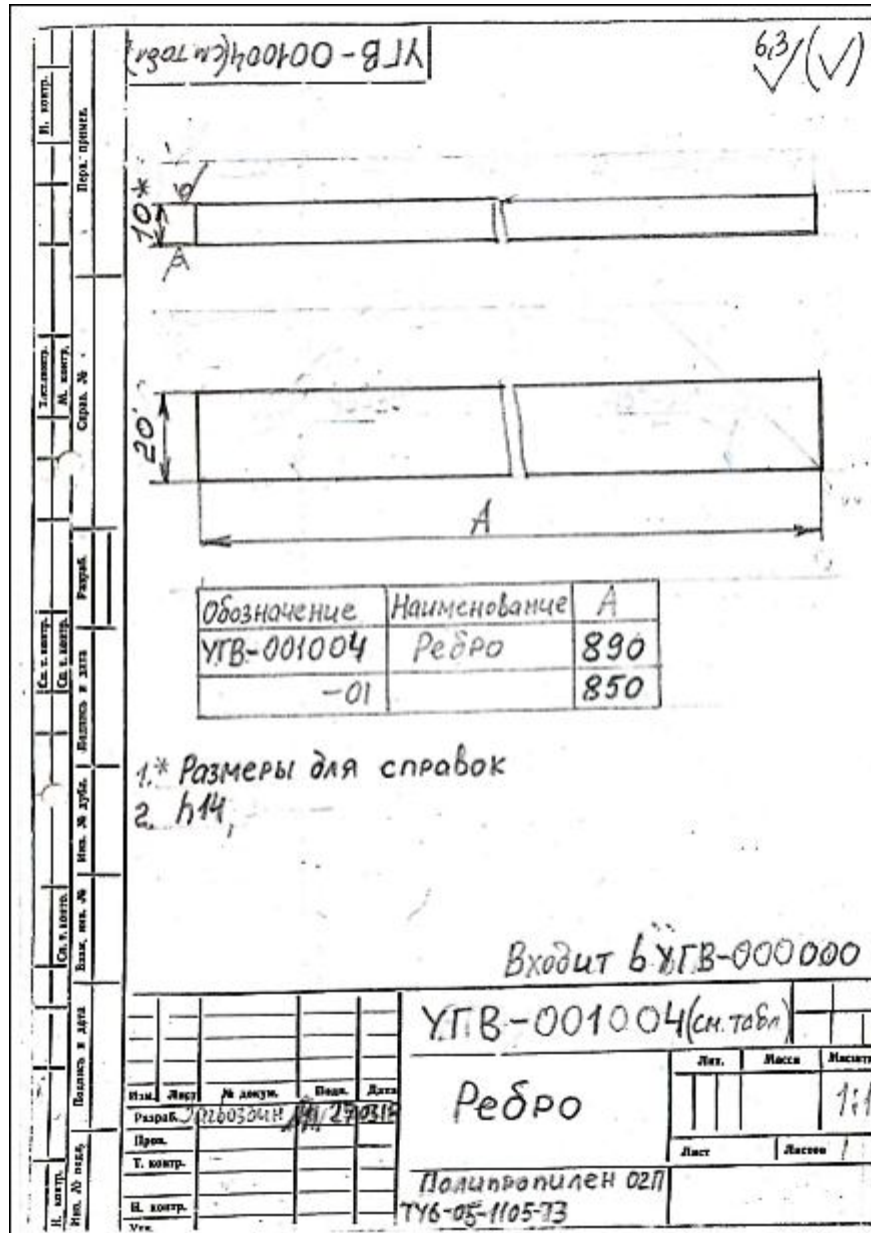


Рисунок 6 - Чертеж детали УТВ – 001004 «Редра» универсальной гальванической ванны

Формат Знак Рис.	ОБОЗНАЧЕНИЕ	НАИМЕНОВАНИЕ	Кол.	Примечание
	<u>Документация</u>			
	УГВ-010000 СБ	Сборочный чертеж		
	<u>Сборочные единицы</u>			
1.	УГВ-010101	Рама	1	
	<u>Детали</u>			
4	УГВ-011002	Планка	2	L-530
5	УГВ-011002-01	Планка	2	L-880
6	УГВ-011003	Плотнок	4	
7	УГВ-011006	Уголок-стойка	4	
8	УГВ-011007	Опора	4	
УГВ-010000				
Изм.	Лист	№ докум.	Грпп.	Дата
Разработ.	Провер.	Утверд.	Каркас для универсальной гальванической ванны УГВ-000000	
Проект.			Лист	Листов
Н. контр.				
Усть.				

Рисунок 7 – Спецификация на каркас для универсальной гальванической ванны УГВ - 010000

