

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
(МАИ)

На правах рукописи



Бараковский Федор Алексеевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУЙНОГО СПОСОБА
МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной
аппаратуры

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Ванцов Сергей Васильевич

Москва, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Анализ методов металлизации печатных плат и постановка задач исследования.....	14
1.1 Химическая металлизация диэлектрических оснований	14
1.2 Гальваническая металлизация	16
1.3 Прямая металлизация и системы активации поверхности	18
1.4 Струйное электроосаждение металлов	20
1.4.1 Физико-химические основы струйного электроосаждения.....	21
1.4.2 Оборудование и способы управления осаждением	23
1.4.3 Применение в микроэлектронике и производстве печатных плат	26
1.4.4 Направления развития и ограничения	28
1.5 Известные модели струйного электроосаждения и их ограничения	30
1.6 Нерешённые вопросы струйной металлизации печатных плат	38
1.7 Выводы по главе 1	39
Глава 2. Разработка струйного способа металлизации, установки для его реализации и схемы подготовки поверхности печатных плат	41
2.1 Струйный способ металлизации с подачей электролита снизу вверх.....	41
2.2 Экспериментальная проверка работоспособности способа	42
2.3 Экспериментальная установка и автоматизированный макет	45
2.3.1 Лабораторная установка	45
2.3.2 Автоматизированный макет установки	48
2.4 Равномерность толщины покрытия, получаемого на автоматизированном макете	53
2.5 Сравнительный анализ систем прямой металлизации	55
2.6 Качество металлизации сквозных отверстий при активации графитом и комплексом гипофосфита меди	60
2.7 Сравнительные испытания активаторов на тест-купонах	65
2.7.1 Объекты и средства исследования	65
2.7.2 Общая схема подготовки тест-купонов	67

2.7.3 Операции очистки и активации	67
2.7.4 Контроль состава электролита.....	72
2.7.5 Результаты первой серии испытаний.....	74
2.7.6 Уточнение методики активации и результаты второй серии испытаний	76
2.8 Выводы по главе 2.....	78
Глава 3. Исследование закономерностей струйного электроосаждения меди и модели распределения толщины покрытия.....	81
3.1 Предварительная оценка режима по теории затопленной струи	81
3.2 Модель распределения толщины покрытия по поверхности печатной платы	86
3.2.1 Исходные соотношения модели	86
3.2.2 Две гипотезы о распределении массоотдачи под струёй.....	87
3.2.3 Проверка гипотезы затопленной струи опытом с неподвижным соплом	88
3.2.4 Условия сохранения сечения незатопленной струи.....	95
3.2.5 Формирование сечения проводника при перемещении платы	98
3.3 Проверка модели методом рентгеновской компьютерной томографии	100
3.3.1 Образец и методика измерения.....	101
3.3.2 Выбор между гипотезами о распределении массоотдачи.....	103
3.3.3 Сопоставление расчётного и измеренного сечения проводника	104
3.3.4 Осаждение вблизи предельной диффузионной плотности тока	106
3.3.5 Граница осадка и ширина проводника.....	109
3.3.6 Режимы роста осадка и отклонение сечения от полуэллипса	113
3.3.7 Сплошность, однородность, адгезия и удельное сопротивление покрытия.....	116
3.3.8 Границы применимости модели	119
3.4 Модель распределения толщины покрытия в сквозных отверстиях печатной платы.....	120
3.4.1 Массообменное и омическое ограничения в сквозном отверстии	120

3.4.2 Течение электролита и предельная плотность тока в отверстии	121
3.4.3 Распределение тока по стенке отверстия и длина омического проникновения.....	122
3.4.4 Безразмерный параметр меднения	124
3.4.5 Расчёт толщины покрытия и продолжительности металлизации отверстия	126
3.4.6 Проверка модели по собственным и опубликованным данным	127
3.4.7 Эмпирическая зависимость толщины покрытия от глубины отверстия	129
3.4.8 Режим металлизации отверстий и согласование диаметра сопла	131
3.5 Выводы по главе 3	133
Глава 4. Методика расчёта режимов и технологический процесс струйной металлизации печатных плат	136
4.1 Методика расчёта технологических параметров и режимов.....	136
4.2 Автоматизированная система управления установкой	141
4.2.1 Структура и состав	142
4.2.2 Подготовка задания и режима	144
4.2.3 Расчёты, выполняемые до начала металлизации	150
4.2.4 Исполнение и требования безопасности.....	152
4.2.5 Расчёт толщины покрытия по фактической траектории.....	155
4.2.6 Ввод в работу на оборудовании.....	157
4.2.7 Проверка программного обеспечения.....	159
4.3 Технологический процесс струйной металлизации печатных плат	159
4.3.1 Подготовка заготовки к активации	161
4.3.2 Активация заготовки комплексом гипофосфита меди.....	161
4.3.3 Металлизация сквозных отверстий	162
4.3.4 Металлизация проводящего рисунка	163
4.4 Выводы по главе 4.....	164
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	166
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	173

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы и цели исследования

В производстве печатных плат (ПП) металлизация занимает особое место. Для неё разработано множество методов, но наибольшее распространение сегодня получили химическое и электрохимическое меднение, а также прямая металлизация.

Применяемый в большинстве отечественных предприятий процесс химического меднения включает восемь стадий и двенадцать промывок заготовок между ними и требует громоздкой гальванической линии минимум из шести ванн [1, 31]. Большие объёмы и сложный состав растворов затрудняют обслуживание таких линий и контроль растворов.

Прямая металлизация — более перспективная, но ещё недостаточно освоенная в России технология. Она включает пять стадий и семь промывок, однако недостатки химического меднения присущи и ей, поскольку прямая металлизация также выполняется в гальванических линиях.

При любом из этих процессов металлизация занимает значительную часть цикла производства печатных плат как по трудоёмкости, так и по времени.

На каждой стадии используются сложные и дорогостоящие растворы, часть которых не восстанавливается и после потери свойств заменяется новой. Контроль их параметров — одна из главных задач обслуживания гальванических линий, поэтому на предприятиях для этого существуют специализированные отделы.

Таким образом, при любом процессе гальванические линии имеют ряд недостатков:

- большие физические размеры гальванической линии и вызванные этим затраты на её эксплуатацию;
- необходимость содержать специализированное отделение для контроля растворов;
- большой объём растворов оборачивается таким же объёмом отходов и создаёт экологические проблемы.

Для крупносерийного производства эти недостатки оправданы, но для мелкосерийного они становятся серьёзным препятствием. Между тем к концу 2010-х годов основными производителями печатных плат в России [30] были мелкосерийные производства, чаще всего цеха предприятий, для которых печатные узлы — лишь часть основной продукции [31]. По данным отчёта Информационно-аналитического «Центра современной электроники» (ООО «СОВЭЛ») об исследовании российского рынка печатных плат за 2018 год существенную долю производителей печатных плат составляют мелкосерийные и единичные производства, причём мелкосерийное преобладает над остальными типами [33] (Рисунок 1). Из-за высокой стоимости современной гальванической линии и растворов мелкосерийные предприятия вынуждены покупать бывшее в употреблении оборудование и экономить на растворах, а это ухудшает качество металлизации. Между тем от него зависят паяемость проводящего рисунка, эластичность покрытия, его электрические параметры, равномерность и многие другие характеристики.

Поэтому **актуальной задачей** остаётся поиск технологических решений, которые сокращают цикл производства печатных плат, снижают его стоимость и уменьшают вред для окружающей среды.

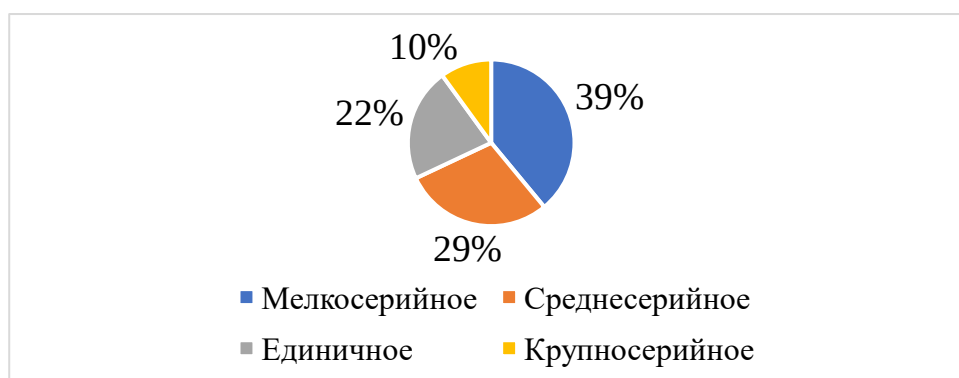


Рисунок 1 — Сегментация производителей ПП по типам производства

Степень разработанности темы. Селективное струйное электроосаждение известно с 1970-х годов [7]: изучены массообмен к струйному электроду [45] и распределение тока под одиночной круглой струёй [37], скорость и локализация осаждения при высоких плотностях тока [40], электрохимическая обработка струёй

электролита [57, 69]; для неподвижного сопла предложены модели скорости и высоты осаждения [66] с коэффициентами, подбираемыми по опыту [66]. Массообмен в зоне торможения соударяющейся струи описан корреляциями для затопленных струй [45, 68] и теорией струй со свободной поверхностью [61], полученными при зазорах не более шести диаметров сопла; распределение плотности тока под соплом в обзорной литературе принимается колоколообразным [69]. Металлизация сквозных отверстий описана моделями вторичного распределения тока для гальванических ванн [89, 92], экспериментально проверенными в проточной ячейке [90]; влияние натекающей струи на массообмен в сквозном отверстии изучено на модельной ячейке [91]; металлизация диэлектрика термическим разложением гипофосфита меди известна с конца 1970-х годов [5, 27, 28]. В опубликованных работах струя подаётся на деталь сверху вниз [40, 85, 98] и применяется для золочения контактов и выращивания микроформ; к изготовлению изделий электроники — разъёмов, печатных плат и узлов — относятся лишь единичные работы [40, 47]. Не описаны подача электролита снизу вверх и её влияние на ширину и форму осадка, не разработана модель толщины покрытия при перемещении платы относительно сопла, не рассматривалась металлизация сквозных отверстий печатной платы струёй во взаимосвязи с металлизацией проводящего рисунка. Поэтому струйный способ требуется разработать и исследовать — от моделей распределения толщины покрытия до технологического процесса.

Цель работы — обеспечение возможности селективного формирования проводящего рисунка и металлизации сквозных отверстий печатных плат в условиях мелкосерийного и единичного производства посредством разработки струйного способа локального электроосаждения меди при изготовлении печатных плат с подачей электролита снизу вверх.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **основные задачи**:

1. Проанализировать методы металлизации печатных плат и исследования по струйному электроосаждению.

2. Определить схему подготовки поверхности печатной платы, наиболее подходящую для струйного способа.

3. Разработать макет автоматизированной установки струйной металлизации с подачей электролита снизу вверх.

4. Установить закономерности локального электроосаждения меди при подаче электролита снизу вверх и перемещении заготовки относительно сопла.

5. Разработать математическую модель распределения толщины покрытия по поверхности печатной платы.

6. Разработать математическую модель распределения толщины покрытия в сквозных отверстиях печатной платы.

7. Разработать методику расчёта технологических параметров и режимов и реализовать её в программном обеспечении установки.

8. Разработать технологический процесс металлизации печатных плат струйным способом.

Объект исследования. Струйный способ металлизации печатных плат.

Предмет исследования. Закономерности локального электроосаждения меди при подаче электролита снизу вверх, распределение толщины осаждённой меди по поверхности печатной платы и в сквозных отверстиях при струйной металлизации, режимы и траектории струйной металлизации и технологический процесс металлизации печатных плат струйным способом.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Установлены закономерности локального электроосаждения меди при подаче электролита снизу вверх на поверхность печатной платы; показано, что при сохранении сечения свободной ламинарной струи и работе вблизи предельной диффузионной плотности тока ширина зоны осаждения определяется диаметром сопла, а формирование сечения проводника при сканировании описывается интегрированием локальной скорости осаждения по траектории перемещения.

2. Разработана математическая модель распределения толщины осаждённой меди по поверхности печатной платы, учитывающая движение заготовки

относительно зоны натекания струи, параметры траектории, ток, суммарное время осаждения, диаметр сопла и физико-химические свойства электролита, отличие которой от известных заключается в расчёте толщины проводника в сечении при движении детали относительно сопла без калибровки распределения толщины по результатам предварительного осаждения на каждой траектории.

3. Разработана математическая модель распределения толщины меди по длине стенки сквозного отверстия при струйной металлизации, отличающаяся совокупным учётом допустимой плотности тока, омического ограничения равномерности покрытия, свойств электролита, протяжённости отверстия.

4. Разработана методика расчёта режимов и траекторий струйной металлизации по данным проекта печатной платы, предусматривающая выбор количества проходов, шага сканирования, технологического тока и времени осаждения, а также предварительную проверку достижимости режима по диффузионному ограничению, зазору между соплом и осадком и риску замыкания соседних элементов рисунка.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии расчётных представлений о формировании медного покрытия при струйном электроосаждении на элементах печатной платы.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

— разработан технологический процесс струйной металлизации печатных плат с подготовкой поверхности на основе аммиачного комплекса гипофосфита меди, исключаящий фоторезист, экспонирование, проявление и гальванические ванны меднения;

— разработан макет автоматизированной установки струйной металлизации с подачей электролита снизу вверх;

— разработаны методика расчёта режимов и автоматизированная система управления установкой, рассчитывающая распределение толщины покрытия до

начала металлизации и выявляющая невыполнимые режимы и замыкания соседних элементов рисунка;

— результаты работы внедрены в работу ООО «СВВ» и учебный процесс МАИ.

Методы исследования. Проведённое исследование опирается на методы теоретической электрохимии, теории конвективного массообмена и гидродинамики струйных течений, теории вторичного распределения тока и теории цепей с распределёнными параметрами, математической физики, математической статистики и обработки результатов экспериментальных исследований, рентгеновской компьютерной томографии и металлографического анализа, а также натурного и имитационного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Струйное электроосаждение меди на предварительно активированной поверхности печатной платы с подачей электролита снизу вверх и перемещением заготовки относительно неподвижного сопла обеспечивает селективное формирование проводящего рисунка без применения фоторезиста и операций экспонирования; при сохранении сечения струи ширина формируемого проводника определяется диаметром сопла.

2. Разработанная математическая модель распределения толщины осаждённой меди по поверхности печатной платы при струйной металлизации, учитывающая ток и время металлизации, длину проводящего рисунка, диаметр сопла и свойства электролита, обеспечивает априорный расчёт толщины проводника с расхождением с измерением не более 2,2 % по средней толщине и площади сечения и не более 5 % по пиковой толщине.

3. Разработанная математическая модель распределения толщины осаждённой меди в сквозных отверстиях печатной платы при струйной металлизации, учитывающая протяжённость отверстия, свойства электролита, допустимую плотность тока и время металлизации, обеспечивает априорный

расчёт распределения толщины покрытия по глубине отверстия с погрешностью не более 9 % в границах применимости $\xi_{\text{Тк}} \leq 1,5$.

4. Методика расчёта технологических параметров и режимов струйной металлизации, реализованная в программном обеспечении автоматизированной установки, позволяет до начала процесса определить траектории перемещения, количество проходов, шаг заполнения широких элементов, прогнозное распределение толщины, условия недопустимого сближения соседних элементов и ограничения по зазору между соплом и растущим покрытием. На экспериментальных данных методика показала расхождение расчётных данных с реальными размерами полученных проводников около 2 %.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением серийного измерительного и технологического оборудования, обработкой томографических данных двумя независимыми способами, согласованностью разработанных математических моделей с экспериментальными данными, а также проведением контроля полученных образцов методами металлографии и компьютерной томографии.

Апробация результатов исследования:

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и конкурсах: 46-я Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения — 2020» (МАИ, Москва, 2020) [14]; 12-й Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики — 2020» (Москва, 2020; работа отмечена дипломом III степени и Почётной грамотой РКК «Энергия») [15]; XIX конкурс научных работ Всероссийского общества научных разработок ПТСайнс (2020; диплом III степени); 47-я Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения — 2021» (МАИ, Москва, 2021; диплом II степени) [16]; 20-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (МАИ, Москва, 2021) [17]; 14-й Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики — 2022» (Москва, 2022) [18]; V Международная научная конференция «Наука будущего» и VIII Всероссийский молодёжный

научный форум «Наука будущего — наука молодых» (Орёл, 2023) [19]; 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (МАИ, Москва, 2023) [20].

Соответствие паспорту научной специальности.

Диссертационная работа соответствует специальности научных работников 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры (технические науки) в отношении:

— разработки новых математических моделей технологических процессов изготовления радиоэлектронной аппаратуры, базирующихся на новых физико-технологических принципах, с учётом решения вопросов обеспечения их эффективного применения, способных стать базой алгоритмического и программного обеспечения проектирования (пункт 2);

— разработки и исследования новых технологических процессов получения традиционных материалов для радиоэлектронной аппаратуры, обеспечивающих эффективное применение на этапах проектирования и изготовления (пункт 3).

Личный вклад автора. Результаты, выносимые на защиту, получены автором лично:

— разработан струйный способ металлизации печатных плат с подачей электролита снизу вверх и перемещением заготовки относительно неподвижного сопла;

— разработан и изготовлен макет автоматизированной установки струйной металлизации, включая его программное обеспечение;

— проведены сравнительные испытания систем активации поверхности и обоснован выбор активатора на основе аммиачного комплекса гипофосфита меди;

— проведены эксперименты по струйной металлизации и выполнена обработка данных рентгеновской компьютерной томографии;

Публикации. За время работы над диссертацией опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 в рецензируемых изданиях Перечня ВАК [10, 12, 13], 1 в издании, индексируемом в международных реферативных базах данных Scopus и Web of Science [71], 7 в сборниках тезисов докладов научных конференций и конкурсов [14–20].

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 99 наименований; изложена на 185 страницах, содержит 20 таблиц и 95 рисунков.