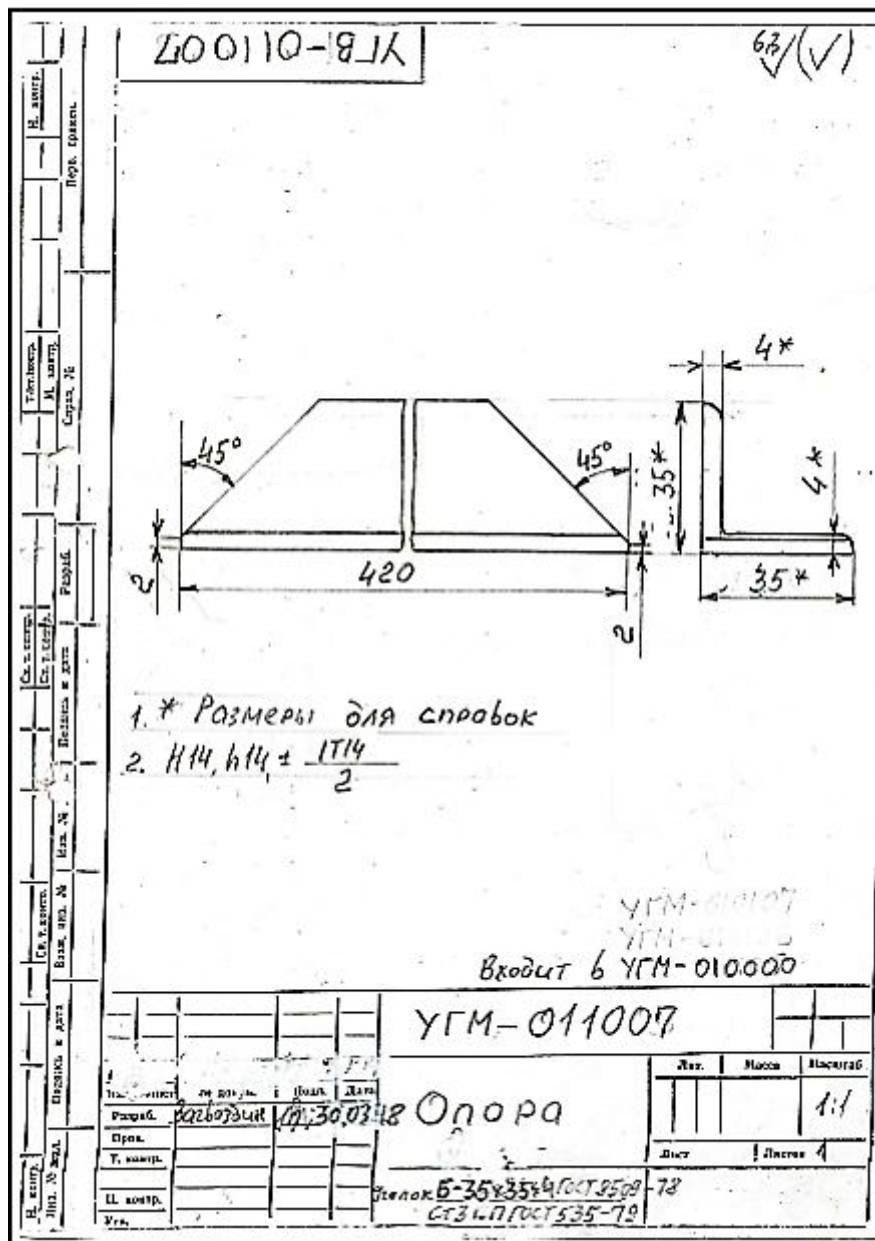


Рисунок 9 – Элемент каркаса УГМ – 011007 «Опора»

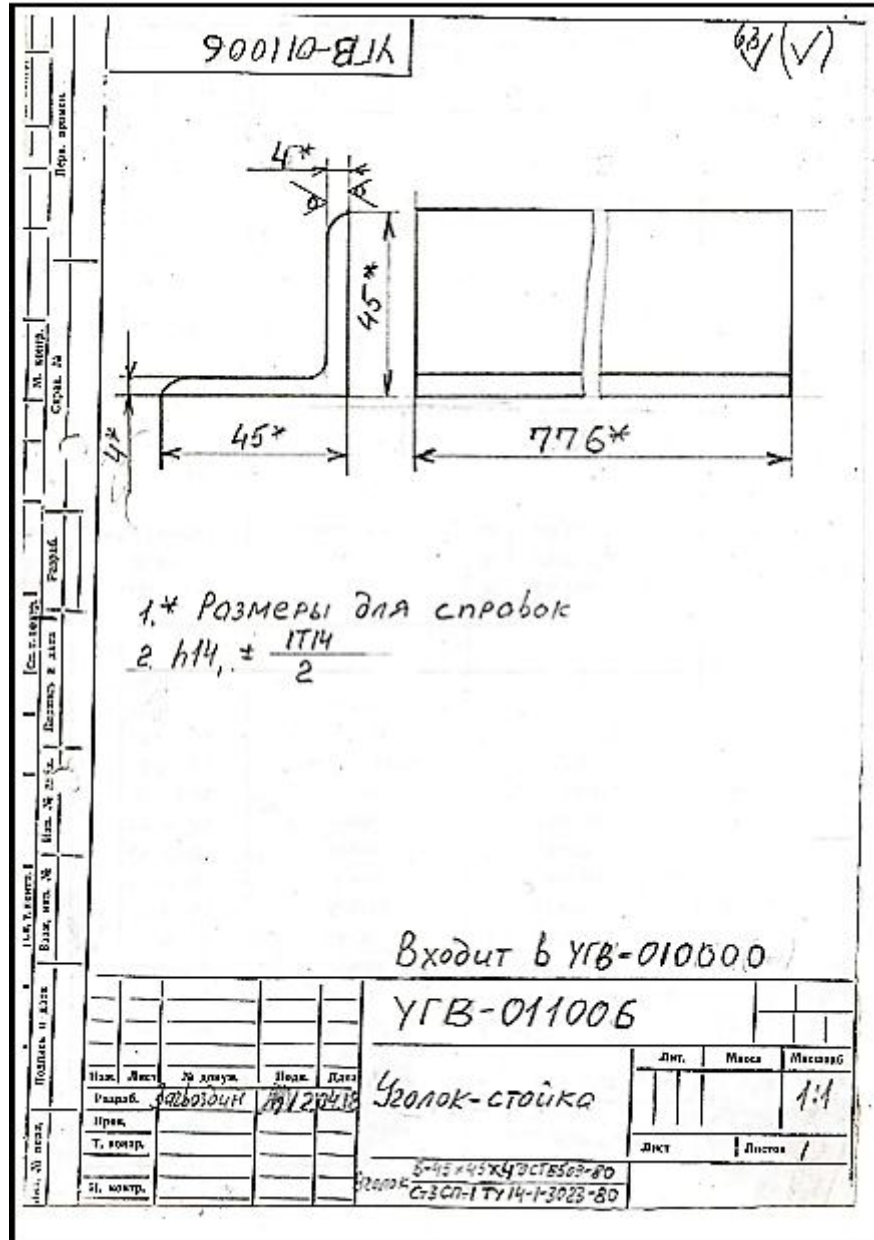


Рисунок 10 – Элемент каркаса УГВ 011006 «Уголок-стойка»

Формат	Экз.	Лист	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
<u>Документация</u>						
			УГВ-010101 СБ	Сборочный чертеж		
<u>Детали</u>						
		1	УГВ-011001	Уголок с разделкой	2	Л-890
		2	УГВ-011001-01	Уголок с разделкой	2	Л-540
		3	УГВ-011002	Планка	2	Л-530
		4	УГВ-011003	Пластик	6	
УГВ-010101						
Изм.		Лист	Масштаб	Поим.	Дата	Лист
Разработ.		02.03.2014			30.03.18	Лист
Проект.						Лист
Н.директор						Листов
Упр.						
Рама						

Рисунок 11 – Элемент каркаса УГВ – 010101 «Рама»

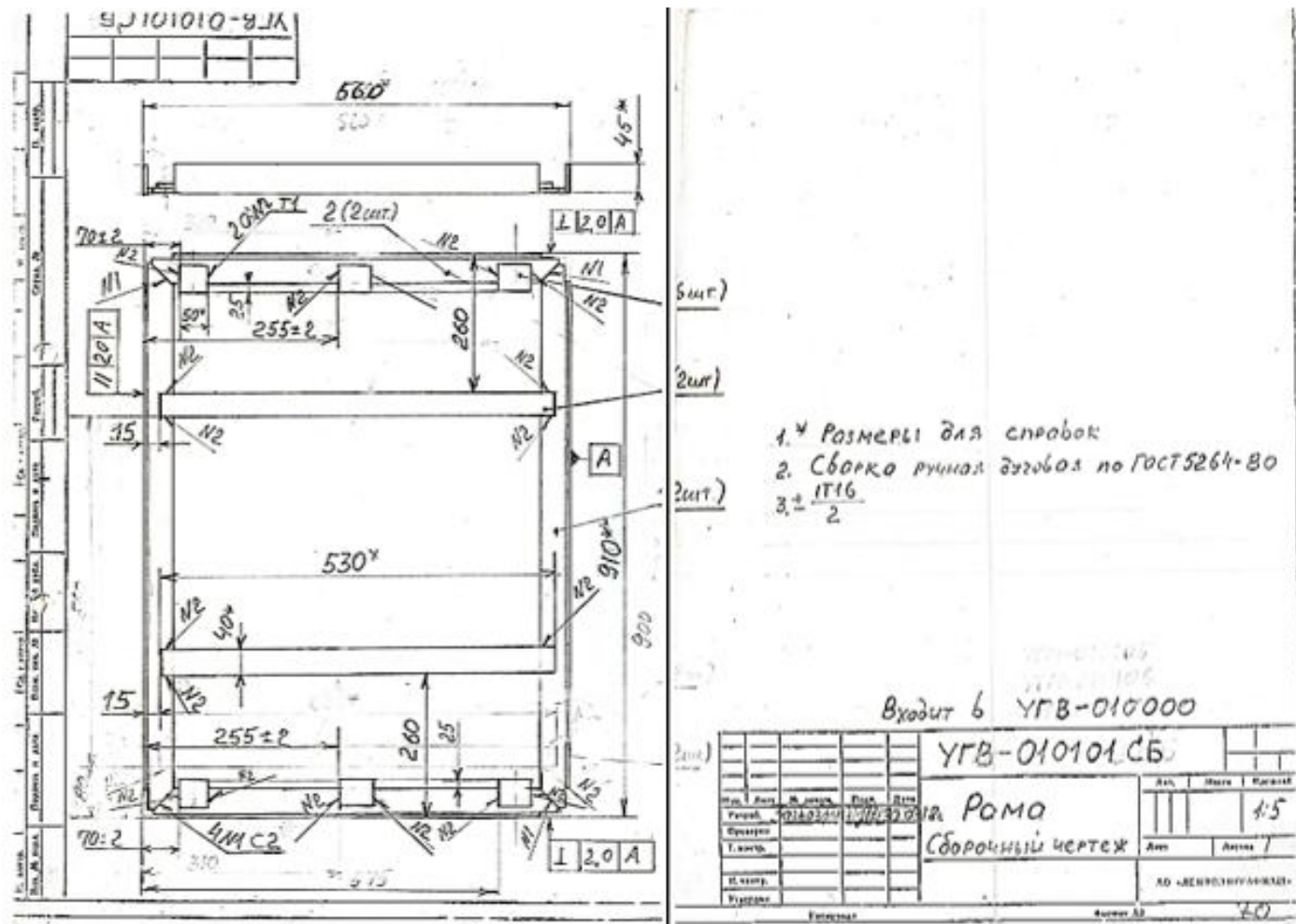


Рисунок 12 – Элемент каркаса УГВ – 010101 СБ «Рама» сборочный чертёж

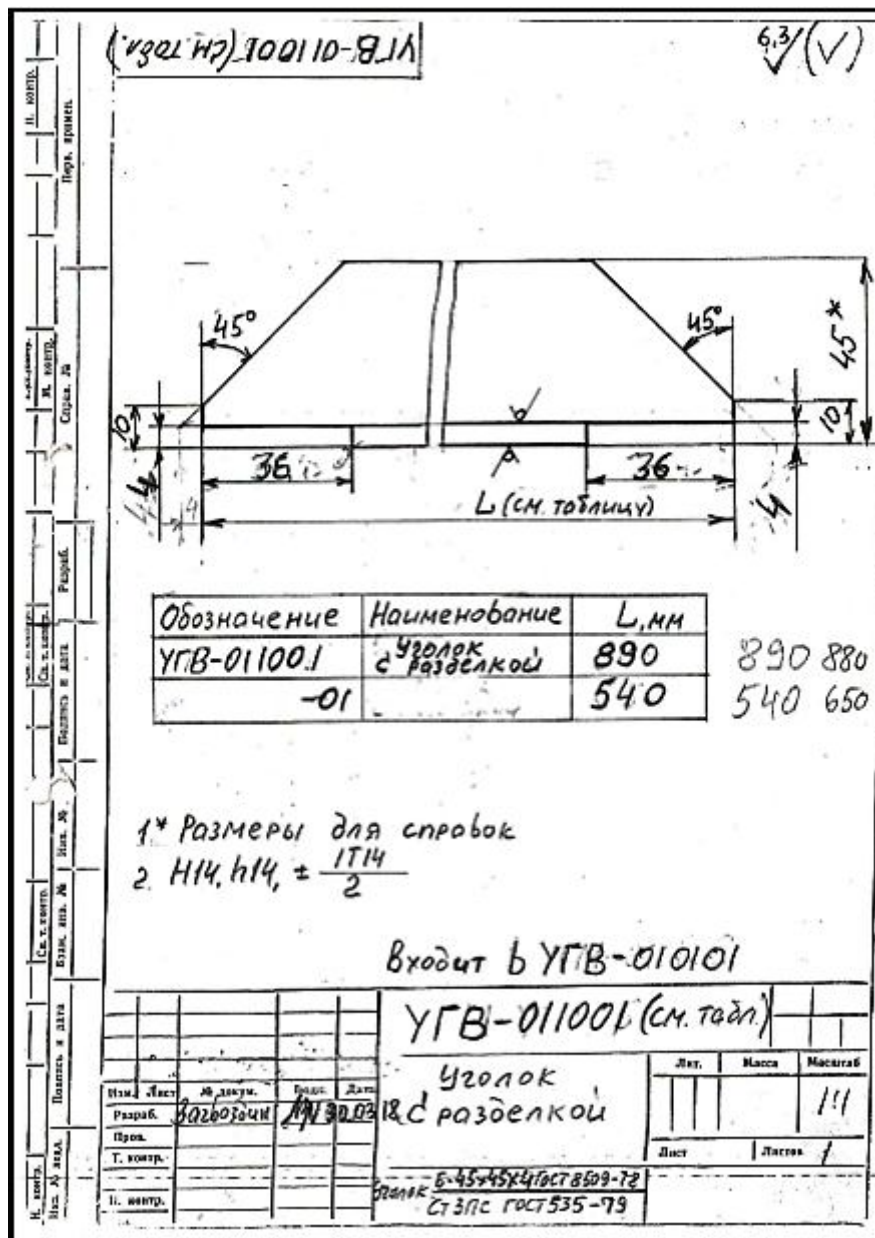


Рисунок 13 – Элемент каркаса УГВ 011001 «Уголок с разделкой»