Глава 1. Анализ методов металлизации печатных плат и постановка задач исследования

Металлизация отверстий и проводящего рисунка печатных плат выполняется в два этапа: на поверхности диэлектрика создаётся тонкий электропроводящий слой, который затем наращивается до требуемой толщины электрохимическим (гальваническим) осаждением меди. Проводящий слой традиционно получают химическим меднением; сравнительно недавно освоена его альтернатива — прямая металлизация, при которой проводящий слой создаётся без химического осаждения меди палладиевыми, углеродными или полимерными системами активации. В аддитивной технологии химическое меднение применяется также для наращивания проводников на полную толщину

1.1 Химическая металлизация диэлектрических оснований

Химическое меднение применяется в производстве ПП для получения тонкого (3–5 мкм) подслоя меди на стенках монтажных и переходных отверстий, чтобы сделать их диэлектрические поверхности токопроводящими, и в аддитивном методе — для получения токопроводящих участков способом селективного толстослойного (порядка 35 мкм) химического меднения непосредственно на диэлектрик. В качестве поясняющего примера рассмотрим схему процесса химической металлизации диэлектрической пластины аддитивным методом на Рисунке 2.

Химическая металлизация предназначена для получения металлического покрытия на непроводящем материале. Чтобы заготовку можно было металлизировать, её сенсibiliзируют и активируют.

Сенсибилизация — подготовительная операция, в ходе которой на поверхности диэлектрической пластины образуется плёнка двухвалентного олова (Sn^{2+}). При активации ионы олова восстанавливают ионы металла из раствора активатора.

Активация пластины проводится в растворах солей благородных металлов, как правило палладия, при температуре 40–50 °С в течение 5–7 мин. Активированная поверхность служит основой для последующего осаждения меди.

На поверхности платы в результате адсорбции и восстановления палладия образуется тонкая сетка частиц размером порядка 10 нм. Частицы палладия удерживаются на заготовке благодаря внедрению в поры диэлектрика и ковалентным связям с материалом подложки.

Для качественного сцепления необходимо, чтобы на поверхности диэлектрика было не менее $1 \cdot 10^{-6}$ кг/см² палладия.

Химическое осаждение меди представляет собой окислительно-восстановительный процесс, при котором ионы меди восстанавливаются из раствора на активированной поверхности без внешнего источника тока.

Главный показатель эффективности метода — скорость металлизации. Обычно её выражают отношением толщины осаждённого металла к затраченному времени, например в мкм/ч. Скорость можно определить и взвешиванием заготовки до и после металлизации по формуле:

$$w = \frac{m - m_0}{\rho S \tau}, \quad (1)$$

где w — скорость металлизации, m_0 — вес заготовки до начала металлизации, m — вес заготовки после металлизации, S — площадь металлизированной поверхности, ρ — плотность осаждаемого металла, τ — время осаждения.

Скорость осаждения металла при химической металлизации составляет 1 – 2 мкм/ч [34, 46].

Главное преимущество химического меднения — возможность металлизировать диэлектрические основания печатных плат и стенки отверстий. Осадок хорошо сцепляется с подложкой и распределяется равномерно, однако получается рыхлым и склонным к коррозии, поэтому требуется гальваническая затяжка.

Однако до наращивания металла необходимо выполнить ряд подготовительных операций.

Для этих операций нужно отдельное оборудование, поэтому линии химической металлизации имеют большие габариты (Рисунок 2).



Рисунок 2 — Линия химического меднения ПП

Кроме того, такие линии ресурсоёмки. Возникает и проблема утилизации отработанных растворов, поскольку их компоненты агрессивны и опасны для человека и окружающей среды.

Из-за этих недостатков химический метод нежелателен для производства, однако, несмотря на существование альтернатив, он всё ещё применяется в российской промышленности.

1.2 Гальваническая металлизация

В основе гальванической (электрохимической) металлизации [83] лежит перенос положительно заряженных ионов осаждаемого металла в водном растворе под действием электрического поля. Катодом служит сама печатная плата. Ионы металла движутся к катоду, присоединяют электроны и осаждаются на его поверхности. Схема гальванической ванны показана на Рисунке 3.

Восстановление меди: $\text{Cu}^{++} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^0$.

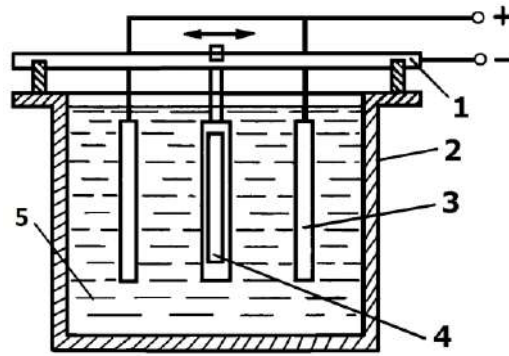


Рисунок 3 — Схема электрохимической металлизации

На Рисунке 3:

1. Катод.
2. Ванна.
3. Анод.
4. Металлизируемая заготовка.
5. Раствор электролита.

Масса осаждённого металла зависит от тока и времени и определяется законом Фарадея:

$$m = \frac{ItA}{nF}, \quad (2)$$

где m – масса металла, г; I – ток, А; t – время металлизации, с; A – атомный вес металла; n – число электронов, задействованных в восстановлении ионов металла; F – постоянная Фарадея (96 485 Кл/моль).

Гальваническое осаждение меди применяется:

- В изготовлении печатных плат методом прямой металлизации;
- После химического осаждения на диэлектрическую подложку;
- При работе с уже фольгированной заготовкой.

К слою электролитической меди предъявляются высокие требования:

- равномерность распределения по толщине;
- эластичность, исключая появление трещин и других дефектов при термоударах;
- электропроводность.

Стеклоэпоксидное основание двусторонних и многослойных печатных плат при нагреве в ходе изготовления, монтажа и эксплуатации расширяется по толщине, то есть вдоль металлизированного отверстия. Это растяжение, в зависимости от конструкции платы, может составлять от 1 до 1,7 %. Чтобы столб медного покрытия внутри отверстия выдержал это растяжение без разрыва, медь должна обладать достаточной пластичностью.

Гальваническая металлизация решила главную проблему химического процесса — очень низкую скорость формирования покрытия. Производство перешло на комбинированную схему: сначала на поверхности диэлектрика осаждается тонкий слой химической меди толщиной 1–2 мкм, а затем покрытие наращивается электрохимически. Приёмы гальванической металлизации используются и в методе прямой металлизации.

Благодаря своим преимуществам гальваническая металлизация сегодня — самый распространённый способ формирования проводящего рисунка печатных плат, и она продолжает развиваться. Её достоинства — простота процесса и возможность регулировать скорость металлизации плотностью тока.

Однако метод не исключает дефектов покрытия. Так, из-за неравномерного распределения силовых линий на краях платы и торцах контактных площадок образуется подгар. Загрязнение электролита и несвоевременная фильтрация приводят к неоднородности покрытия и образованию черных либо коричневых полос. К неполадкам приводит и избыток или недостаток добавок, а при плохой подготовке поверхности возможно даже отслаивание медного слоя [26].

1.3 Прямая металлизация и системы активации поверхности

Идея прямой металлизации [29] состоит в том, чтобы заранее создать сплошную электропроводящую плёнку, на которую затем осаждается гальваническое покрытие. Поверхностная проводимость плёнки должна быть достаточной для последующей электрохимической металлизации до стандартных толщин.

В этом случае химическое осаждение меди для получения проводящей плёнки не требуется. Прямую металлизацию используют примерно 30–40 % зарубежных производителей печатных плат, а в отечественной промышленности — не более 10 %.

Для создания электропроводности применяются четыре основных вида систем прямой металлизации:

- Коллоидная система, содержащая палладий;
- Система на основе графита;
- Процесс, основанный на осаждении токопроводящих полимеров [80];
- Другие.

Системы каждого вида имеют свои преимущества и недостатки [22, 23]. Палладиевые системы требуют дорогостоящего металла, что ограничивает область их применения. Углеродные системы прямой металлизации имеют меньшую стоимость и короткий процесс обработки, но обеспечивают меньшую адгезию. Полимерные системы позволяют наносить активатор селективно, только на диэлектрик, однако сложны в применении: раствор подвержен старению, а средства его контроля и утилизации не отработаны.

Общие преимущества и недостатки существующих систем прямой металлизации приведены в Таблице 1.

Исходя из проведённого анализа, для дальнейшего исследования отобраны графитовая система и система на основе аммиачного комплекса гипофосфита меди [5, 27, 28]; выбор между ними сделан по результатам испытаний (разделы 2.5–2.7).



Рисунок 4 — Место прямой металлизации в цикле производства ПП

Таблица 1 — Преимущества и недостатки систем прямой металлизации

Тип	Палладиевый активатор	Активатор на основе графита	Активатор на основе проводящих полимеров

Плюсы	+ Относительно высокая электропроводность + Высокая адгезия	+ Низкая стоимость + Нет проблем в эксплуатации + Короткий процесс обработки детали	+ Селективно наносятся на диэлектрические поверхности + Высокая адгезия + Высокая электропроводность
Минусы	– Высокая стоимость – Дegradiрует при контакте с водой	– Меньшая адгезия по сравнению с другими типами активаторов – Средняя электропроводность	– Высокая стоимость – Быстро портится – Трудоемкий процесс обработки

1.4 Струйное электроосаждение металлов

Электрохимическая струйная обработка [12, 43] объединяет технологии, в которых заготовка изменяется на заданных участках под локальным воздействием струй электролита, без термического или механического воздействия на основной материал. Струйные технологии применяются для избирательного удаления и нанесения материала: создания микролунок и канавок, обработки больших поверхностей и локального нанесения металлических покрытий.

Для производства электроники особый интерес представляет струйная металлизация благодаря следующим возможностям:

1. Нанесение металлических дорожек точно в нужных местах без масок, фоторезиста и многослойной литографии, что особенно актуально для прототипирования и мелкосерийного производства;

2. Металлизация гибких печатных плат или поверхностей со сложной топологией, где традиционные методы малоэффективны;

3. Замена нескольких этапов традиционного производства (нанесение резиста, экспонирование, проявление, травление и т.д.) одним процессом, управляемым цифровыми средствами.

Объединение различных методов локальной обработки поверхности на одной платформе позволяет получать металлизацию нестандартной геометрии.

По данным Google Scholar, число публикаций по струйной металлизации с 2005 по 2025 год растёт (Рисунок 5), что говорит об актуальности этой технологии для производства электроники.

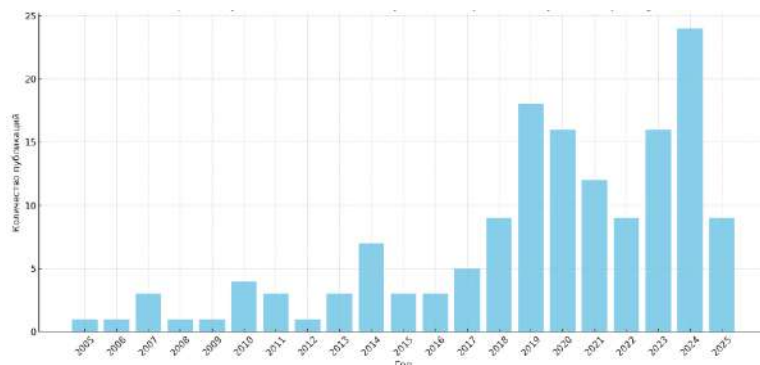


Рисунок 5 — Собранные данные из Google Scholar с 2005 по 2025 год (данные собраны по май 2025) по ключевым словам “jet electrodeposition” и “jet electroplating”

Однако применению струйного электроосаждения непосредственно в производстве печатных плат и узлов посвящены лишь три известные работы, опубликованные начиная с 2001 года [40, 47, 62]. Принципы технологии, примеры её применения, а также её преимущества и недостатки нуждаются в систематизации.

1.4.1 Физико-химические основы струйного электроосаждения

Процессы струйного электроосаждения подчиняются тем же электрохимическим принципам, что и классическое электроосаждение. При подаче напряжения между соплом и деталью на металлизированной детали идёт катодная реакция — восстановление металла из раствора электролита:

$$\frac{m}{t} = \frac{IM}{FZ}, \quad (3)$$

где m — масса осаждённого вещества, I — электрический ток, протекающий через струю, t — время осаждения, M — молярная масса осажденного вещества, F — постоянная Фарадея ($96\,485 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$), Z — валентность осаждаемых ионов.

При пропускании тока между анодом и катодом возникает скачок потенциала — диффузионная поляризация. Она вызвана замедленным подводом разряжающихся ионов металла из электролита к электроду [36] и приводит к образованию диффузионного слоя, ограничивающего восстановление меди на детали (Рисунок 6).

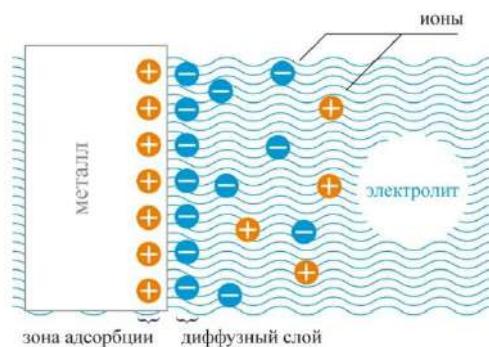


Рисунок 6 — Появление диффузионного слоя при электрохимической металлизации

При возникновении такого эффекта плотность тока на катоде определяется выражением:

$$i_k = \frac{ZFD(C_0 - C)}{\delta}, \quad (4)$$

где i_k — плотность тока, δ — толщина возникшего диффузионного слоя, D — коэффициент молекулярной диффузии, F — постоянная Фарадея (96 485 Кл·моль⁻¹), Z — валентность осаждаемых ионов, $(C_0 - C)$ — концентрации ионов металла в общем объеме и вблизи поверхности электрода.

С ростом тока концентрация C у поверхности электрода уменьшается и в пределе становится пренебрежимо малой. Тогда:

$$i_{\text{пр}} = \frac{ZFDC_0}{\delta}, \quad (5)$$

где $i_{\text{пр}}$ — предельная плотность тока.

Из выражения (5) видно, что предельная плотность тока обратно пропорциональна толщине диффузионного слоя, и при $\delta \rightarrow 0$ может расти неограниченно.

Если в стационарных гальванических ваннах величина $i_{\text{пр}}$ ограничена диффузионными процессами, то в струйном электроосаждении толщина диффузионного слоя уменьшается с ростом скорости потока. Так, повышение скорости потока с $Re = 500$ до $Re = 1000$ уменьшает толщину диффузионного слоя с 1 до 0,1 мм [66]. В экспериментальных исследованиях достигалась рабочая плотность тока 200–2000 А/дм², тогда как для стационарных гальванических ванн характерна плотность тока 3–4 А/дм².

Фактическая эффективность осаждения зависит также от побочных реакций (например, выделения водорода), особенно при высоких плотностях тока. В гидродинамическом режиме струйной металлизации выход по току может быть высоким благодаря локализации процесса и быстрому удалению продуктов реакции из зоны струи [69].

Сочетание электрохимии с гидродинамикой струйного потока делает струйную металлизацию гибким инструментом для создания покрытий сложной геометрии и микроструктур.

1.4.2 Оборудование и способы управления осаждением

Струйная металлизация позволяет осаждать металл локально с высоким разрешением, вплоть до микро- и субмиллиметровых масштабов. Перемещая сопло, можно металлизировать заданные траектории на поверхности детали, нанося покрытие только в нужных зонах. В отличие от традиционного гальванического покрытия, которое наносится на всю погружённую деталь, при струйной обработке область осаждения ограничена размером струи.

Типовая система струйного электроосаждения включает следующие компоненты (Рисунок 7):

- насос, обеспечивающий циркуляцию электролита; сопло, через которое формируется направленный поток;
- фильтр [81] (опционально);
- система дистанционного управления соплом (опционально);

- блок питания;
- анод (часто располагается внутри сопла);
- катод (обрабатываемая поверхность);
- система сбора и возврата электролита.

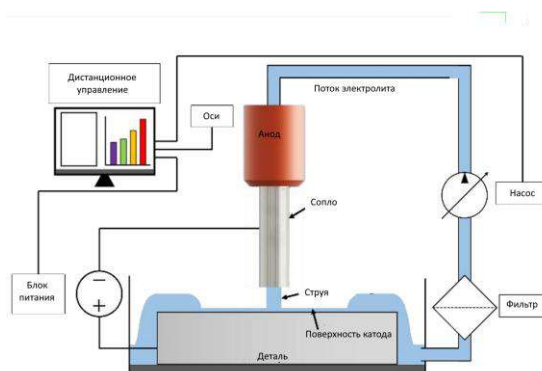


Рисунок 7 — Типовая система струйной металлизации [66]

Электролит под давлением подаётся к соплу и выходит из него струёй, направленной на участок поверхности; в зоне контакта с деталью металл осаждается. Все элементы, кроме рабочих поверхностей, должны быть химически стойкими и электрически изолированными, чтобы избежать побочной металлизации.

Геометрия сопла напрямую влияет на форму, размер и интенсивность зоны осаждения. Наиболее распространены сопла круглого сечения диаметром от 100 мкм до нескольких миллиметров. Растекаясь по поверхности, поток электролита образует так называемую пристенную радиальную струю, которая обеспечивает локализацию тока и интенсивный массообмен (Рисунок 8). Расстояние между соплом и катодной поверхностью определяет распределение плотности тока и, вместе с ней, форму осадка. Геометрически оптимизированные сопла позволяют добиться узкого пятна осаждения и минимизировать паразитные отложения за пределами зоны обработки [60].