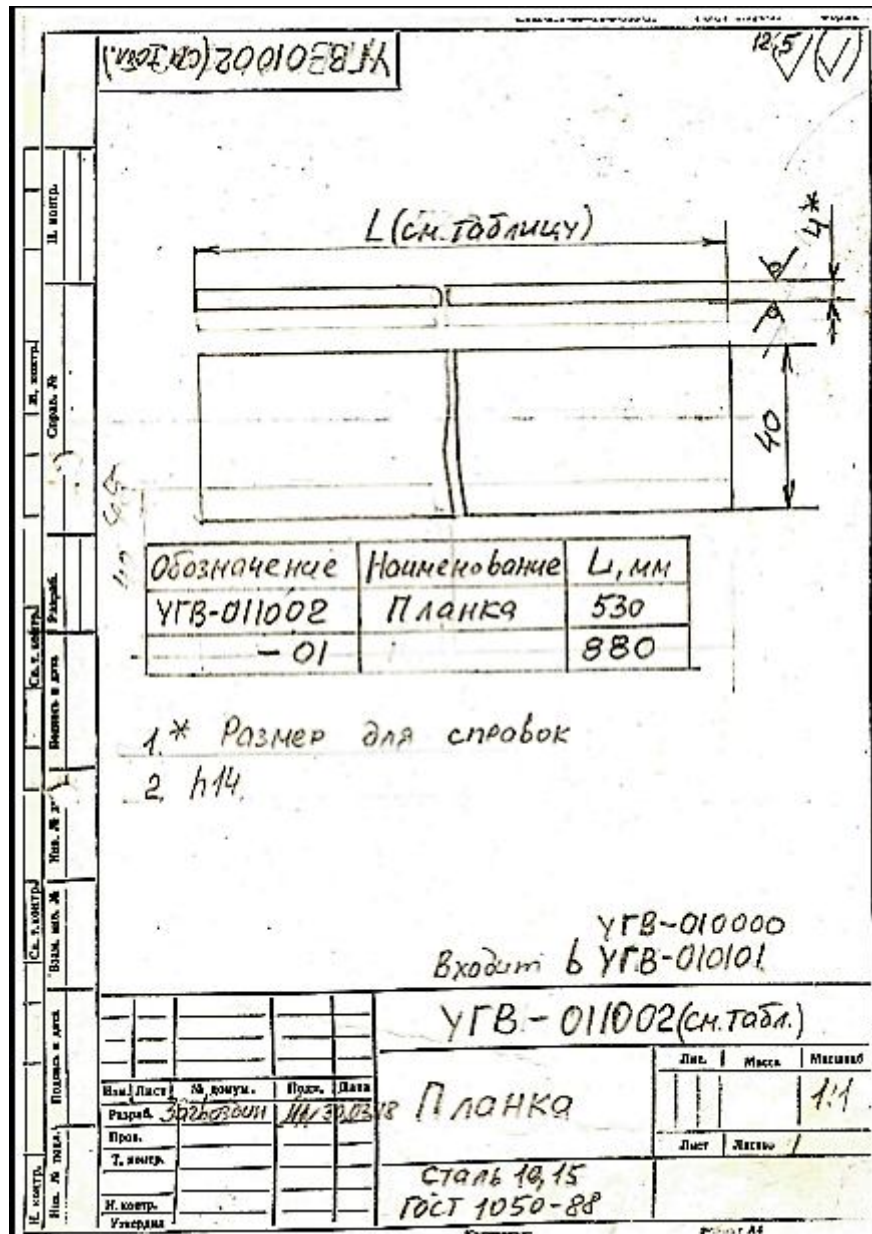


Рисунок 14 – Элемент каркаса УГВ – 011002 «Планка»

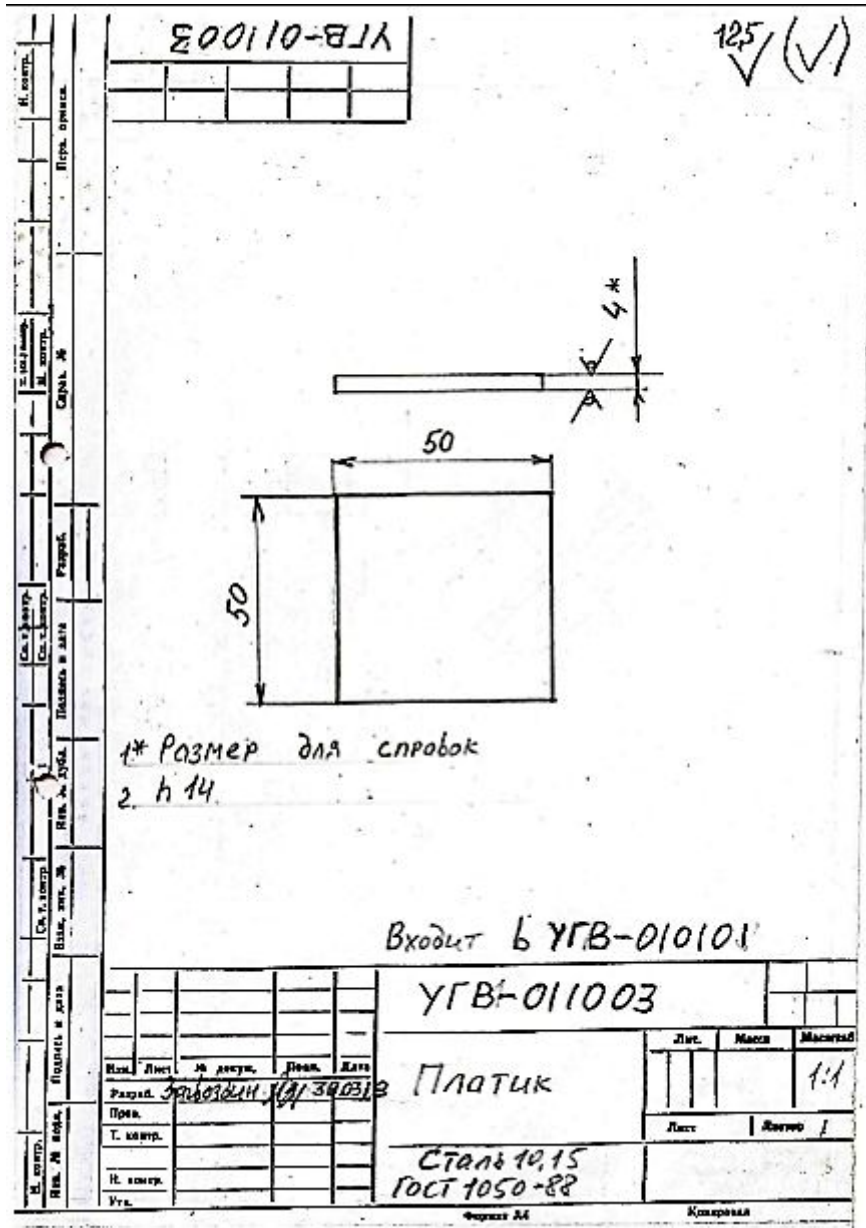


Рисунок 15 – Элемент каркаса УГВ – 011003 «Платик»

Формат	Шкала	Лист	ОБОЗНАЧЕНИЕ	НАИМЕНОВАНИЕ	Кол.	Примечание
Документация						
			УГВ-020000 СБ	Сборочный чертеж		
Детали						
		1	УГВ-021001	Основание	1	
		2	УГВ-021002	Стенка боковая	1 (сталь)	
		3	УГВ-021002-01	Стенка боковая	1 (без пазов)	
		4	УГВ-021003	Стенка поперечная	2	
		5	УГВ-021004	Поперечина	1	
		6	УГВ-021005	Крышка	1	
		7	УГВ-021006	Труба	1	
		8	УГВ-021007	Планка	1	
Стандартные изделия						
		10	DLN 7982	Шуруп (саморез) ф4x20 с потайной головкой из нержавеющей стали	33	A2, A4
		11	DLN 7981	Шуруп (саморез) ф4x12 с сверленной головкой из нержавеющей стали	10	A2, A4
Материалы						
		14		Устойчивый герметик		01кг
УГВ-020000						
Изд. №	Лист	№ докум.	Дата	Бортовой отсос правый		
Изд. №	Лист	№ докум.	Дата			
Изд. №	Лист	№ докум.	Дата	Лит.	Лист	Листов

Рисунок 16 – Спецификация на правый бортовой отсос
УГВ - 020000

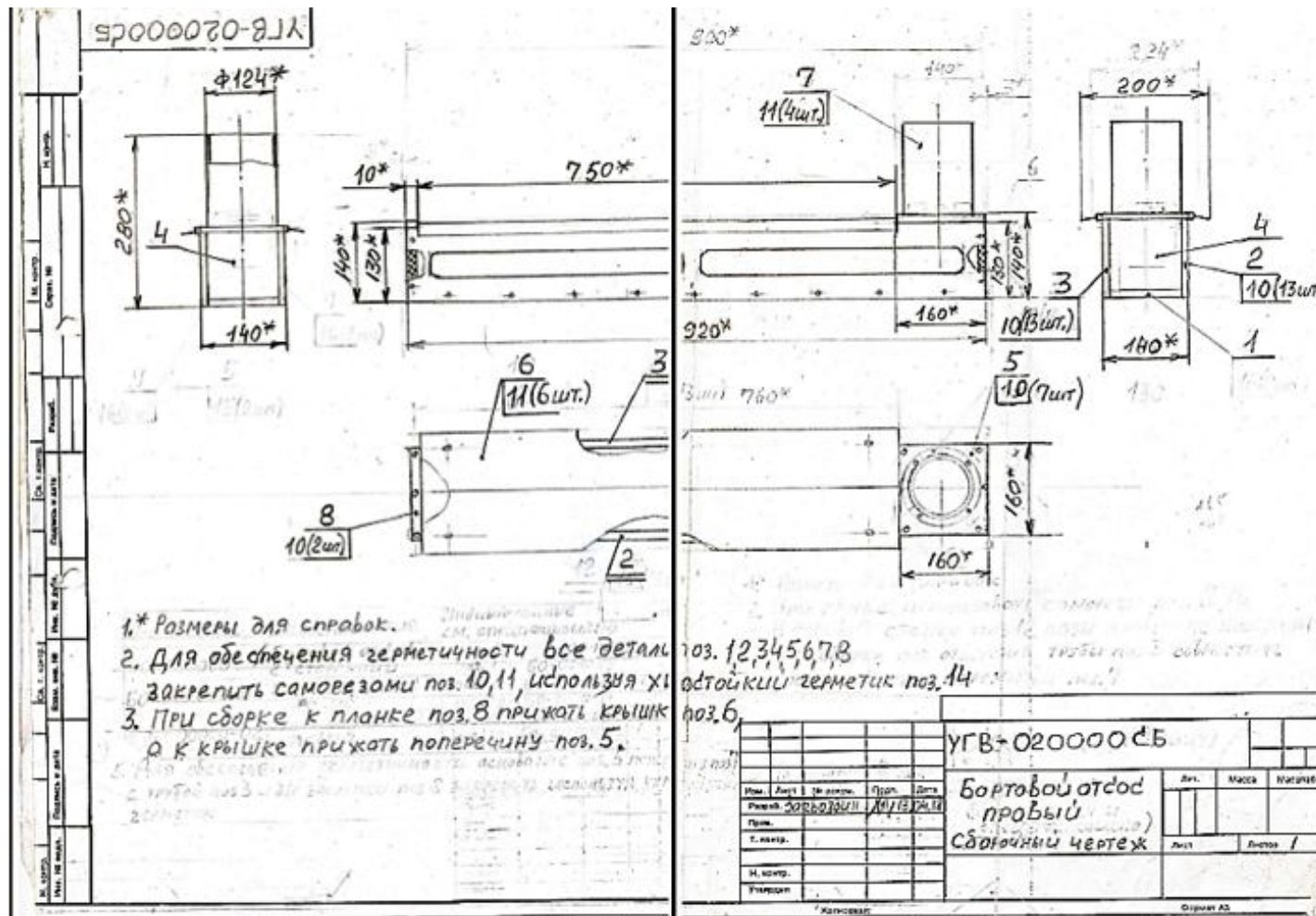


Рисунок 17 – Сборочный чертеж на правый бортовой отсос

УГВ – 020000 СБ