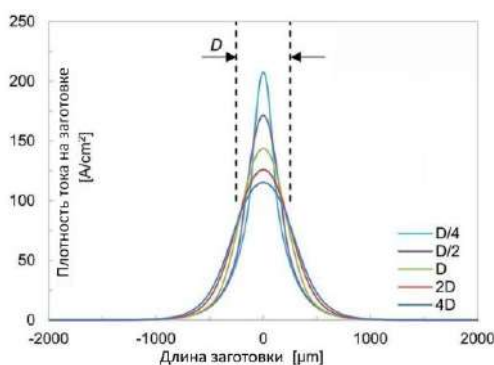


Рисунок 8 — Распределение тока на заготовке при разном диаметре сопла D [37]

Чтобы получить осадок требуемого качества, в практическом электроосаждении почти всегда вводят в электролит специальные химические добавки. Струйные процессы не исключение: органические добавки (поверхностно-активные вещества, соединения серы, углерода и др.) позволяют управлять структурой и морфологией осадка.

Различают два связанных эффекта добавок — выравнивание покрытия и модификацию кристаллизации. Выравнивание достигается тем, что добавки выборочно адсорбируются на выступающих микронеровностях и подавляют там восстановление металла, поэтому осаждение идёт преимущественно в углублениях. Концентрация добавок на порядки ниже концентрации ионов металла, их подвод лимитирован диффузией, и они накапливаются на наиболее выступающих участках катода [55]. Модификация кристаллизации состоит в измельчении зерна, снижении пористости и изменении текстуры осадка [55]. В промышленной гальванотехнике выравнивающие и блескообразующие добавки применяются повсеместно. В струйном электроосаждении они столь же необходимы для получения плотных покрытий с малой шероховатостью [55].

Наряду с добавками микроструктурой осадка управляют импульсным режимом [42]. В паузах между импульсами ионы металла успевают подойти к поверхности из объёма струи, поэтому импульсный ток позволяет работать при более высоких средних плотностях тока без ионного истощения, а чередование катодных и анодных импульсов растворяет новообразованные микровыступы и препятствует росту дендритов [42]. Изменением скважности управляют

соотношением зарождения и роста кристаллитов вплоть до ультрамелкого зерна и упрочнения осадка [55]. Так, при струйном осаждении никеля импульсный режим (скважность 50 %, 5 кГц) повысил микротвёрдость и коррозионную стойкость покрытия по сравнению с постоянным током [75].

Для повышения точности и селективности используют маски из диэлектрика или металла с отверстиями нужной формы; они ограничивают зону осаждения даже при относительно широкой струе. Зоной осаждения управляют и динамически — программным перемещением сопла, расходом электролита и импульсным режимом подачи тока. Так, в работе [72] реализовано электрохимическое прямое письмо с формированием структур размером порядка 100 мкм (Рисунок 9).

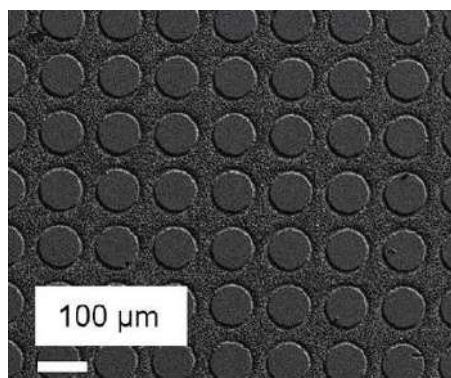


Рисунок 9 — Формирование микровыступов с помощью струйной металлизации с наложением маски из фоторезиста и использованием сопла 2 мм [74]

1.4.3 Применение в микроэлектронике и производстве печатных плат

Одно из главных преимуществ струйной технологии в микроэлектронике — нанесение покрытия строго в заданных координатах, без обработки всей поверхности. Так создают проводящие дорожки, контактные площадки и межсоединения на подложках произвольной формы, включая гибкие и трёхмерные. Толщиной слоя, морфологией поверхности и микроструктурой покрытия управляют параметрами процесса: напряжением, скоростью струи, составом электролита и режимом тока (Рисунок 10).

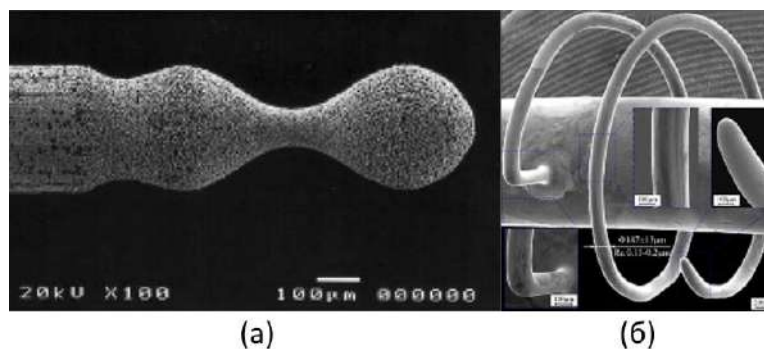


Рисунок 10 — Примеры микроформ, полученных с помощью струйной металлизации. Обработанный с помощью импульсного режима металлизации металлический стержень (а) [55] и аддитивно изготовленная никелевая спираль (б) [64] [59]

Даже без масок струя диаметром 1–2 мм осаждает материал на ограниченном участке, поэтому способ применяют для покрытия небольших участков деталей, ремонта локальных дефектов и аддитивного получения микроскопических металлических конструкций.

Селективное струйное электроосаждение рассматривается как один из подходов к 3D-печати металлами [73] на микроуровне. Gu и соавт. (2024) создали настольный струйный 3D-принтер, который послойно выращивает медные микроструктуры со скоростью около 53,4 мкм/ч при шероховатости поверхности около 1,1 нм (Рисунок 11) [51]. Микротвёрдость полученных структур (около 3,3 ГПа) выше, чем у осадков, полученных другими методами электроосаждения (до 2,4 ГПа) [51]. Этот результат показывает возможности струйной технологии для прямой «печати» элементов электроники и микромеханических устройств.

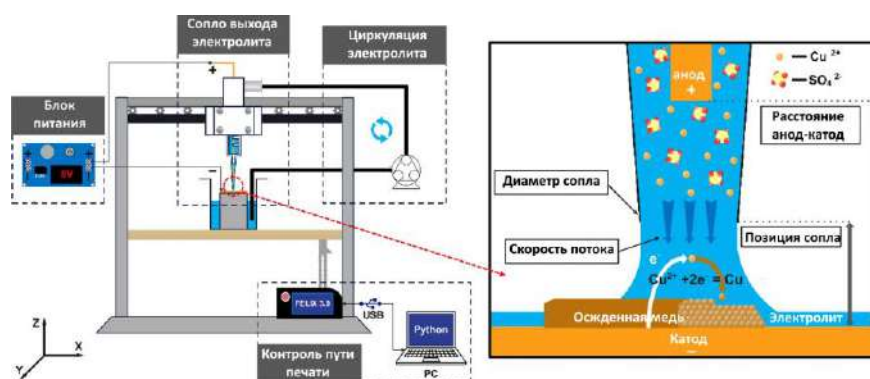


Рисунок 11 — Схема 3D принтера по принципам технологии струйной металлизации

Селективность струйной металлизации позволяет наносить проводящие дорожки на печатную плату напрямую, без нанесения фоторезиста и травления лишней меди; экспериментально получены дорожки длиной 1000 мкм [57] (Рисунок 12). Вместе с интенсификацией осаждения это сокращает цикл производства печатных плат на несколько операций, поэтому применение струйного способа — актуальное направление исследований.

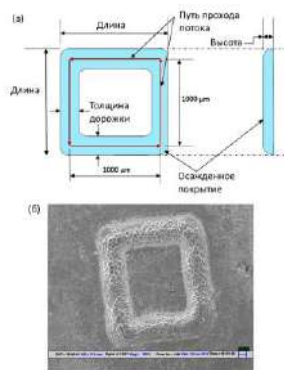


Рисунок 12 — Путь потока электролита и предполагаемый проводящий рисунок (а). Изображение проводящего рисунка, полученного с помощью растрового электронного микроскопа (б) [57]

1.4.4 Направления развития и ограничения

Развитие технологии идёт по нескольким направлениям. Первое — объединение операций на единой струйной платформе, когда одна установка выполняет локальное анодное травление, катодное осаждение и контроль

металлизации [67]. Второе — повышение автоматизации и интеграция с системами мониторинга и адаптивного управления по принципам Индустрии 4.0 [69]. Третье — производительность и разрешающая способность: щелевые сопла покрывают за проход большую площадь, фокусировка потока позволяет получать струи диаметром в десятки нанометров, разрабатываются методы измерения зазора и состояния поверхности непосредственно в ходе осаждения. Главным преимуществом способа остаётся расход реагентов только в малой зоне обработки, что делает его экономичным и экологичным в мелкосерийном и единичном производстве.

Наряду с преимуществами струйное электроосаждение имеет ограничения. Как и любой электрохимический процесс, оно требует проводящей поверхности, поэтому диэлектрик можно покрыть только после нанесения проводящего слоя. Струя должна быть устойчивой. Струи тоньше 1 мкм можно получить, например, фокусировкой потока газом [48], но при ударе о поверхность они не образуют устойчивого пристенного течения, распыляются и теряют локализацию [39]. Практический предел диаметра струи составляет несколько десятков микрометров [39], и для дальнейшего повышения разрешения нужны маски.

Производительность ограничена законом Фарадея, поскольку скорость наращивания металла определяется электрохимическим эквивалентом и растёт только с увеличением полного тока. Поэтому струйные методы выигрывают в селективности и точности, но не в производительности при сплошном покрытии больших площадей и целесообразны для тонких локальных покрытий, микроаддитивного производства и ремонта. К практическим ограничениям относятся износ и засорение сопла, необходимость точно выдерживать зазор и перпендикулярность сопла к поверхности, а также чувствительность режима к пульсациям расхода и изменению вязкости электролита.

1.5 Известные модели струйного электроосаждения и их ограничения

Селективное струйное электроосаждение предложено Флетчером и Оливером [7] в 1972 г. для быстрого гальванического покрытия отдельных участков. Затем метод развился в высокоскоростное селективное струйное электроосаждение (HSSJE, от англ. high-speed selective jet electrodeposition), применяемое для изготовления микроэлементов [49, 59]. В HSSJE струя электролита, выбрасываемая под высоким давлением из сопла, ударяется о поверхность катода (заготовки) [49]. Между соплом и рабочей поверхностью оставляют зазор 1–5 мм; разность потенциалов между анодом и катодом создаёт ток через струю электролита. Плотность тока поддерживают в пределах от 13,26 мА/мм² до 56,8 мА/мм² [49].

Используется электролит высокой проводимости, содержащий ионы осаждаемого металла. Относительное перемещение рабочей поверхности и струи задаётся компьютерной системой управления, и деталь металлизирована послойным осаждением [49]. Процесс HSSJE применялся для изготовления микроформ, инструментов для микроэрозионной обработки и микродеталей.

Математическая модель и численный алгоритм для двумерной струи электролита, падающей на плоскую поверхность, разработаны Ли и Уолкером [60]; модель не учитывает изменения границы осадка и применима при токах много ниже предельного. Козак и др. [57] построили двумерную модель электрохимической струйной обработки с подвижной анодной границей для расчёта скорости съёма материала. Алкир и Чен [37] исследовали высокоскоростное осаждение круглыми струями и получили медное покрытие из подкисленного сульфатного раствора [54], предложив модель распределения тока и потенциала на поверхности подложки; изменение границы осадка в ней также не учитывается.

Взаимное расположение сопла, струи электролита и рабочей поверхности и зоны модели HSSJE показаны на Рисунке 13. Течение несжимаемой жидкости, выходящей из сопла и натекающей на поверхность, делится на четыре зоны:

центральную (а), свободного потока (b), застоя (с) и радиального потока (d). Модель HSSJE построена при следующих допущениях:

1. Площадь поперечного сечения остается неизменной по всей длине струи и принимается равной площади отверстия сопла.
2. Струя осесимметрична, то есть её свойства не зависят от угла поворота вокруг оси (Рисунок 13).
3. Электролит течет радиально после удара о поверхность катода.
4. Рабочая поверхность изначально плоская.
5. Электропроводность электролита остается постоянной для всех экспериментов, поскольку концентрация H_2SO_4 постоянна, а изменение концентрации ионов металла не настолько велико, чтобы существенно влиять на проводимость.
6. Профиль струи электролита при течении не меняется.
7. Оба электрода неполяризуемые.

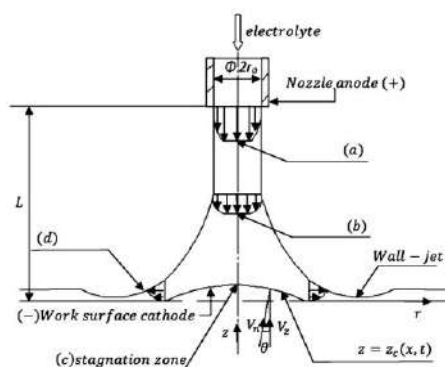


Рисунок 13 — Схема процесса струйной металлизации

Описываемая модель [66] доработана учётом изменения границы катода вследствие осаждения меди за промежуток времени dt и представляется наиболее проработанным из известных описаний струйной металлизации.

Скорость осаждения определяется законом Фарадея [44]:

$$\text{Скорость осаждения} = \frac{m}{t} = \frac{IM}{FZ},$$

где m — масса осаждённого вещества, I — электрический ток, протекающий через струю, t — время осаждения, M — молярная масса осажденного вещества, F — постоянная Фарадея ($96\,485 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$), Z — валентность осаждаемых ионов.

Плотность тока J_c на катоде и среднее значение плотности тока J_{avgc} , протекающего через электролит к поверхности катода, зависят от градиента электрического потенциала у катода и находятся из закона Ома:

$$\vec{j}_c = k_{el} \vec{E}_c, \quad (6)$$

$$\vec{j}_{avgc} = k_{el} \vec{E}_{avgc}, \quad (7)$$

где k_{el} — электропроводность электролита, E_c — градиент электрического потенциала на катоде, а E_{avgc} — средний градиент потенциала на поверхности катода. Градиент электрического потенциала на катоде записывается как:

$$\vec{E}_c = |\nabla u|_c, \quad (8)$$

где u — потенциал в электролитном пространстве. Силовые линии электрического поля всегда выходят из проводящей поверхности или входят в неё по нормали [9], поэтому на катоде они перпендикулярны поверхности. Поскольку поверхность катода плоская, средний градиент потенциала E_{avgc} на катоде можно определить по формуле:

$$\vec{E}_{avgc} = \sum_{i=1}^n \frac{\vec{E}_{ic}}{n} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (9)$$

где n — количество узлов сетки на поверхности катода.

В процессе HSSJE толщина диффузионного слоя над катодом очень мала по сравнению с расстоянием между соплом (анодом) и поверхностью осаждения (катодом). Струя ведёт себя как проводящая среда, через которую протекает постоянный ток, поэтому распределение потенциала u в пространстве струи электролита описывается соотношением [60]:

$$\nabla * (k_{el} \nabla u) = 0. \quad (10)$$

В осесимметричной системе координат (Рисунок 14) уравнение распределения электрического потенциала принимает вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0, \quad (11)$$

а граничные условия над рассматриваемой областью (Рисунок 14) имеют вид:

$u=U_0$ на аноде (FE);

$u=0$ на катоде (AB);

$\partial u / \partial n$ равно нулю на BC, CD, DE и FA.

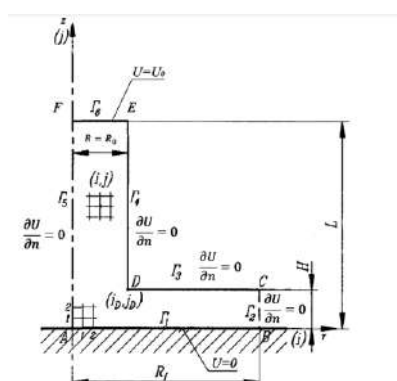


Рисунок 14 — Область решения с граничными условиями.

Электролит в процессе HSSJE содержит H_2SO_4 и $CuSO_4 \cdot 5H_2O$; концентрация H_2SO_4 во всех опытах постоянна (1 моль/л), а концентрация $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ варьируется. К катоду подходят и восстанавливаются ионы H^+ и Cu^{2+} : ионы Cu^{2+} осаждаются, а ионы H^+ образуют газообразный водород. Поэтому в осаждении участвует только ток, переносимый ионами Cu^{2+} . Из-за двойной валентности ион Cu^{2+} несёт вдвое больший заряд, чем ион H^+ , и при одинаковой концентрации переносит вдвое больший ток. С учётом условий опытов HSSJE средняя плотность тока на катоде записывается как:

$$\vec{j}_{avg}^{Cu^{2+}} = k_{Cu^{2+}} k_{el} \vec{E}_{avg}, \quad (12)$$

где $k_{Cu^{2+}}$ — постоянная, равная удвоенной доле ионов меди среди положительных ионов (принимая вместе H^+ и Cu^{2+} за 100 %) в растворе, k_{el} — проводимость электролита, а $\vec{j}_{avg}^{Cu^{2+}}$ — средняя плотность тока, обусловленная

переносимым ионами зарядом Cu^{2+} . Тогда скорость осаждения находится из закона Фарадея:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} = \frac{A_r \vec{j}_{avg}^{\text{Cu}^{2+}} M}{FZ}, \quad (13)$$

где A_r (πr_d^2) — площадь осаждения, r_d — расстояние от оси струи, в пределах которого усредняется градиент потенциала для расчёта средней плотности тока. Тогда:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} = \frac{A_r k_{\text{Cu}^{2+}} k_{el} \overrightarrow{E_{avg}} M}{FZ} \quad (14)$$

Или:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} = \frac{A_r k_{\text{Cu}^{2+}} k_{el} (\sum_{i=1}^n \frac{\overrightarrow{E_{ic}}}{n}) M}{FZ} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

Это уравнение даёт количество ионов Cu^{2+} , восстанавливающихся на поверхности катода. Однако не все восстановленные ионы остаются на поверхности: значительная часть металлической меди Cu_{solid} уносится электролитом из-за гидродинамического режима в зоне соударения, и на катоде осаждается лишь часть восстановленного металла. Фактическая скорость осаждения значительно ниже теоретической, что связывают с гидродинамическими условиями. Чтобы учесть эти эффекты, в модель введён постоянный множитель, и скорость осаждения принимает вид:

$$\dot{m}^* = k_d \dot{m}, \quad (16)$$

где k_d — постоянная осаждения. Следовательно:

$$\dot{m}^* = \frac{A_r k_d k_{\text{Cu}^{2+}} k_{el} (\sum_{i=1}^n \frac{\overrightarrow{E_{ic}}}{n}) M}{FZ} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (17)$$

Осаждение меди со временем изменяет форму поверхности катода (Рисунок 13). Скорость движения катодной границы вдоль оси z записывается как [57]:

$$\frac{\partial z_d}{\partial t} = V_z = \frac{V_n}{\cos\theta}, \quad (18)$$

где V_n — скорость движения границы осаждения над катодом и угол между нормалью к поверхности осаждения (катоду) и осью z и из Рисунка 14.

$$\frac{1}{\cos\theta} = V_n \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_d}{\partial r}\right)^2}. \quad (19)$$

Можно раскрыть уравнение:

$$\frac{\partial z_d}{\partial t} = V_n \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_d}{\partial r}\right)^2}. \quad (20)$$

На заготовке (катод): $z = z_d(r, t)$, $u = 0$ и начальное условие в процессе определяется как $t = 0$, $z = z_d(r, 0) = 0$

На малых интервалах времени границы при расчёте распределения потенциала в электролите можно считать неподвижными. Найденное распределение используется для определения нового положения катодной границы, по которому затем рассчитываются потенциал и граница на следующем интервале.

С учётом влияния концентрации ионов Cu^{2+} на осаждение и ионов, прилипающих к поверхности подложки, скорость движения границы катода в каждой точке сетки выражается так:

$$\frac{\partial z_d}{\partial t} = \frac{C_h k_d k_{\text{Cu}^{2+}} k_{el} |\nabla u|_{c_i} M}{FZ\rho} \sqrt{1 + \left(\frac{\partial z_d}{\partial r}\right)^2}, \quad (21)$$

где C_h — константа, определяющая долю осадка, приходящуюся на данную точку сетки. Часть ионов металла осаждается не в зоне удара, а в других местах на пути течения электролита. Центральная разностная аппроксимация производной $\partial z_d / \partial t$:

$$\left(\frac{\partial z_d}{\partial r}\right)_i \approx \frac{z_{d(i+1)} - z_{d(i-1)}}{2\Delta R}, \quad (22)$$

где ΔR — шаг сетки между двумя узловыми точками равномерно расположенной сетки области решения.

Новое положение границы катода после временного шага находится разложением, в котором индекс k соответствует положению поверхности катода до этого шага:

$$z_{d(i,k+1)} \approx z_{d(i,k)} + \Delta t \left(\frac{\partial z_d}{\partial r}\right)_{i,k} + \frac{C_h k_d k_{Cu^{2+}} k_{el} |\nabla u|_{c_{i,k}} M}{FZ\rho} \sqrt{1 + \left(\frac{z_{d(i+1)} - z_{d(i-1)}}{2\Delta R}\right)^2 \Delta t} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (23)$$

В последнее время появляется все больше исследований с применением струйного метода металлизации, однако практически все публикуемые исследования направлены на никелирование одиночных образцов.

Доработанная модель показала хорошую сходимость с данными экспериментов (до 10,11 %), однако в модели введены коэффициенты C_h и k_d , подбираемые отдельно для определенных условий эксперимента. По предположению авторов, эти коэффициенты учитывают влияние гидродинамического режима, который в модели не рассматривается; поэтому распределение потенциала на поверхности катода в модели получается равномерным (Рисунок 15).

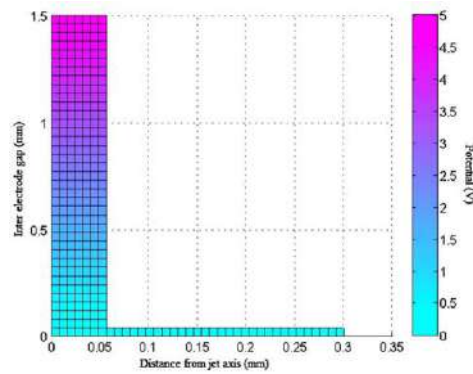


Рисунок 15 — Распределение потенциала в потоке электролита между анодом и катодной поверхностью

Однако исследования показали, что плотность тока, от которой напрямую зависит скорость осаждения меди, уменьшается по мере удаления от оси струи, падающей на деталь (Рисунок 16).

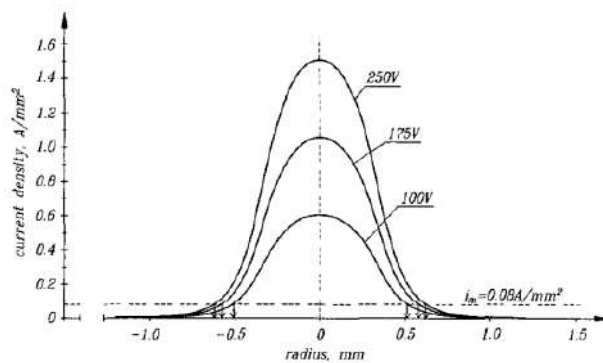


Рисунок 16 — Распределение плотности тока на анодной поверхности при разной разности потенциалов между анодом и катодом

Это согласуется с данными работы [66], где градиент потенциала на поверхности катода распределён так же (Рисунок 17).

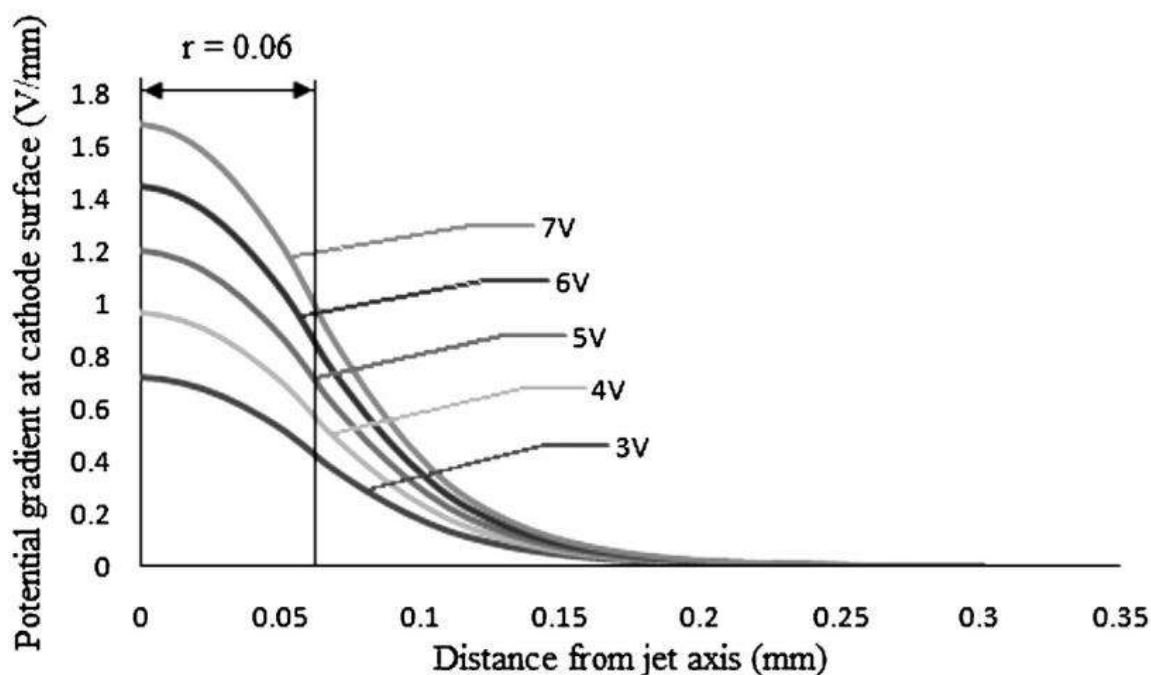


Рисунок 17 — Распределение градиента потенциала на катодной поверхности при различном потенциале анода

Из-за такого распределения металл осаждается на заготовке неравномерно, а на оси струи плотность тока может достигать критических значений и ухудшать качество металлизации.

1.6 Нерешённые вопросы струйной металлизации печатных плат

В последнее время появляется все больше исследований с применением струйного метода металлизации, однако практически все публикуемые исследования направлены на никелирование одиночных образцов.

Обзор литературы показывает, что попыток моделировать струйное электроосаждение предпринято очень мало [37, 57, 60]. Моделей для толстых покрытий при изготовлении микродеталей с учётом движущейся катодной границы, по-видимому, нет. Для сквозных отверстий печатных плат при струйной подаче известна одна работа [91], в которой массообмен в одиночном отверстии под неподвижной струёй, подаваемой сверху, изучен на модельной системе без осаждения металла, а распределение тока рассчитано численно.

Доработанная модель [66] прогнозирует скорость и высоту осаждения, а рассчитанные скорости и их тенденции согласуются с экспериментальными данными. Однако в ней не учтены движение сопла относительно металлируемой заготовки и металлизация неплоских поверхностей (отверстий и впадин).

Поэтому настоящее исследование направлено на развитие модели струйного электроосаждения применительно к металлизации печатных плат, включая сложный проводящий рисунок и сквозные отверстия.

1.7 Выводы по главе 1

Химическое и электрохимическое меднение выполняются в гальванических линиях из многих ванн, требуют постоянного контроля растворов и утилизации отходов. В мелкосерийном и единичном производстве печатных плат затраты на такую линию не окупаются и вынуждают экономить в ущерб качеству металлизации.

Из рассмотренных схем металлизации отверстий для мелкосерийного производства наиболее подходит прямая металлизация: она исключает химическое меднение, сокращает число операций и объём оборудования. Поэтому подготовка поверхности в разрабатываемом способе строится на схеме прямой металлизации, а активатор выбирается экспериментально.

Струйное электроосаждение позволяет наносить медь только на участки проводящего рисунка, без фоторезиста, экспонирования и травления, и за счёт интенсивного массообмена в зоне натека струи допускает плотности тока, значительно превышающие применяемые в ванне. Число работ по струйному электроосаждению растёт, однако они посвящены преимущественно золочению контактов, выращиванию микроформ и композиционным покрытиям; к изготовлению печатных плат способ применялся лишь в единичных работах.

Однако в исследованиях струйного метода металлизации существуют пробелы: известные модели построены для неподвижного сопла и плоской поверхности, струя подаётся на деталь сверху вниз, металлизация сквозных

отверстий печатных плат при струйной подаче изучена на уровне массообмена, на модельной системе без осаждения металла, а распределение плотности тока под соплом принимается колоколообразным без экспериментальной проверки для потока электролита в воздухе. Эти пробелы определяют задачи работы: разработать способ с подачей электролита снизу вверх и установку для его реализации, выбрать схему активации, построить модели распределения толщины покрытия по поверхности и в сквозных отверстиях и на их основе — методику расчёта режимов и технологический процесс.

Глава 2. Разработка струйного способа металлизации, установки для его реализации и схемы подготовки поверхности печатных плат

2.1 Струйный способ металлизации с подачей электролита снизу вверх

Чтобы решить проблемы металлизации печатных плат в гальванических линиях, предлагается новый способ струйной металлизации. Заготовка поочерёдно обрабатывается непрерывным рециркулирующим потоком нужного раствора. Системы ванн не используются, обработка идёт в одной камере, из которой растворы сразу стекают по трубам в резервуары-накопители системы рециркуляции.

Помимо отсутствия ванн способ даёт ряд преимуществ перед металлизацией в полноразмерных гальванических линиях: кондиционирование, промывка, активация и металлизация выполняются в одном устройстве; объём используемых растворов сокращается, что выгодно экономически и экологически; контроль состояния растворов упрощается, создавая предпосылки для автоматизации. Ещё одно свойство, принципиально недоступное гальваническим линиям, — селективность: технолог задаёт рабочее сечение, расход и геометрию металлизации.

Медь осаждается с одинаковой эффективностью как при небольшой площади контакта электролита с объектом, так и при полном погружении объекта в электролит [66].

На Рисунке 18 изображена схема струйного способа металлизации. Электролит подаётся насосом по системе труб к соплу и формирует струю, направленную снизу вверх на участок платы; медь осаждается в зоне натекания струи. Плата, служащая катодом, перемещается над неподвижным соплом по программе, поэтому покрытие наносится только вдоль заданного рисунка, а разрешающая способность определяется диаметром сопла.

На рисунке 18:

1. Печатная плата (катод).

2. Струя электролита.
3. Сменный анод.
4. Система труб с электронасосом.
5. Резервуар с электролитом.
6. Регулируемый источник питания.

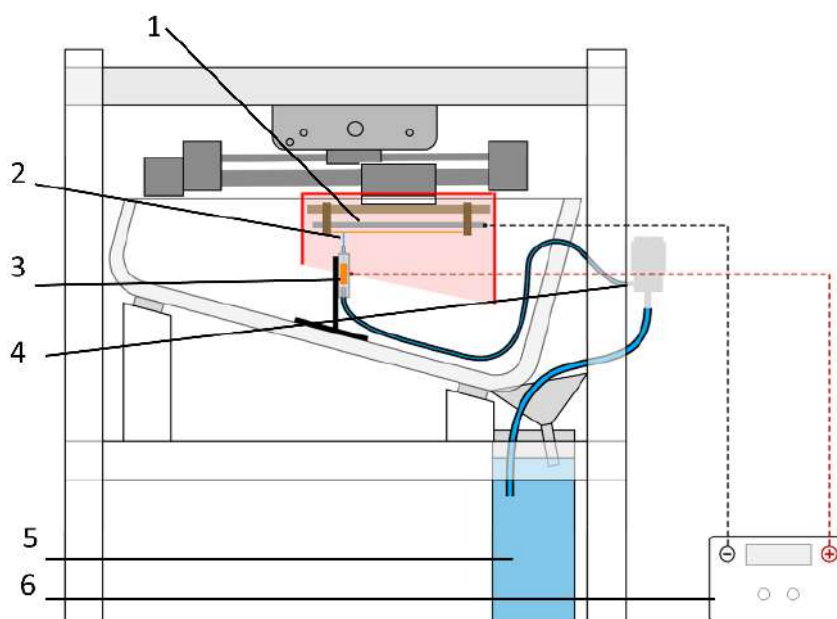


Рисунок 18 — Схема струйного способа металлизации

Такая схема создаёт замкнутый цикл циркуляции электролита и уменьшает его расход. В одном устройстве выполняется полный цикл металлизации: заготовка поочерёдно обрабатывается растворами, циркулирующими по той же схеме, что и электролит на Рисунке 18. Промывки, следующие за каждой операцией цикла, попутно поддерживают чистоту камеры; для ценных реагентов предусматривается продувка камеры сжатым воздухом с возвратом остатков раствора в резервуар, где возможна его регенерация. Контроль растворов в проточных трубах упрощает автоматизацию установки.

2.2 Экспериментальная проверка работоспособности способа

Для подтверждения работоспособности способа проведён эксперимент. Схема эксперимента изображена на Рисунке 19. В эксперименте на исследуемую заготовку, подключённую к отрицательному полюсу блока питания (БП),

непрерывной струёй подавался электролит, в котором находился электрод, подключённый к положительному полюсу БП. Для опыта был приготовлен электролит следующего состава (на 1 л), в который во всех опытах работы вводилась выравнивающая добавка J-Plate Cu400:

- $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 90 г/л.
- H_2SO_4 плотность 1,84 г/см³ – 200 г/л
- NaCl – 0,125 г/л.
- Вода – 703,875 г/л.

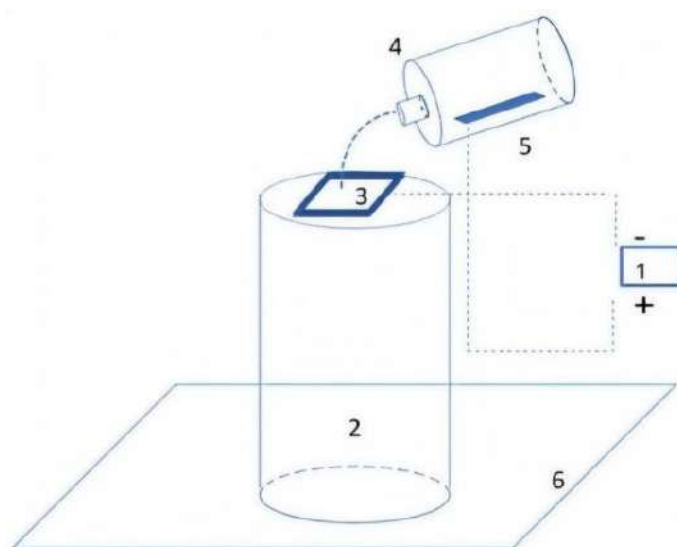


Рисунок 19 — Схема эксперимента для проверки работоспособности способа струйной металлизации: 1 – блок питания с возможностью ограничения по току; 2 – емкость из стекла, в которую стекает электролит с заготовки; 3 – заготовка, подключенная к минусу БП; 4 – емкость из стекла, содержащая электролит; 5 – электрод, подключенный к плюсу БП; 6 – рабочий стол

Объёмный расход электролита составлял около 0,017 л/с, то есть около литра в минуту. За это время при токе 0,06 А металлизировалась заготовка площадью около 630 мм² (Рисунок 20)



Рисунок 20 — Неметаллизированная (справа) и металлизированная заготовки

Затем способ проверили на печатной плате при тех же расходе и токе металлизации (Рисунок 21).

На поверхности металлизированного проводника виден эффект «собачьей кости»: плотности тока, характерные для стационарных процессов металлизации, для струйной металлизации слишком велики.