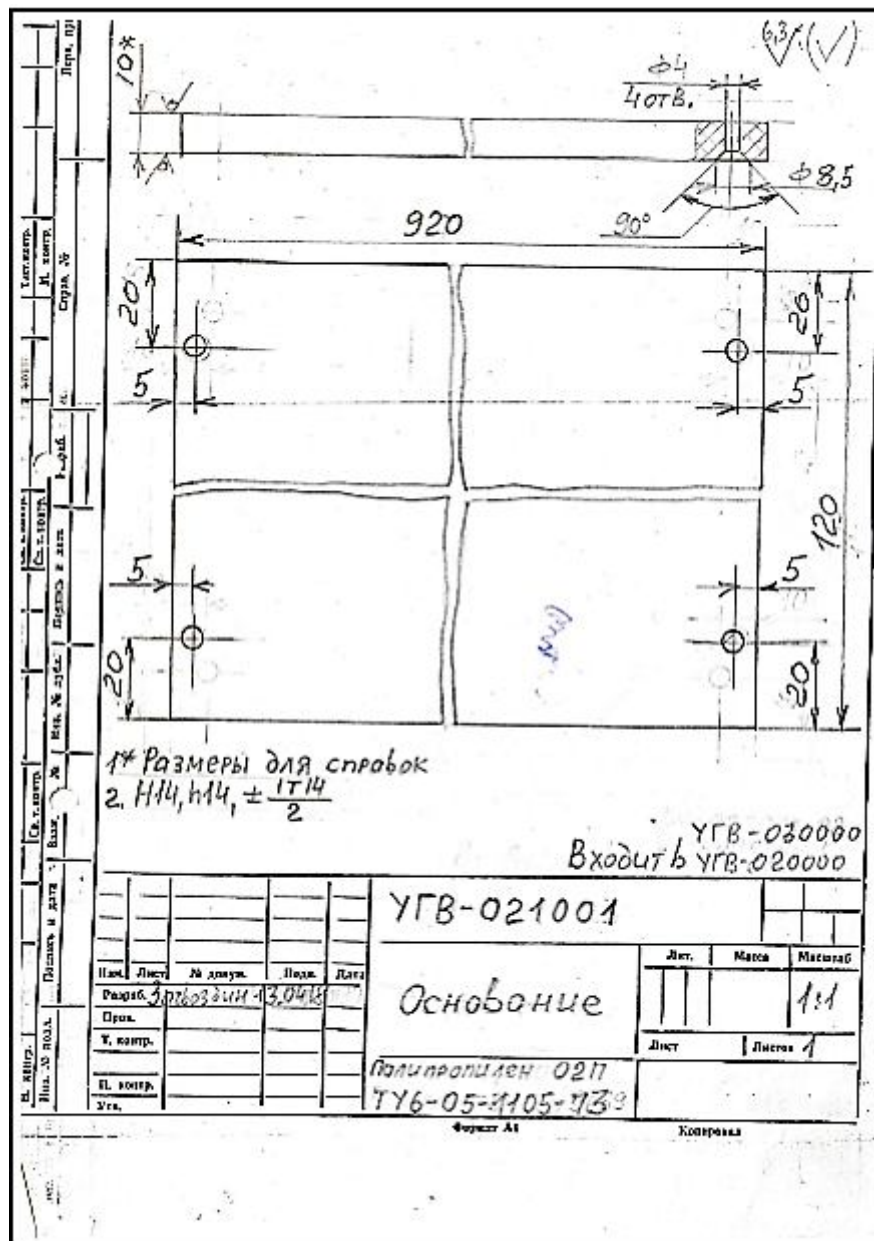


Рисунок 18 – Элемент бортового отсоса УГВ 021001 «Основание»

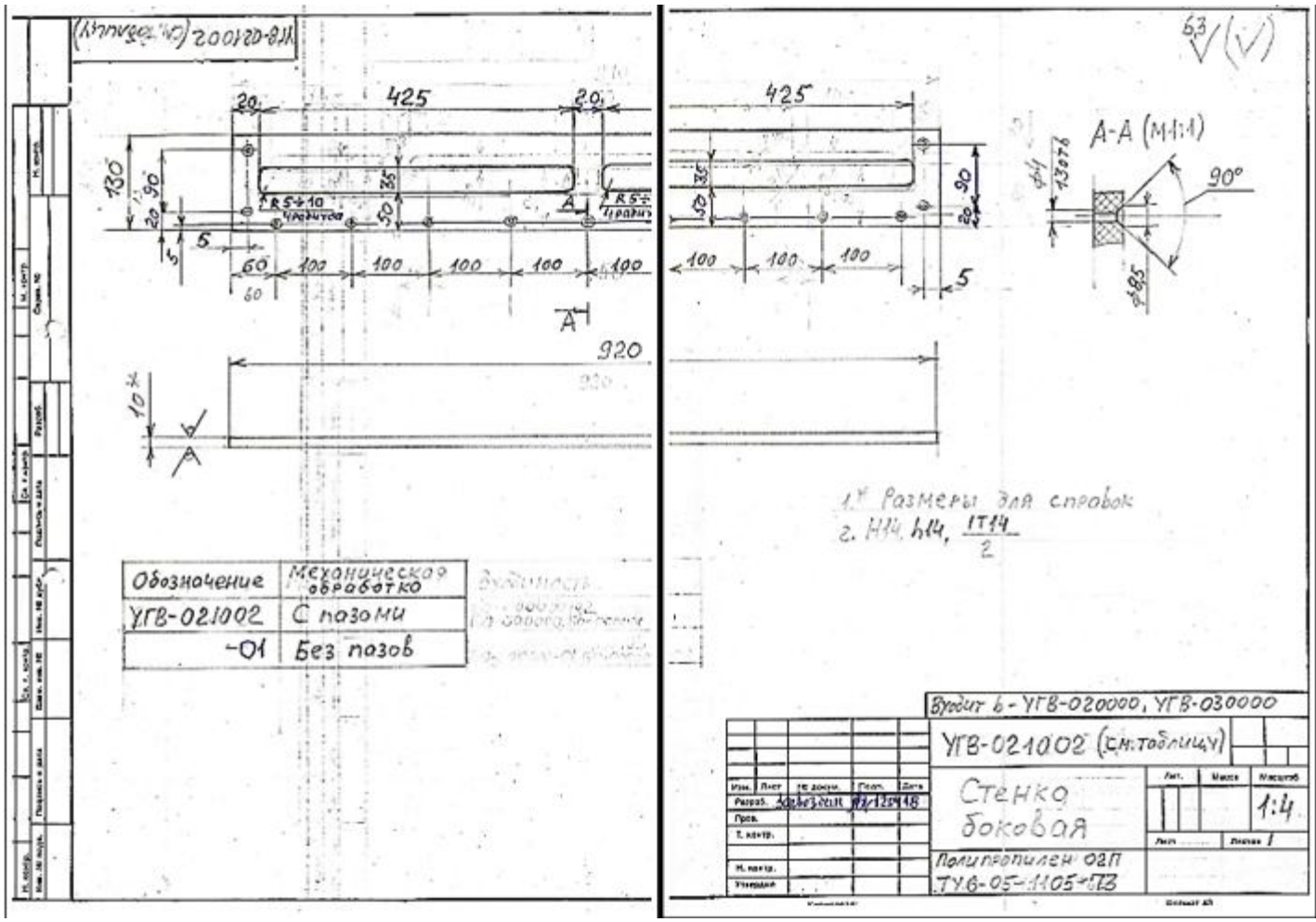


Рисунок 19 – Элемент бортового отсоса УГВ 021002 «Стенка боковая»