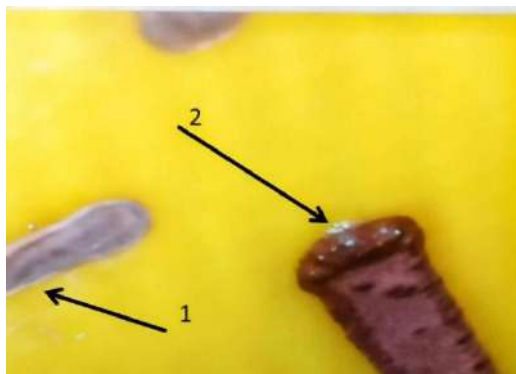


Рисунок 21 — Металлизация ПП: 1 – активированное покрытие проводника до осаждения меди; 2 – металлизированный проводник после гальванического осаждения меди. Сфотографировано с 20-кратным увеличением

Микрошлиф покрытия, осаждённого струйным способом в течение 10 мин при токе 150 мА, показан на Рисунке 22.

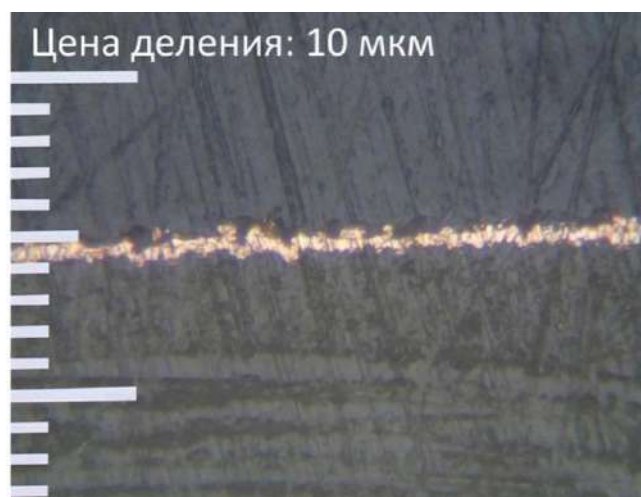


Рисунок 22 — Микрошлиф покрытия, осаждённого струйным способом (10 мин при токе 150 мА; цена деления шкалы 10 мкм)

Опыт показал, что струйный способ металлизации печатных плат работоспособен и не уступает по эффективности стандартным методам.

2.3 Экспериментальная установка и автоматизированный макет

2.3.1 Лабораторная установка

Для исследования струйного способа и получения зависимостей, необходимых для математического описания процесса, нужна серия опытов со строго воспроизводимыми параметрами. Для этого создана установка струйной гальванической металлизации изделий.

Установка показана на Рисунке 23, её схема — на Рисунке 24. Установка начинает работать при включении БП, которым задаётся требуемая скорость потока. Когда поток касается детали, между анодом и катодом подаётся напряжение; струя жидкости замыкает цепь между анодом и катодом, и начинается металлизация.

1. Контакт пластины с электролитом происходит лишь в локальной зоне, представляющей собой линию сопряжения плоскости с цилиндром.

2. Поскольку электролит подаётся снизу, после контакта он стекает вниз, не растекаясь по плате, что предотвращает его затекание под маску.

Изменяя мощность мотора насоса, можно регулировать высоту волны и силу её давления на заготовку так, чтобы электролит протекал через отверстия.

Благодаря непрерывной рециркуляции раствор обновляется, и волна всегда обогащена ионами металла. Это продлевает срок службы раствора: его можно реже обновлять, что сокращает отходы. Кроме того, высокая концентрация ионов благоприятно сказывается на качестве и скорости металлизации.



Рисунок 23 — Внешний вид установки для металлизации ПП струйным способом

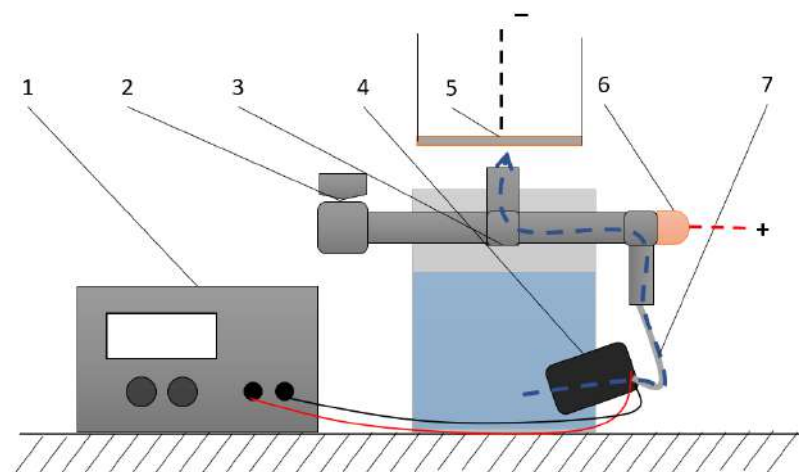


Рисунок 24 — Схема установки для металлизации ПП струйным способом: 1 – Блок питания; 2 – Кран; 3 – Система труб с выходной трубой по центру; 4 – Электронасос; 5 – Металлизируемый объект, подключённый к условному минусу БП 6 – Сменный медной анод, вкручивающийся в систему труб, подключённый к условному плюсу БП, 7 – Путь циркуляции электролита.

Установка прошла ряд испытаний. Во-первых, определена зависимость объёмного расхода жидкости от напряжения на электронасосе; опыт проводился по схеме Рисунка 25.

На БП выставляется напряжение от 3 до 14 В, после чего БП подключается к электронасосу, собранному с бачком, наполненным водой. Трубка соединяет выходной патрубок насоса с мерной ёмкостью. При включении БП насос перекачивает воду из бачка в мерную ёмкость; фиксируются время перекачки и сила тока при заданном напряжении.

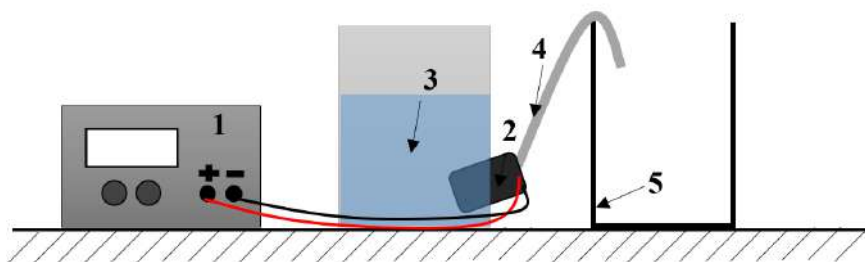


Рисунок 25 — Схема эксперимента: 1 – БП; 2 – Электронасос; 3 – Бачок с водой; 4 – Трубка; 5 – Мерная ёмкость

Расход воды рассчитывается по формуле:

$$Q = \frac{dC}{dt}, \quad (24)$$

где C – объем переливаемой жидкости (м^3);

t – время, за которое совершается переливание жидкости.

График зависимости объёмного расхода жидкости от приложенного напряжения представлен на Рисунке 26.

Кроме того, установку испытали на стойкость к агрессивным жидкостям и на герметичность: она проработала более часа без сбоев и нарушения герметичности.

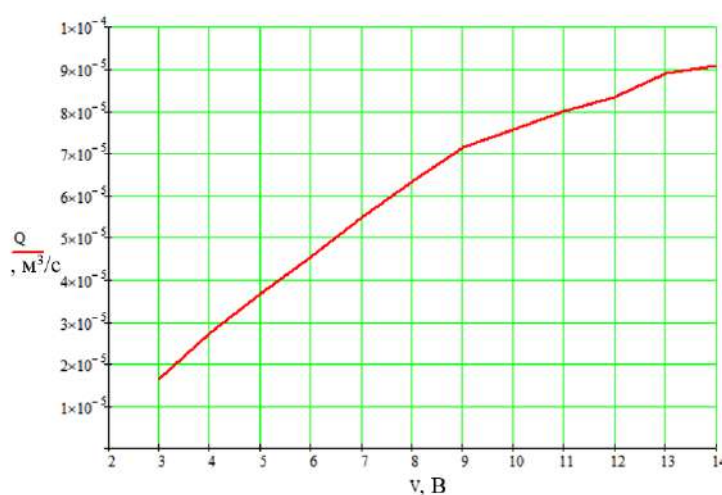


Рисунок 26 — Зависимость объёмного расхода от приложенного напряжения

2.3.2 Автоматизированный макет установки

При ручной струйной металлизации трудно обеспечить равномерное покрытие всей площади платы (Рисунок 27), а результаты должны быть воспроизводимыми. Поэтому деталь в ходе металлизации необходимо перемещать автоматически.

Сначала нужно решить, где выгоднее располагать выход электролита — над деталью или под ней. При подаче снизу пластина контактирует с электролитом лишь в локальной зоне, по линии сопряжения плоскости с цилиндром. После

контакта электролит стекает вниз, не растекаясь по плате, и не затекает на другую её сторону. При подаче сверху электролит задерживается на поверхности платы, что делает металлизацию неравномерной. Кроме того, при подаче сверху электролит хуже проходит в отверстия из-за поверхностного натяжения, а выделяющийся водород всплывает навстречу потоку и мешает осаждению. Неподвижное сопло упрощает подачу электролита и уменьшает контакт механизмов с агрессивной средой, поскольку перемещается плата, закреплённая над соплом. Схемы подачи электролита сверху вниз и снизу вверх показаны на Рисунке 28.

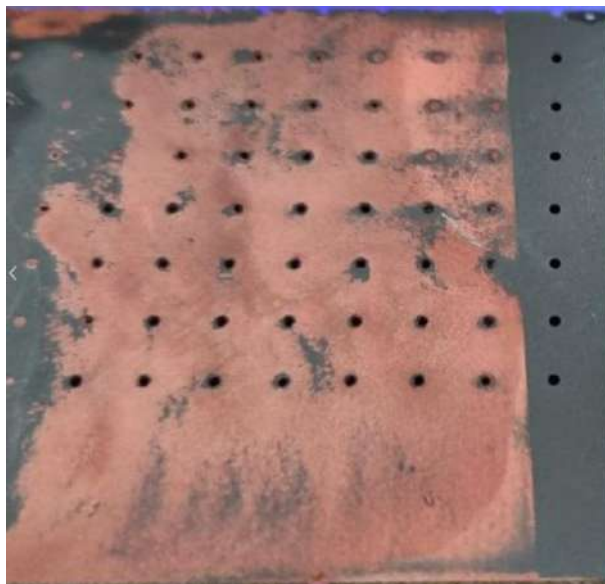


Рисунок 27 — Неравномерная металлизация ПП вручную

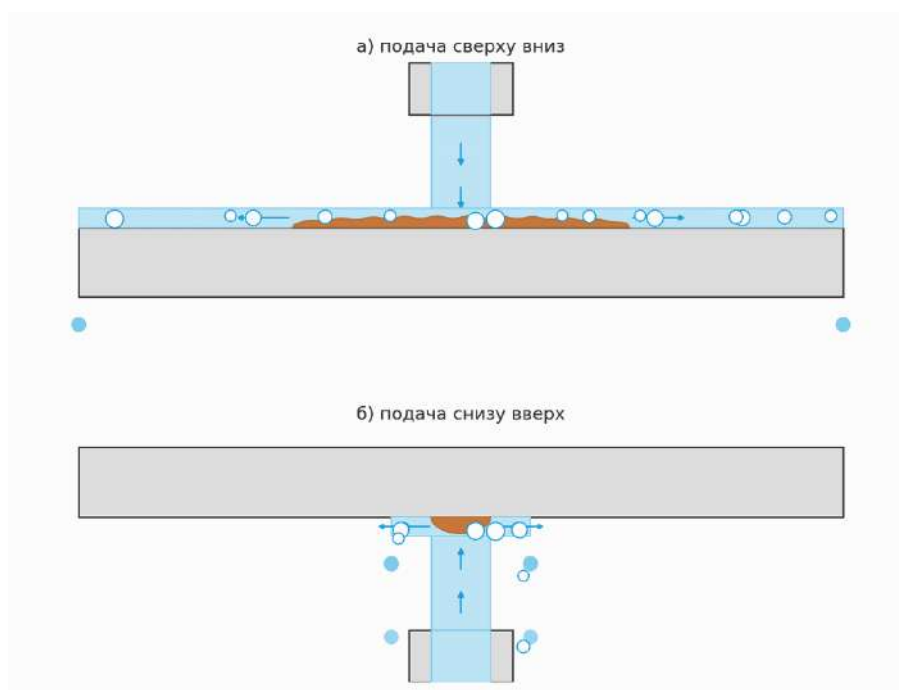


Рисунок 28 — Схема подачи электролита на плату: а — сверху вниз; б — снизу вверх

Для автоматизации процесса разработан макет автоматизированной системы струйной металлизации печатных плат; его схема и внешний вид показаны на Рисунках 29 и 30.

На Рисунке 29: 1 – Регулируемый блок питания; 2 – Блок питания 12 В; 3 – Управляющее устройство; 4 – Металлизируемая деталь; 5 – Система труб с выходной трубой по центру; 6 – Сменный медный анод; 7 – Электронасос; 8 – Автоматический координатный стол; 9 – Путь циркуляции электролита; 10 – Емкость с электролитом.

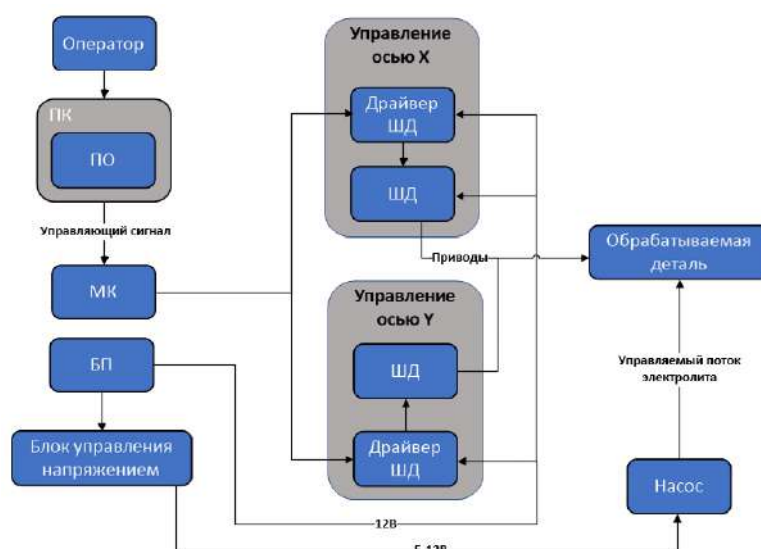


Рисунок 31 — Структурная схема автоматизированной системы

Скорость перемещения заготовки — до 0,01 м/с, время разгона до этой скорости — 0,5 с. Конструкция обладает стойкостью к агрессивной среде электролита.

Макет прошёл три итерации (Рисунок 32). В первом прототипе автоматизировано перемещение заготовки; во втором введены защитные кожухи от брызг кислоты, управление насосом и параметрами процесса и замена сопел; в третьем усовершенствованы защитные элементы, переработаны подача и слив электролита и уменьшен объём рабочей жидкости. В последнем прототипе механизмы полностью защищены от электролита экраном, сопла сменные, объём электролита на всю установку снижен до 250 мл. Расход через сопло диаметром 0,838 мм составляет около 73 мл/мин, скорость истечения — 2,2 м/с, число Рейнольдса — 1320, то есть истечение ламинарное (раздел 3.1).

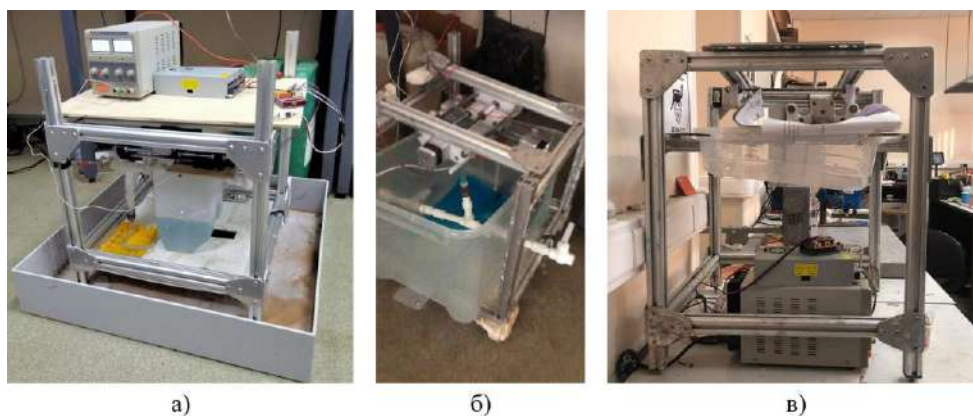


Рисунок 32 — Прототипы автоматизированной установки: а) первый; б) второй; в) третий

2.4 Равномерность толщины покрытия, получаемого на автоматизированном макете

Равномерность толщины покрытия, получаемого на макете установки, оценена экспериментально.

Параметры образца:

- Площадь, подлежащая обязательной металлизации – 1 дм²;
- Площадь заготовки $\approx 1,9$ дм²;
- Активирующее покрытие: графит.

Параметры процесса металлизации:

- Ток металлизации 0,1 А;
- Время металлизации: 2 часа;
- Скорость потока: 2,2 м/с;
- Скорость движения заготовки: 0,01 м/с.

Внешний вид детали до и после металлизации показан на Рисунках 33 и 34. Металлизированные отверстия исследованы методом компьютерной томографии; среднеквадратичное отклонение толщины покрытия составило $s_r = 4,23$ мкм.

По аналогии с пределом повторяемости по ГОСТ Р ИСО 5725 [4] вычислим допустимый размах двух значений толщины:

$$r = 2,8 \cdot s_r = 2,8 \cdot 4,23 = 11,84 \text{ мкм}.$$

В качестве пары значений x_1 и x_2 возьмём минимальную и максимальную толщину по измеренным сечениям:

$$|x_1 - x_2| \leq r; \quad (25)$$

$$|23,72 - 33,93| \leq 11,84;$$

$$10,21 \leq 11,84.$$

Размах толщины по образцу не превышает этого значения, и покрытие, получаемое на макете, можно считать равномерным. Критерий применён к разбросу толщины по одному образцу и характеризует равномерность покрытия; оценка повторяемости процесса в смысле ГОСТ Р ИСО 5725 требует серии независимых повторных опытов.

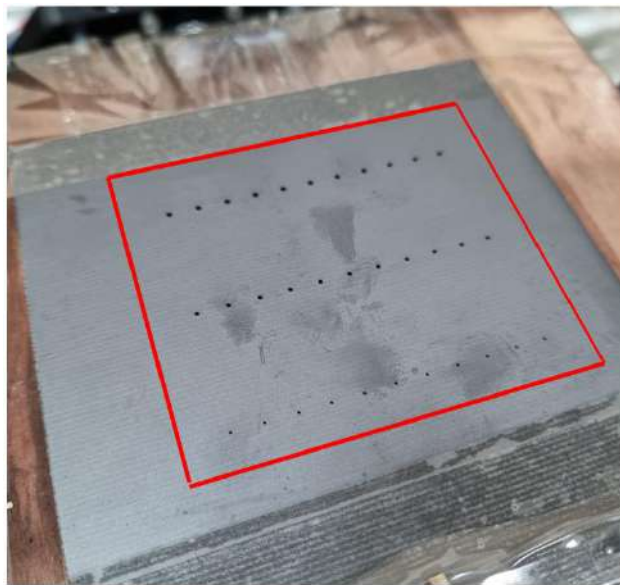


Рисунок 33 — Внешний вид детали до металлизации

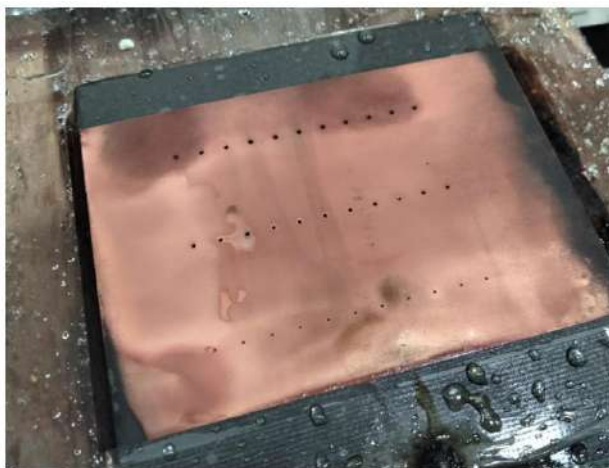


Рисунок 34 — Внешний вид детали после металлизации

2.5 Сравнительный анализ систем прямой металлизации

Химическое меднение используют не менее 90 % российских предприятий [31]. Однако для него нужна громоздкая гальваническая линия минимум из шести ванн, а большие объёмы и сложный состав растворов затрудняют обслуживание линии и контроль растворов.

Альтернатива ему — более перспективная, но ещё недостаточно освоенная в России прямая металлизация. Наиболее распространена сегодня система прямой металлизации с палладиевым активатором; при активации на стенках отверстий образуется полукolloидная плёнка палладия, на которую затем осаждается гальваническая медь. Однако растворы для такого цикла дороги (более 80 тыс. рублей за литр), поставляются большими объёмами (от 20 л) и, главное, импортируются. Поскольку напрямую купить растворы прямой металлизации сейчас нельзя, остаются лишь параллельный импорт или возврат к химическому меднению.

Исследованы альтернативные средства активации-сенсibilизации, доступные для мелкосерийного и единичного производства: графит и комплекс на основе гипофосфита меди. Цель исследования — качественно сравнить их с традиционно используемой импортной системой SYSTEM-S, наиболее развитой из существующих технологий прямой металлизации.

Сравнение с палладиевым активатором системы SYSTEM-S проводилось по следующим критериям:

- стадийность процесса;
- время подготовки поверхности;
- количество необходимой оснастки;
- стоимость;
- разрешающая способность;
- пригодность к исследованию качества металлизации с помощью инвазивных средств контроля;
- проводимость слоя активатора на поверхности ПП.

Эталоном для сравнения служит процесс прямой металлизации SYSTEM-S с палладиевым активатором. Он состоит из шести стадий с семью промывками между ними (Таблица 2).

Процесс обеспечивает хорошую адгезию осажденного покрытия и сравнительно высокую электрическую проводимость ($>1 \text{ См}$), при этом коллоидный характер активатора практически не имеет пределов по разрешающей способности.

Однако у технологии есть и существенные недостатки. Кроме раствора активации на основе палладия и олова (иногда и серебра), нужны растворы для преактивации, ускорения и стабилизации, которые нельзя регенерировать. Поэтому стоимость процесса определяется не только дорогим активатором, цена которого зависит от драгоценных металлов, но и всеми реактивами системы. Кроме того, для эксплуатации системы нужны шесть отдельных ванн для каждой стадии, не считая гальванической.

Процесс занимает около 37,5 мин, а металлизация до толщины 25 мкм при плотности тока 3 А/дм^2 даже в идеальных условиях длится до 65 мин.

Таблица 2 — Стадийность подготовки детали с палладиевым активатором

Этап	Процесс	Время обработки, с
1	Очистка поверхностей	420
2	Промывка погружная	30
3	Промывка струйная	40
4	Преактивация	30
5	Активация	420
6	Промывка погружная	30
7	Промывка струйная	40
8	Ускорение	420
9	Промывка погружная	30
10	Промывка струйная	40
11	Стабилизация (антиокислитель)	120
12	Промывка погружная	30
13	Сушка	600
Времени итого:		2250

Альтернативой палладиевой системе может служить графитовая система активации, расходные материалы для которой можно изготовить самостоятельно. Стадии процесса приведены в Таблице 3.

Таблица 3 — Стадийность подготовки детали с графитовым активатором

Этап	Процесс	Время обработки, с
1	Кондиционирование	420
2	Промывка струйная	30
3	Промывка погружная	40
4	Активация	60
5	Сушка	600
6	Зачистка активированной поверхности	60
7	Промывка погружная	30
8	Финальная сушка	600
Времени итого:		1840

Этот процесс имеет меньше стадий, чем System-S, и короче примерно на семь минут. Для графитовой активации подходят графитовая смазка или спрей [79], растворённые в ацетоне, поэтому решение недорогое.

Однако у способа есть существенные недостатки. Графитовое покрытие уступает палладиевому по электропроводности, а невозможность получить мелкодисперсный коллоидный раствор графита ограничивает разрешающую способность. Адгезия графитового покрытия значительно хуже, а графит, остающийся под слоем меди, не позволяет контролировать толщину и качество покрытия инвазивными методами.

Ещё одна система прямой металлизации основана на аммиачном комплексе гипофосфита меди. Этот способ активации известен давно [5, 27, 28], однако изучен хуже даже графитовых систем. Между тем именно он может позволить эксплуатировать линию прямой металлизации без импортных реагентов.

Токопроводящая плёнка образуется при термическом разложении комплексной соли гипофосфита меди. Это окислительно-восстановительный процесс в твёрдой фазе, в результате которого образуются металлическая медь, гидрид и оксид меди.

При нагревании сначала кристаллизуется соль, затем выделяется медь.

Полноту термолиза контролируют визуально по цвету осадка: в отверстиях и на активированной поверхности он должен быть от тёмно-коричневого до чёрного. Затем плату промывают струёй проточной воды, а продукты разложения удаляют с поверхности фольги механически — влажной смесью шлифовальной извести и маршаллита. После этого выполняют гальваническое меднение и последующие стандартные операции.

Стадии процесса приведены в Таблице 4. Этот процесс заметно короче остальных и содержит меньше стадий. Из дополнительных реагентов нужен только травильный раствор, который есть на любом предприятии или участке, изготавливающем печатные платы хотя бы субтрактивным методом.

Таблица 4 — Стадийность подготовки детали с активатором на основе комплекса гипофосфита меди

Этап	Процесс	Время обработки, с
1	Травление	30
2	Промывка струйная	30
3	Промывка погружная	40
4	Активация	60
5	Сушка	600
6	Промывка струйная под давлением	60
Времени итого:		820

У этой системы активации есть ряд преимуществ:

- из процесса исключается гальваническая затяжка, что даёт значительный экономический эффект за счёт отказа от дорогих растворов;
- повышается производительность линии металлизации на этапах, предшествующих гальванической металлизации, поскольку активирующий слой содержит в том числе чистую медь;

- повышается качество металлизации и надежность печатных плат, поскольку исключено контактное выделение палладия на незащищенных участках плат.

Недостатки системы следующие:

- наблюдаются разрывы металлизации в месте перехода металлизированного отверстия и контактной площадки;
- существует трудность удаления продуктов термолиза как из отверстий, так и с поверхности фольги, что создает препятствия для использования системы в полностью аддитивных технологиях изготовления многослойных ПП.

Анализ показывает, что для прототипирования альтернативой палладиевой системе прямой металлизации могут служить как графитовая система, так и система на основе гипофосфита меди (ГФМ). Для более ответственных задач единственная альтернатива — система на основе комплекса ГФМ.

2.6 Качество металлизации сквозных отверстий при активации графитом и комплексом гипофосфита меди

Эти положения проверены экспериментально на примере металлизации отверстий двусторонних печатных плат (ДПП).

Для опыта был приготовлен электролит следующего состава (на 1 л), в который во всех опытах работы вводилась выравнивающая добавка J-Plate Cu400:

- $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 90 г/л.
- H_2SO_4 плотность 1,84 г/см³ – 200 г/л
- NaCl – 0,125 г/л.
- Добавка J-PLATE CU-400 – 6 мл/л.
- Вода – 703,875 г/л.

Изготовлены две заготовки из стеклотекстолита толщиной 2 мм и площадью 1 дм², в каждой из которых просверлено по 10 отверстий диаметром 1; 0,8; 0,5 и 0,3 мм. Далее используется характеристическое отношение — отношение глубины

отверстия к его диаметру; например, для отверстия диаметром 0,5 мм и глубиной 2 мм оно равно 4 : 1.

Затем заготовки подготовили к электрохимической металлизации по графитовой системе и по системе на основе комплекса ГФМ (Таблицы 3 и 4) и поочерёдно меднили в гальванической ванне с приготовленным электролитом в течение 65 мин при плотности тока 3 А/дм².

Металлизированные отверстия диаметром 0,5 мм для обеих систем показаны на Рисунке 35. На детали, активированной графитом, металлизированная поверхность шершавая и неровная, особенно в отверстиях и рядом с ними; причина — недостаточная дисперсность графита. Это затрудняет металлизацию отверстий с большим характеристическим отношением. Деталь, активированная комплексом ГФМ, покрыта равномернее. Неравномерность цвета осаждённой меди объясняется подтравливанием детали в кислом электролите при сильно различающейся поляризации её участков.



Рисунок 35 — Внешний вид заготовок после металлизации. Снято с 50-кратным увеличением. Справа – заготовка, активированная по графитовой системе, Слева – заготовка, активированная с помощью комплекса ГФМ.

Металлизацию контролировали двумя методами: инвазивным и неинвазивным.

Неинвазивный контроль выполнялся методом компьютерной томографии, которой выявлялись дефекты металлизации и измерялась толщина покрытия. Этот метод был основным, так как требует значительно меньше времени и даёт трёхмерную картину образца с высоким разрешением.

Инвазивный контроль состоял в изготовлении микрошлифов отверстий. Он позволял проверить пригодность разрушающих методов контроля для исследуемой системы прямой металлизации и при необходимости получить поправочные коэффициенты для калибровки рентгеновского контроля.

Первой исследовалась графитовая система. Оказалось, что для неё микрошлифы непригодны, так как графит, оставшийся под слоем меди, крошится при изготовлении шлифа и разрушает покрытие. На Рисунке 36 показан микрошлиф отверстия диаметром 0,5 мм, при изготовлении которого часть металлизации утрачена из-за разрушения графитового слоя. Это указывает и на плохую адгезию такого покрытия.

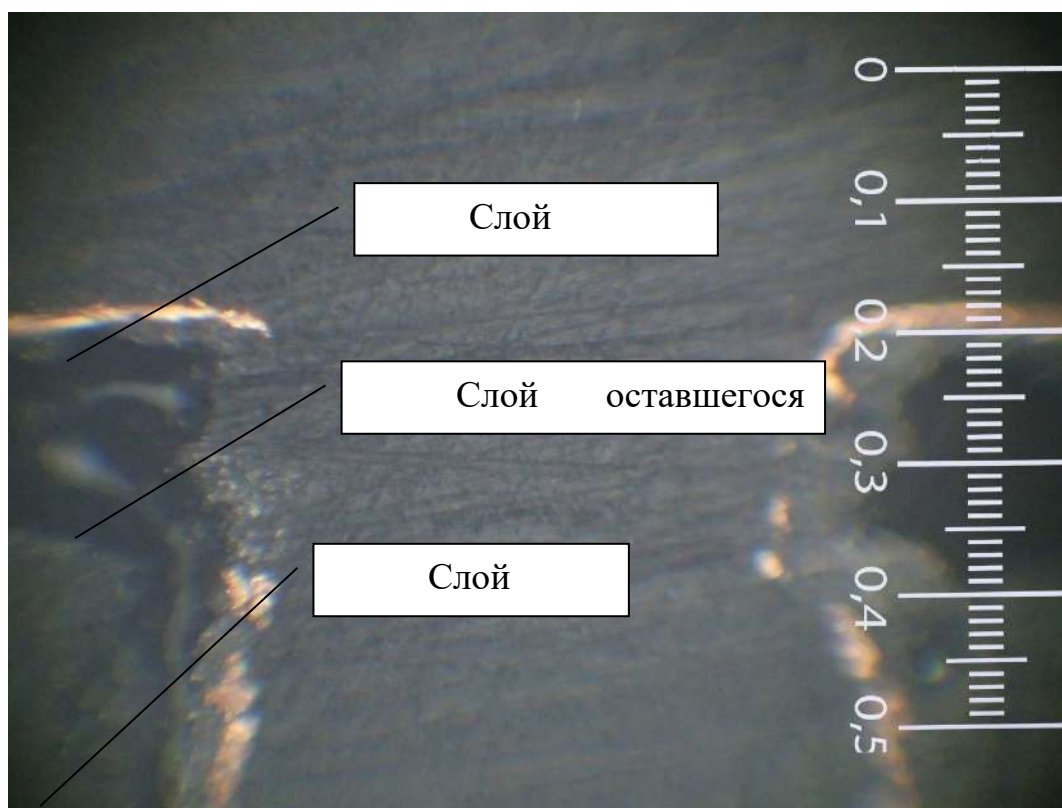


Рисунок 36 — Разрыв металлизации отверстия ПП при изготовлении микрошлифа

Толщина покрытия за весь цикл металлизации ДПП по графитовой системе составляет не более 20 мкм, поэтому цикл металлизации дольше, чем в палладиевой системе, где за то же время при плотности тока 3 А/дм² осаждается не менее 25 мкм меди.

Затем исследовались отверстия, металлизированные после активации комплексом ГФМ. На Рисунке 37 показаны нижняя и верхняя части отверстия; слой металлизации плотно прилегает к текстолитовому основанию, разрывов нет. Равномерность покрытия исследовалась также методом компьютерной томографии (КТ). Реконструкция томограммы для отверстия диаметром 0,5 мм показана на Рисунке 38; на ней виден срез двух отверстий,

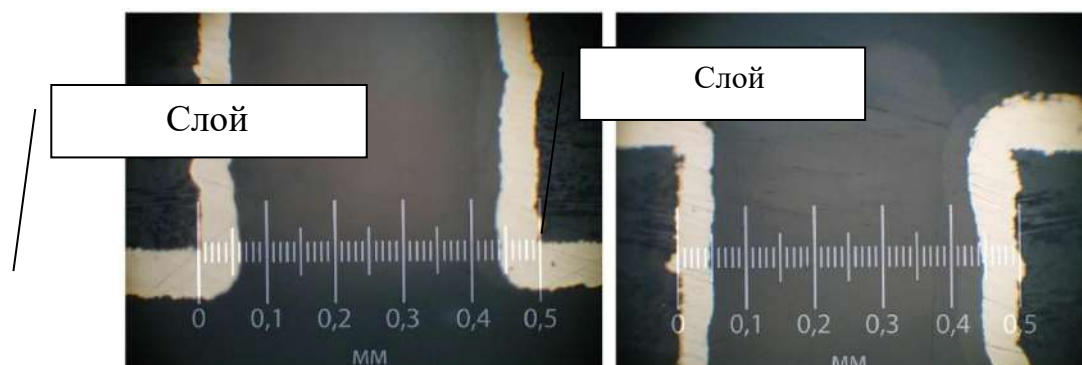


Рисунок 37 — Микрошлиф отверстия 0,5 мм, металлизированного с помощью комплекса ГФМ

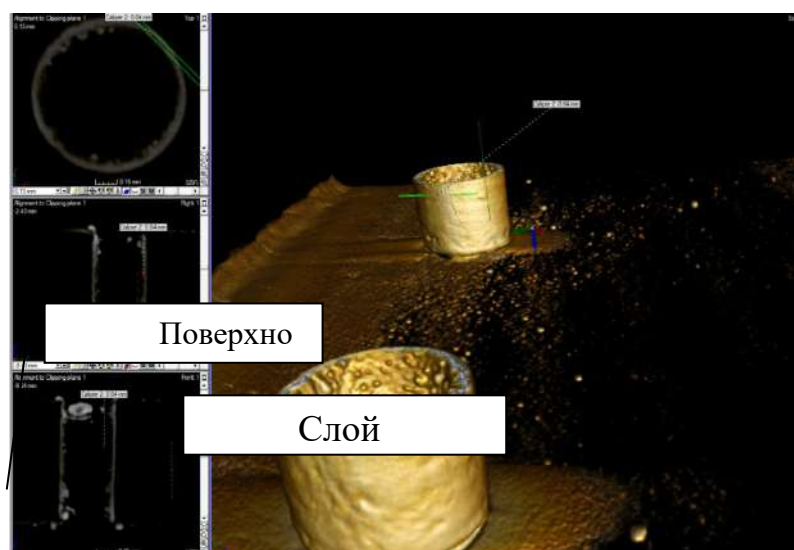


Рисунок 38 — Пример КТ металлизированного отверстия ДПП для отверстия диаметром 0,5 мм в трехмерном виде и в разных плоскостях в среде VGS Studio

Разрывов внутри отверстий не обнаружено, однако в некоторых отверстиях покрытие неравномерно (Рисунок 39); таких дефектов можно избежать добавлением в электролит специальных выравнивающих добавок [56].