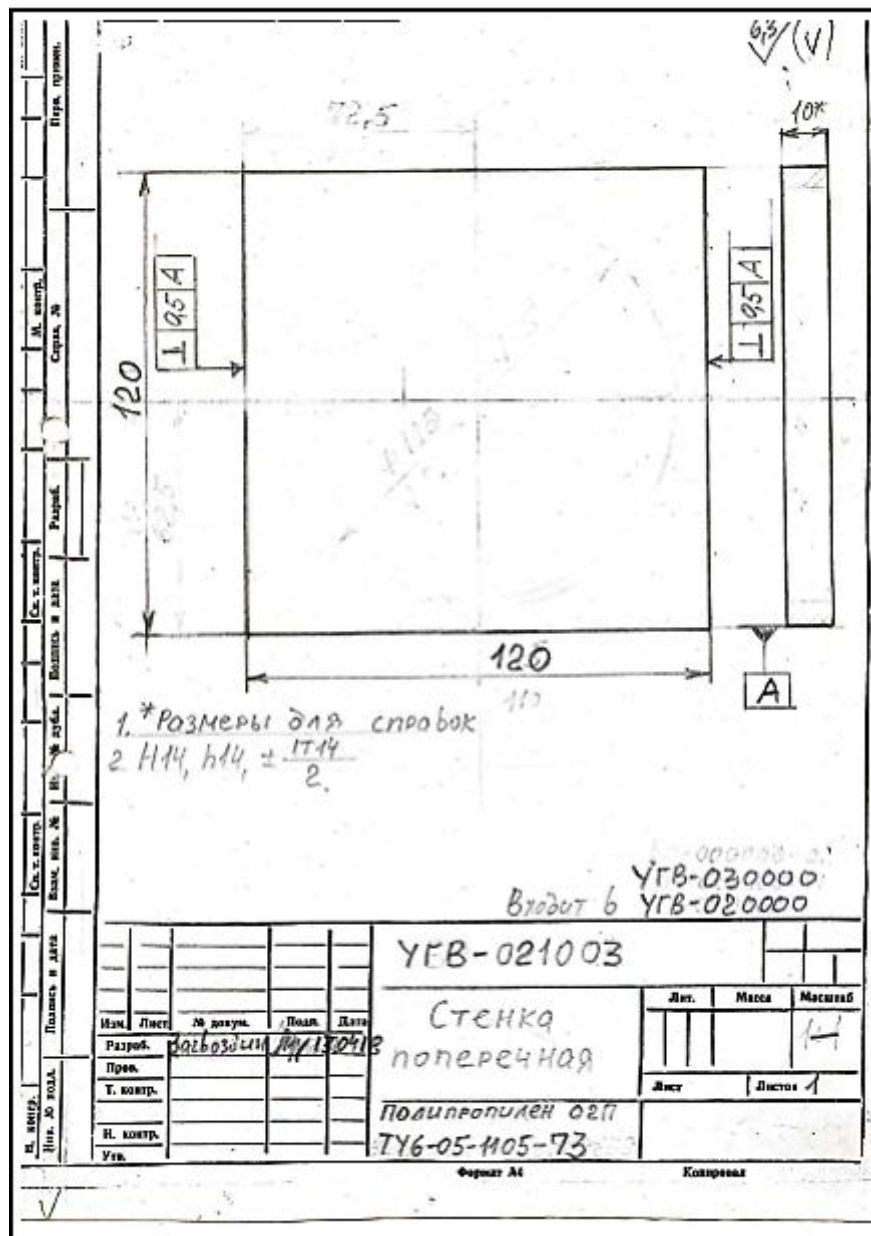


Рисунок 20– Элемент бортового отсоса УГВ 021003 «Стенка поперечная»

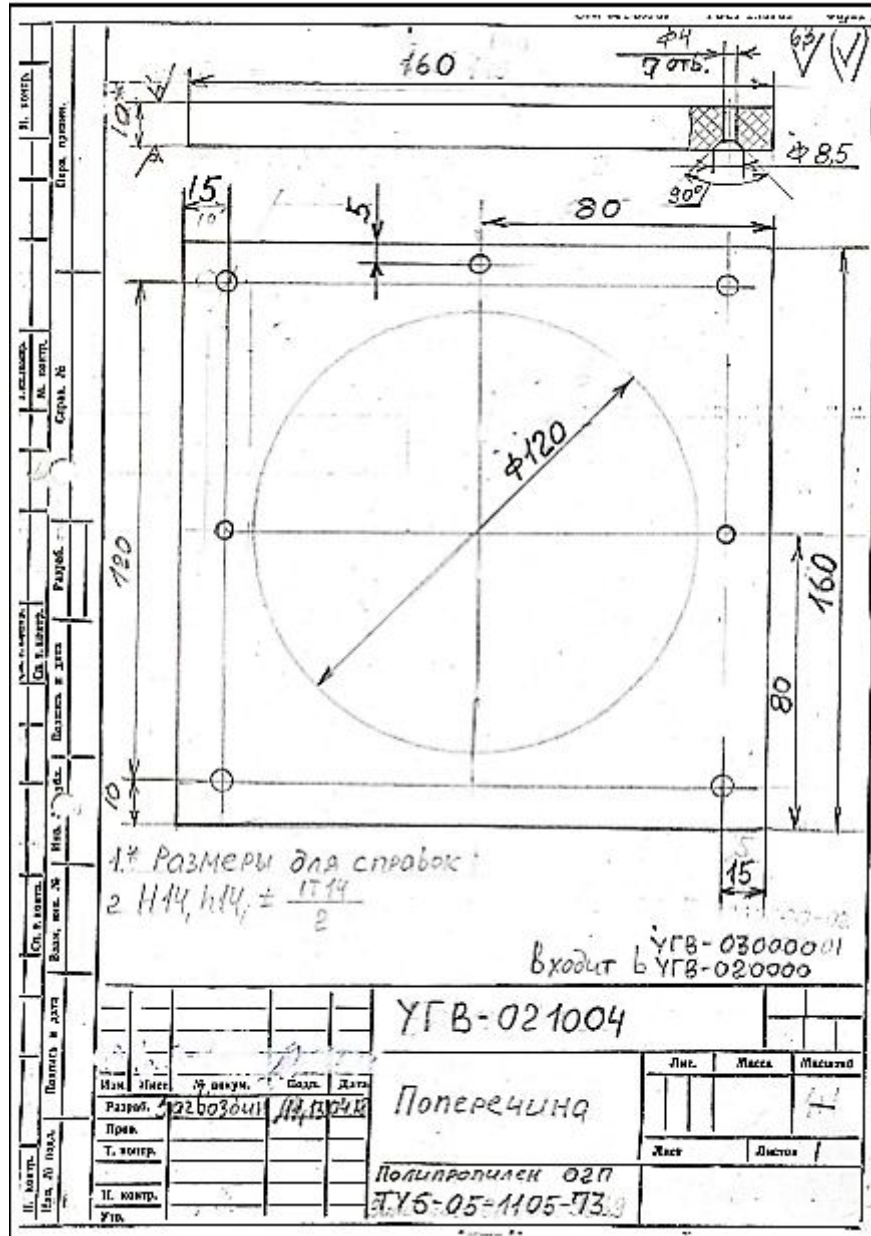


Рисунок 21– Элемент бортового отсоса УГВ 021004 «Поперечина»