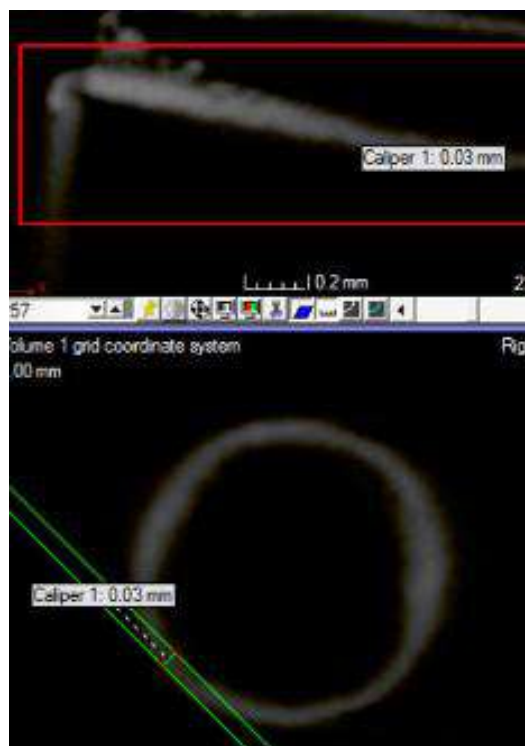


Рисунок 39 — Неравномерность толщины покрытия ДПП (выделено красным)

Минимальная толщина покрытия после осаждения в течение 65 мин при плотности тока 3 А/дм^2 для отверстий с разными характеристическими отношениями приведена в Таблице 5.

Таблица 5 — Зависимость толщины осажденного покрытия от характеристического отношения

Характеристическое отношение	6,7:1	4:1	2,5:1	2:1
Минимальная толщина покрытия, мкм	30	40	40	44

Заготовка, активированная комплексом ГФМ, показала неразрывное покрытие. Полученная минимальная толщина металлизации отверстий с соотношением 4:1 составила 40 мкм при толщине на поверхности около 43 мкм (по закону Фарадея за 65 мин при 3 А/дм^2), то есть покрытие в отверстиях сплошное и близко по толщине к поверхностному; прямого сравнения с палладиевым активатором в одинаковом режиме не проводилось. По технологическим картам (Таблицы 2–4) подготовка поверхности с активатором на основе комплекса ГФМ короче, чем с палладиевой системой; при сопоставлении одинакового состава

операций, включающего очистку, подтравливание, выдержку в активаторе 10 мин и термообработку 10 мин (раздел 2.7), выигрыш по времени меньше, чем по картам.

Приведённые в Таблице 5 данные используются далее в разделе 3.4.6 как независимый экспериментальный материал для проверки модели металлизации сквозных отверстий: они сняты при заданной плотности тока и потому позволяют проверить расчётную зависимость рассеивающей способности от диаметра отверстия.

2.7 Сравнительные испытания активаторов на тест-купонах

В разделе 2.6 экспериментально подтверждена работоспособность активатора на основе аммиачного комплекса гипофосфита меди (ГФМ) при подготовке поверхности печатной платы к гальваническому осаждению меди. Чтобы определить границы применимости активатора и сопоставить его с альтернативными способами прямой металлизации, в разделе сравниваются три схемы активации: на основе аммиачного комплекса гипофосфита меди (АКГФМ), графитового спрея и графитовой токопроводящей краски. Цель эксперимента — обосновать выбор активатора, дающего наименьшую долю дефектных отверстий печатной платы при последующем гальваническом меднении.

2.7.1 Объекты и средства исследования

Объект исследования — тест-купоны из стеклотекстолитовых заготовок толщиной от 0,5 до 1,5 мм с просверленными рядами сквозных отверстий диаметром от 0,5 до 2 мм. Каждый ряд отверстий рассматривается как отдельный тест-купон. Заготовки и отверстия показаны на Рисунке 40, а, б.

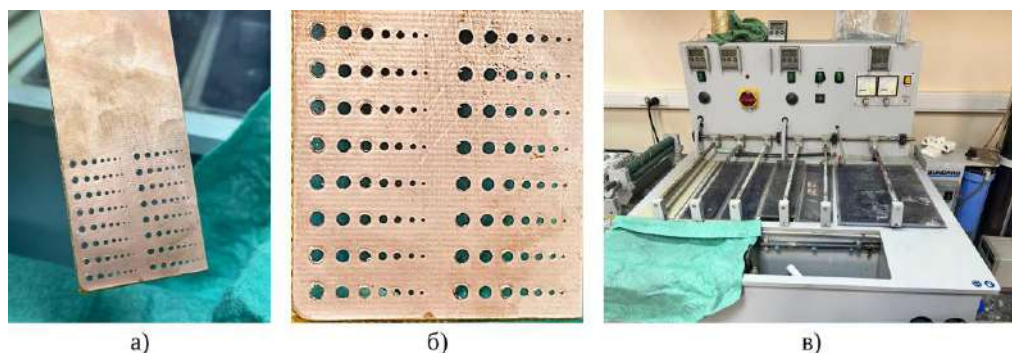


Рисунок 40 — Объекты и средства исследования: а — внешний вид тест-купонов после сверления отверстий; б — сквозные отверстия в заготовке (увеличено); в — установка прямой металлизации

Диаметры отверстий приведены в таблице 6.

Таблица 6 — Размеры отверстий на заготовке

Размер сверленного отверстия, D, мм	2	1,8	1,5	1,2	1	0,8	0,5
--	---	-----	-----	-----	---	-----	-----

Гальваническое меднение тест-купонов после активации выполняется на установке прямой металлизации COMPACTA 30 Through Hole Plating Machine производства Bungard Elektronik GmbH (Виндек, Германия) (Рисунок 40, в). Установка предназначена для лабораторного прототипирования печатных плат размером до 210×300 мм и обеспечивает гальваническое осаждение меди в стандартном электролите при контролируемых параметрах тока, напряжения и температуры. Технические характеристики установки приведены в таблице 7.

Таблица 7 — Технические характеристики установки металлизации

Размеры (ширина × глубина × высота), см	88 × 100 × 135
Высота рабочего места, см	95
Масса, кг	80
Мощность нагрева, Вт	2×400
Перемещение ванны	Редукторный двигатель постоянного тока
Подключение	220 В 50 Гц 6,3 А
Выпрямитель напряжения	6 В 40 А

2.7.2 Общая схема подготовки тест-купонов

Методика подготовки тест-купонов включает три последовательных этапа: очистку поверхности, активацию диэлектрической поверхности (стенок отверстий) и гальваническое меднение. Этапы очистки и гальванического меднения общие для всех экспериментов и не зависят от выбранного типа активатора. Этап активации выполняется по одной из трёх схем (графитовым спреем, аммиачным комплексом гипофосфита меди или графитовой токопроводящей краской) и составляет предмет исследования.

Цель этапа очистки — удаление с поверхности фольги оксидной плёнки, технологических загрязнений и продуктов травления, препятствующих равномерному смачиванию заготовки активатором и адгезии последующего гальванического покрытия. Цель этапа активации — нанесение на стенки сквозных отверстий проводящего слоя, обеспечивающего возможность гальванического осаждения меди на изначально диэлектрической поверхности. Цель этапа гальванического меднения — формирование сплошного слоя меди заданной толщины как на стенках отверстий, так и на поверхности проводящего рисунка.

2.7.3 Операции очистки и активации

Очистка поверхности тест-купона.

Для проведения очистки приготовлены три раствора: водный раствор пемзовой суспензии (Рисунок 41, а), водный раствор щелочного очистителя на основе тринатрийфосфата [82] (Рисунок 41, в) и травильный раствор персульфата аммония.

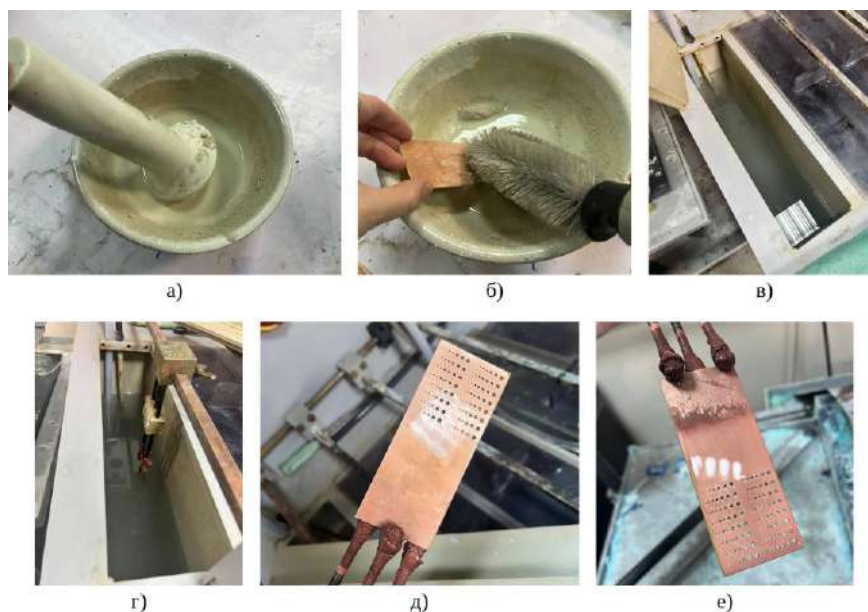


Рисунок 41 — Очистка заготовки: а — водный раствор пемзовой суспензии для механической очистки; б — механическая очистка заготовки пемзовым порошком; в — ванна с очистителем (10 л); г — обработка заготовки в очистителе; д — заготовка после обезжиривания и промывки; е — подтравленная заготовка

Очистка поверхности выполняется в следующей последовательности.

– Поверхность тест-купона зачищается шлифовальной шкуркой с зернистостью 180 для удаления видимых дефектов фольги и оксидной плёнки.

– Заготовка погружается в раствор пемзовой суспензии и обрабатывается щёткой с нейлоновой щетиной (Рисунок 41, б) для удаления продуктов окисления и обеспечения микрошероховатости поверхности, способствующей лучшей адгезии активатора.

– Тест-купон промывается дистиллированной водой для удаления остатков пемзы.

– Заготовка закрепляется на направляющей установки СОМРАСТА 30 и погружается в ванну со щелочным очистителем при включённом режиме перемещения направляющей (Рисунок 41, г). Время обработки — 5–7 мин. Цель операции — обезжиривание поверхности и удаление органических загрязнений.

– Тест-купон извлекается из ванны и промывается дистиллированной водой (Рисунок 41, д).

– Заготовка протравливается в растворе персульфата аммония в течение 1–1,5 мин. Цель операции — снятие тонкого поверхностного слоя меди с микровключениями и формирование химически чистой поверхности фольги, готовой к активации.

– Тест-купон промывается дистиллированной водой (Рисунок 41, е) и подсушивается на воздухе.

Активация графитовым спреем.

Активация графитовым спреем выполняется на очищенной и подсушенной заготовке в следующей последовательности.

– Графитовый спрей распыляется на заготовку с расстояния 15–30 см в вытяжном шкафу (Рисунок 42, а). Расстояние выбрано в качестве компромисса между плотностью покрытия (требует меньшего расстояния) и равномерностью распределения (требует большего расстояния).

– Состав распределяется по поверхности шпателем (Рисунок 42, б) для обеспечения проникновения активатора в сквозные отверстия.

– Спрей наносится на обратную сторону заготовки (при необходимости двусторонней металлизации); состав равномерно распределяется шпателем.

– Излишки состава удаляются с фольгированной поверхности.

– Тест-купон помещается в сушильную печь и выдерживается при температуре 60 °С в течение 10–15 мин (Рисунок 42, в). Цель операции — удаление летучих органических компонентов носителя графита и закрепление графитового слоя на стенках отверстий.

– Заготовка извлекается из печи и промывается дистиллированной водой (Рисунок 42, г). Остатки графита с фольгированной поверхности удаляются ацетоном, после чего тест-купон повторно промывается.

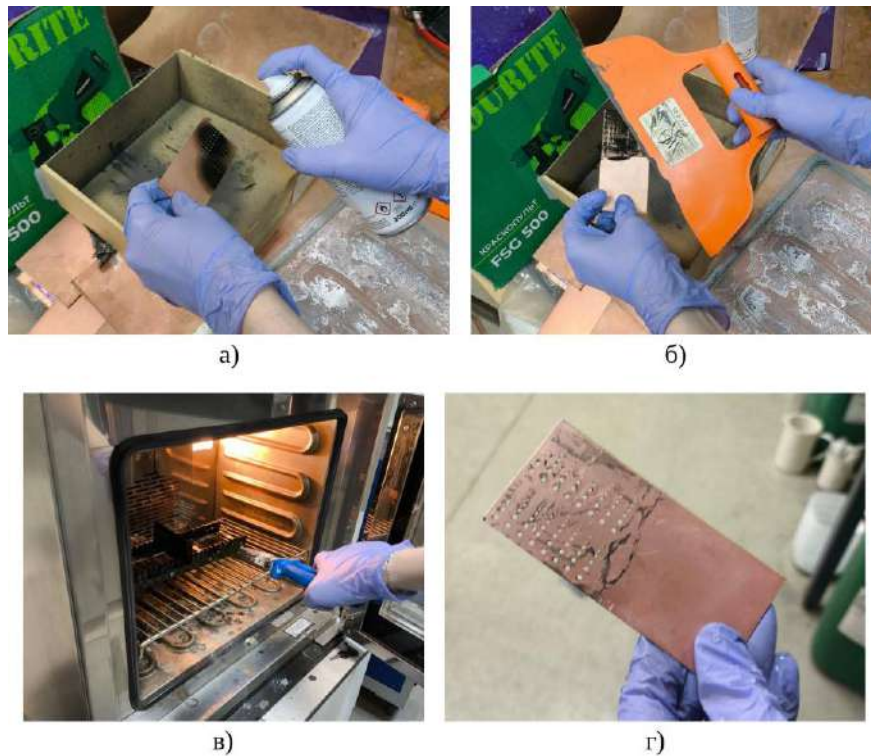


Рисунок 42 — Активация графитовым спреем: а — распыление графитового спрея на заготовку; б — распределение состава шпателем; в — помещение заготовки в печь; г — плата с графитовой плёнкой в отверстиях после промывки

Активация аммиачным комплексом гипофосфита меди.

Активация выполняется на основе синтезированного раствора аммиачного комплекса гипофосфита меди, состав и методика синтеза которого приведены в разделе 2.5. Перед применением раствор перемешивается до получения однородной взвеси, поскольку при длительном хранении возможно отстаивание частиц комплекса (Рисунок 43, а, б).

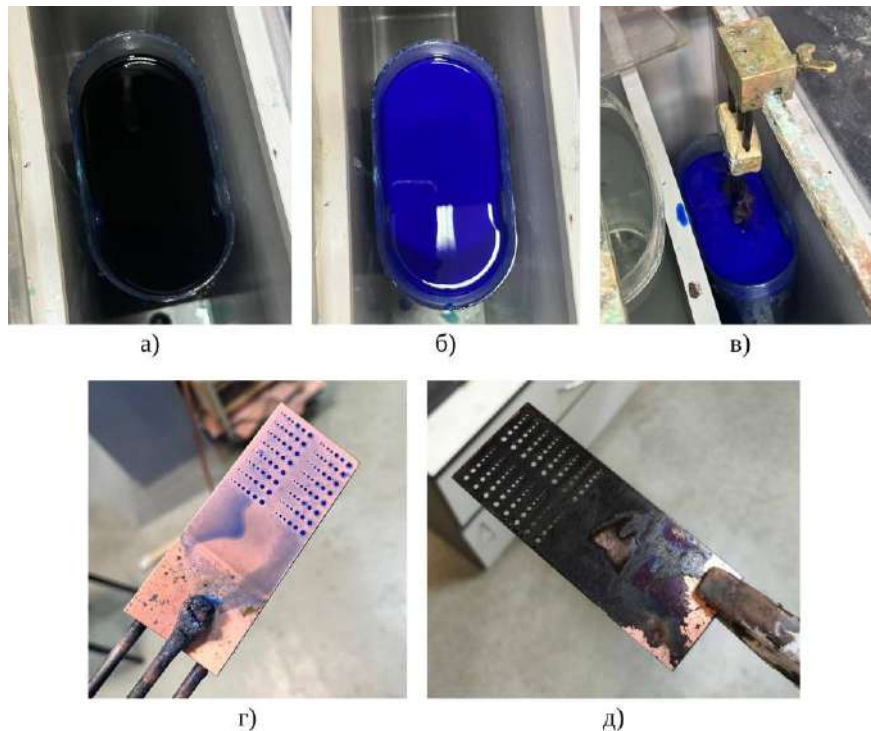


Рисунок 43 — Активация аммиачным комплексом гипофосфита меди: а — раствор активатора АКГФМ до перемешивания; б — раствор АКГФМ после перемешивания; в — нанесение активатора АКГФМ; г — внешний вид заготовки с активатором АКГФМ; д — активатор АКГФМ после термообработки

Последовательность операций активации очищенной заготовки.

– Тест-купон погружается в перемешанный раствор активатора и перемещается в ванне (Рисунок 43, в), чтобы в сквозных отверстиях не скапливались пузырьки газа.

– Заготовка выдерживается в растворе в течение 10 мин.

– Тест-купон извлекается из раствора (Рисунок 43, г) и сразу помещается в сушильную печь, где выдерживается при температуре 150 °С в течение 10 мин. Цель операции — термическое разложение комплекса гипофосфита меди с восстановлением металлической меди на стенках отверстий, обеспечивающее проводимость поверхности.