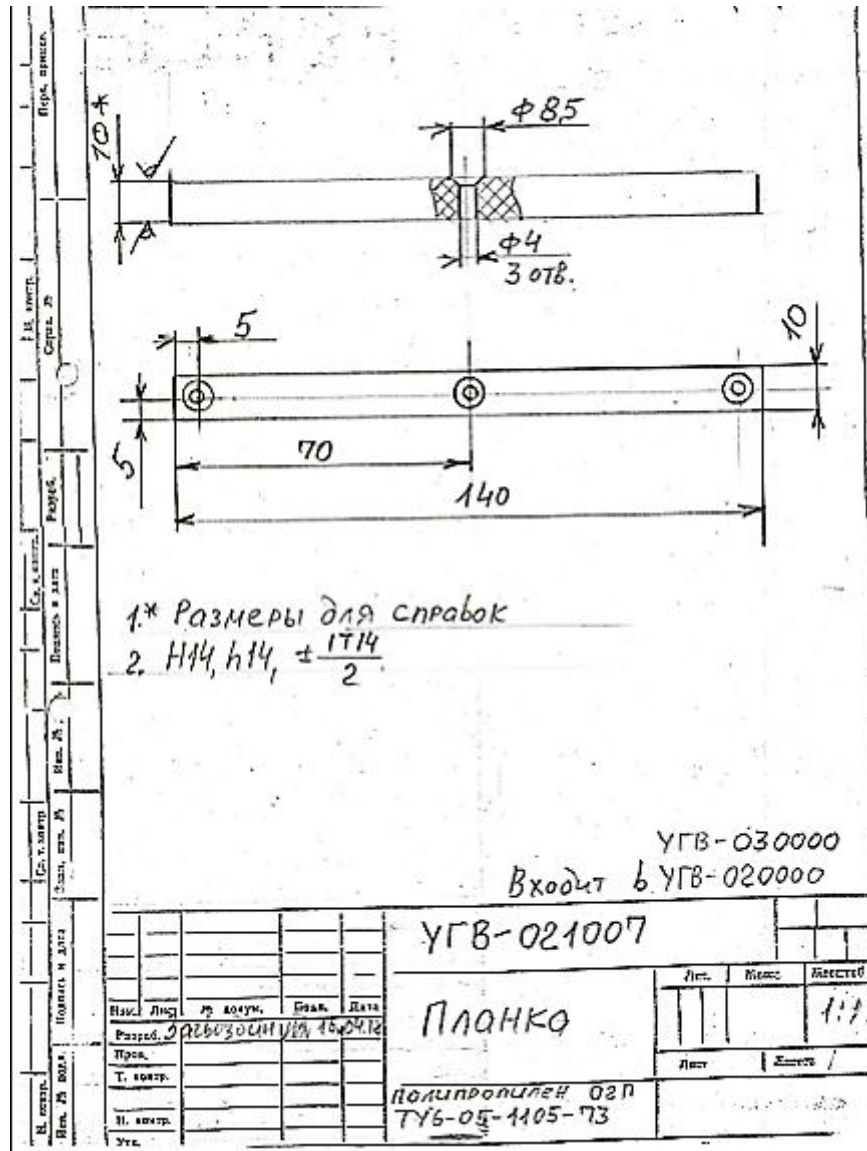


Рисунок 24 – Элемент бортового отсоса УГВ 021007 «Планка»

Формат Лист Лист	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
Документация				
	УГВ-030000 СБ	Сборочный чертеж		
Детали				
1	УГВ-021001	Основание	1	
2	УГВ-021002	Стенка боковая	1 (с пазом)	
3	УГВ-021002-01	Стенка боковая	1 (без паза)	
4	УГВ-021003	Стенка поперечная	2	
5	УГВ-021004	Поперечина	1	
6	УГВ-021005	Крышка	1	
7	УГВ-021006	Труба	1	
8	УГВ-021007	Планка	1	
Стандартные изделия				
10	DLN 7982	Шуруп (саморез) ф4x20 с потайной головкой из нержавеющей стали	33	A2, A4
11	DLN 7981	Шуруп (саморез) ф4x12 с сверляющей головкой из нержавеющей стали	10	A2, A4
Материалы				
14		Устойчивый герметик		g/kz
УГВ-030000				
Разработчик: <i>Вольфович</i> / <i>11/17/02/18</i>			Лист 1 из 1	
Проверено: <i>1</i>			Лист 1 из 1	
Исполнитель: <i>УСБ</i>			Лист 1 из 1	
Бортовой отсос левый				

Рисунок 25 – Спецификация на бортовой отсос левый УГВ 030000

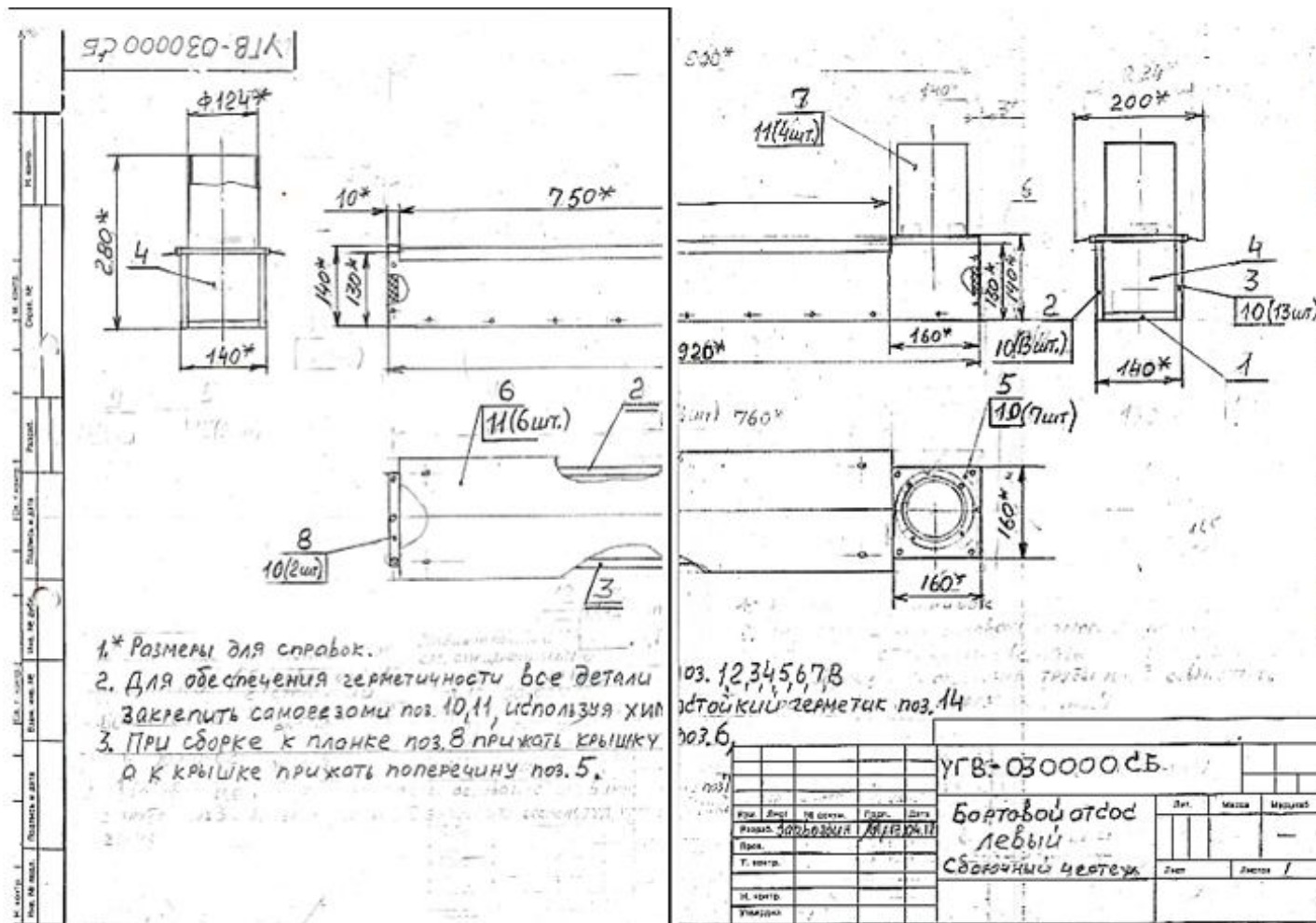


Рисунок 26 – Сборочный чертеж на левый бортовой отсос

УГВ – 030000 СБ