– Заготовка извлекается из печи (Рисунок 43, д) и промывается дистиллированной водой с проталкиванием воды через сквозные отверстия для удаления остатков непрореагировавшего комплекса.

Активация графитовой токопроводящей краской.

Активация графитовой токопроводящей краской выполняется в следующей последовательности.

- Краска наносится чистым шпателем на поверхность очищенной заготовки с преимущественным заполнением сквозных отверстий (Рисунок 44, а).
- Заготовка выдерживается на воздухе до полного высыхания краски.
- Излишки краски с фольгированной поверхности удаляются ацетоном (Рисунок 44, б).

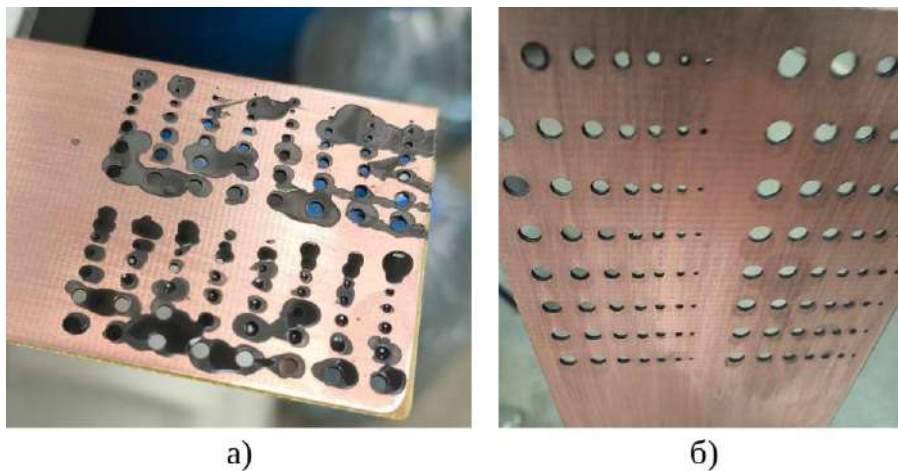


Рисунок 44 — Активация графитовой краской: а — внешний вид заготовки с нанесенной графитовой краской; б — заготовка с активированными отверстиями, на чистой фольгированной поверхности

2.7.4 Контроль состава электролита

Качество гальванического покрытия зависит не только от подготовки поверхности, но и от состояния электролита, в котором проводится осаждение меди. Чтобы исключить влияние состава электролита на результаты опыта, концентрацию действующих компонентов раствора контролировали титриметрически.

В растворе определялась массовая концентрация двух компонентов: анионов серной кислоты и катионов двухвалентной меди. Установка титрования (бюретка объемом 25 мл, колба объемом 250 мл) показана на Рисунке 45, а, а ход титрования

по обоим компонентам — на Рисунке 45, б, в в трёх характерных точках: в начале, в точке эквивалентности и при полной нейтрализации.

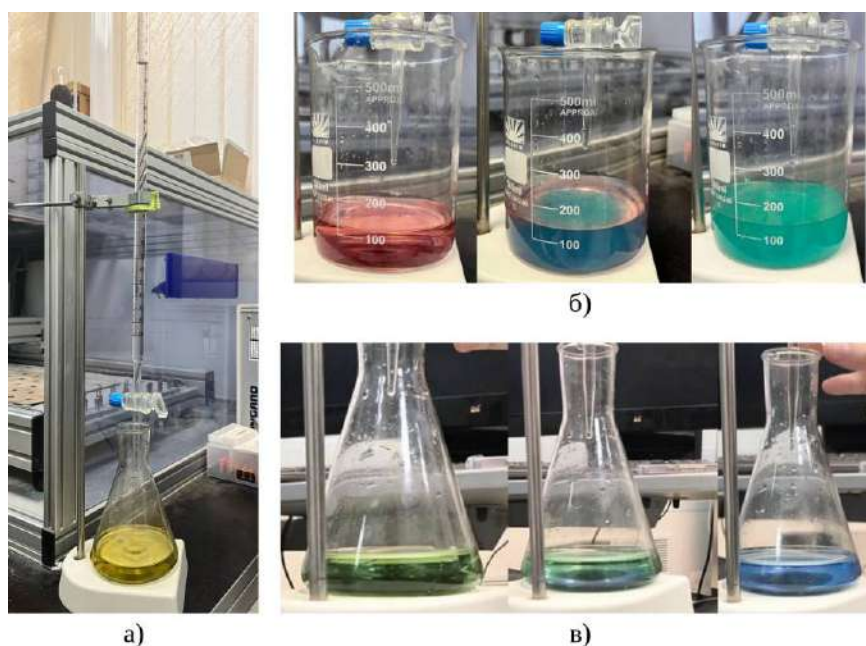


Рисунок 45 — Контроль состава электролита титрованием: а — установка титрования (бюретка 25 мл, колба 250 мл); б — титрование на сульфат-анион (начало, точка эквивалентности, полная нейтрализация); в — титрование на катион двухвалентной меди (начало, точка эквивалентности, полная нейтрализация)

Результаты титрования: массовая концентрация серной кислоты составляет 210 г/л, массовая концентрация сульфата меди — 80 г/л, что соответствует концентрации катионов двухвалентной меди 20,4 г/л. Если бы результат титрования на медь относился к меди-металлу, концентрация $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ составила бы 314 г/л, что втрое больше рецептурных 90 г/л (раздел 2.2) и выше растворимости соли при концентрации серной кислоты 210 г/л. Следовательно, результат относится к соли, а раствор к моменту анализа лишь незначительно выработан относительно рецептурной концентрации меди 22,9 г/л. Полученные значения соответствуют рабочему диапазону концентраций, указанному в технической документации на выравнивающую добавку J-Plate Cu400, применяемую в составе электролита. Следовательно, дефекты металлизации не

связаны с отклонениями состава электролита, а различия результатов между типами активаторов обусловлены свойствами самих активаторов.

2.7.5 Результаты первой серии испытаний

В рамках первой серии экспериментов изготовлено 96 тест-купонов — по 32 тест-купона для каждого из трёх типов активаторов; общее число обработанных отверстий — 672. Качество металлизации оценивалось визуально и под оптическим микроскопом. Дефектными считались отверстия с разрывами медного покрытия по высоте стенки, с крупными пробельными участками и с полным отсутствием металлизации стенок.

Распределение дефектных отверстий по диаметру и типу активатора для первой серии экспериментов приведено в таблице 8. Доли дефектных отверстий по каждому типу активатора, рассчитанные по данным таблицы 8, приведены в таблице 9.

Таблица 8 — Количество дефектных отверстий, распределенных по диаметру и способу активации для первой серии экспериментов

Активатор	Кол-во дефектных отверстий, D = 2 мм	Кол-во дефектных отверстий, D = 1,8 мм	Кол-во дефектных отверстий, D = 1,5 мм	Кол-во дефектных отверстий, D = 1,2 мм	Кол-во дефектных отверстий, D = 1 мм	Кол-во дефектных отверстий, D = 0,8 мм	Кол-во дефектных отверстий, D = 0,5 мм	Итого
Графитовый спрей	4	7	16	23	25	27	32	134
АКГФМ	7	10	10	15	17	21	32	112

Графитовая краска	10	12	14	15	19	20	26	116
Итого	21	29	40	53	61	68	90	362

Таблица 9 — Доля дефектных отверстий для каждого метода активации для первого этапа экспериментов

Активатор	Графитовый спрей	АКГФМ	Графитовая краска
Доля дефектных отверстий	0,60	0,50	0,52

Для всех трёх типов активаторов доля дефектных отверстий составила 0,50–0,60, что не соответствует требованиям промышленного изготовления печатных плат. Преобладают три типа дефектов: крупные пробельные участки на стенках отверстий (Рисунок 46, а), горизонтальные или вертикальные разрывы металлизации (Рисунок 46, б) и полное отсутствие металлизации стенок (Рисунок 46, в).

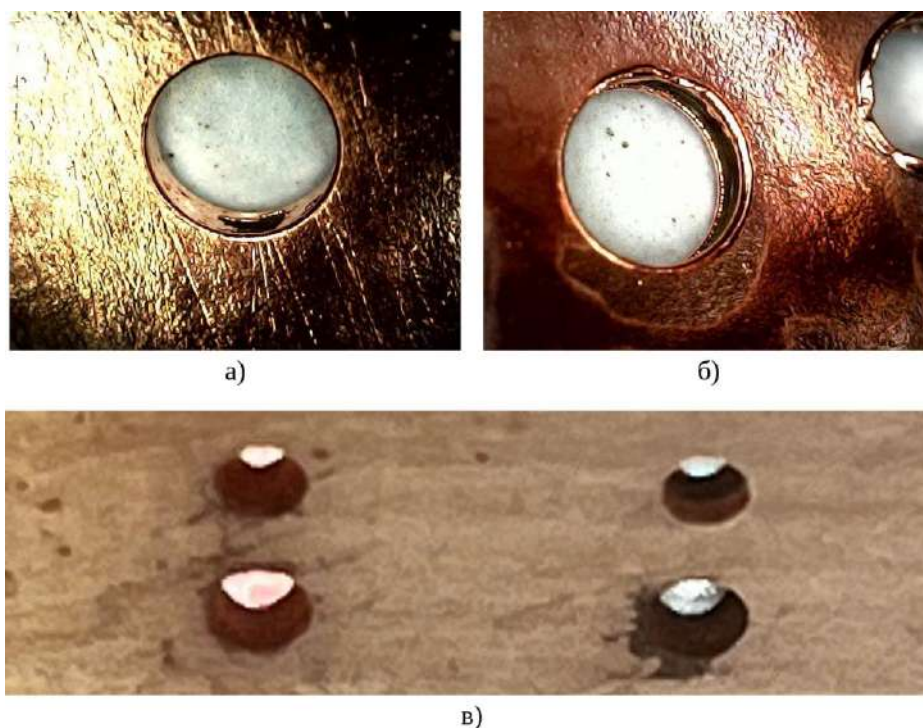


Рисунок 46 — Дефекты металлизации отверстий: а — крупный пробел в металлизации отверстия; б — горизонтальный разрыв металлизации; в — наличие металлизации в стенках отверстий (слева) и полное отсутствие металлизации (справа)

Все три типа дефектов имеют общую причину — недостаток активатора на стенках отверстия и (или) его неравномерное распределение по высоте стенки. Поэтому методику активации необходимо скорректировать так, чтобы активатор наносился на стенки сквозных отверстий полнее и равномернее.

2.7.6 Уточнение методики активации и результаты второй серии испытаний

На основе анализа дефектов первой серии экспериментов в методику активации внесены следующие изменения.

– Для активатора на основе графитового спрея режим термообработки изменён с 60 °С в течение 10–15 мин на 90 °С в течение 60 мин. Более высокая температура и большая длительность обеспечивают более полное удаление летучих органических компонентов носителя и улучшают адгезию графитового слоя к стенкам отверстий.

– Для активаторов всех трёх типов после нанесения активатора введена дополнительная операция продувки сквозных отверстий сжатым воздухом от компрессора (Рисунок 47, а, б). Она удаляет излишки активатора, образующие локальные скопления, и выравнивает распределение активатора по высоте стенки отверстия за счёт капиллярного переноса в направлении потока воздуха.

– Для активатора на основе графитовой токопроводящей краски краску стали наносить не шпателем, а медицинским шприцем с тонкой иглой (Рисунок 47, в). Шприц позволяет вводить краску точно в отверстия и защищает её от высыхания во время нанесения, что особенно важно для отверстий малого диаметра.

– После этапа очистки введена операция дополнительной просушки поверхности сжатым воздухом для удаления остаточной влаги, способной нарушить адгезию активатора к фольге.

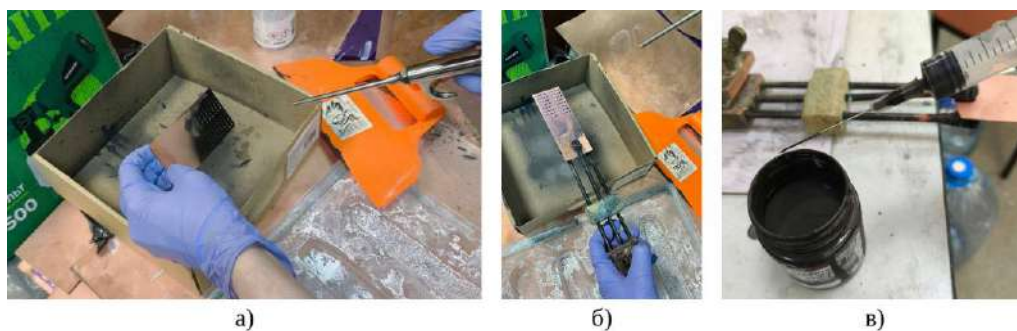


Рисунок 47 — Корректировка методики активации: а — продувка отверстий с графитовой смазкой компрессором; б — продувка отверстий после нанесения активатора АКГФМ; в — подготовка медицинского шприца с графитовой краской

Вторая серия экспериментов выполнена по скорректированной методике при неизменных остальных параметрах. Изготовлено дополнительно 96 тест-купонов (по 32 тест-купона на каждый тип активатора), число обработанных отверстий — 672. Общее число тест-купонов, изготовленных за обе серии, составило 192, общее число обработанных отверстий — 1344.

Распределение дефектных отверстий по диаметру и типу активатора для второй серии экспериментов приведено в таблице 10. Сравнение долей дефектных отверстий для первой и второй серий экспериментов приведено в таблице 11.

Таблица 10 — Количество дефектных отверстий, распределенных по диаметру и способу активации для второй серии экспериментов

Активатор	Кол-во дефектных отверстий, D = 2 мм	Кол-во дефектных отверстий, D = 1,8 мм	Кол-во дефектных отверстий, D = 1,5 мм	Кол-во дефектных отверстий, D = 1,2 мм	Кол-во дефектных отверстий, D = 1 мм	Кол-во дефектных отверстий, D = 0,8 мм	Кол-во дефектных отверстий, D = 0,5 мм	Итого
Графитовый спрей	6	16	6	16	20	16	32	112

АКГФМ	0	0	0	0	0	0	32	32
Графитовая краска	4	2	2	8	10	16	14	56
Итого	10	18	8	24	30	32	78	200

Таблица 11 — Доля дефектных отверстий для каждого метода активации для каждого этапа экспериментов

Активатор	Графитовый спрей	АКГФМ	Графитовая краска
Доля дефектных отверстий для 1 серии экспериментов	0,60	0,50	0,52
Доля дефектных отверстий для 2 серии экспериментов	0,50	0,14	0,25

Корректировка методики снизила долю дефектных отверстий для всех трёх типов активаторов. Наибольший эффект достигнут для активатора АКГФМ — доля дефектных отверстий снизилась с 0,50 до 0,14 (в 3,6 раза). Для активатора на основе графитовой токопроводящей краски доля дефектных отверстий снизилась с 0,52 до 0,25 (в 2,1 раза). Для активатора на основе графитового спрея корректировка дала наименьший эффект — снижение с 0,60 до 0,50 (в 1,2 раза).

Дополнительный анализ распределения дефектов по диаметру отверстий (таблица 10) показывает, что для активатора АКГФМ во второй серии экспериментов все 32 дефектных отверстия приходятся на диаметр 0,5 мм; для отверстий диаметром 0,8 мм и более дефекты не зафиксированы. Это определяет границу применимости активатора АКГФМ в исследованном диапазоне: при толщине заготовок от 0,5 до 1,5 мм отверстия диаметром 0,8 мм и более металлизированы без дефектов.

2.8 Выводы по главе 2

В главе разработаны струйный способ металлизации печатных плат с подачей электролита снизу вверх и макет автоматизированной установки для его реализации, выполнен сравнительный анализ систем прямой металлизации и проведены сравнительные испытания активаторов на 192 тест-купонах (1344

отверстия диаметром 0,5–2 мм). По результатам главы можно сделать следующие выводы.

– Подача электролита снизу вверх при перемещении платы над неподвижным соплом ограничивает контакт электролита с платой зоной натекания струи: после соударения электролит стекает вниз, не растекаясь по плате и не затекая на её обратную сторону. Это создаёт условия для селективного осаждения меди без фоторезиста и упрощает защиту механизмов установки от электролита.

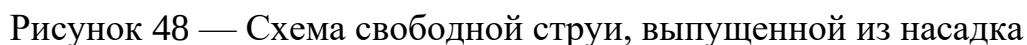
– Опыт с ручной подачей струи подтвердил осаждение меди на активированный слой по диэлектрику, однако при режимах, принятых для гальванических ванн, на проводнике возникает эффект «собачьей кости». Следовательно, режим струйной металлизации нельзя переносить из процесса металлизации в гальванической ванне; его необходимо рассчитывать по модели распределения толщины осажденной меди для струйного процесса.

– Ручное перемещение струи не обеспечивает равномерного покрытия, поэтому плата должна перемещаться над соплом автоматически. На автоматизированном макете размах толщины покрытия по образцу (10,2 мкм при среднеквадратичном отклонении 4,23 мкм) не превышает $2,8 \cdot s_r = 11,8$ мкм, то есть макет обеспечивает равномерное покрытие. Истечение электролита из сопла диаметром 0,838 мм ламинарное (скорость 2,2 м/с, $Re = 1320$, расход около 73 мл/мин).

– Из рассмотренных систем прямой металлизации палладиевая требует импортных реагентов и наибольшего времени подготовки поверхности (2250 с по технологической карте). Графитовая система даёт покрытие с низкой адгезией, которое разрушается при изготовлении микрошлифа и поэтому не допускает разрушающего контроля, а толщина покрытия за цикл металлизации не превышает 20 мкм. Система на основе аммиачного комплекса гипофосфита меди не требует драгоценных металлов и импортных реагентов, допускает контроль микрошлифами и обеспечивает в отверстиях сплошное покрытие толщиной 30–44 мкм при 43 мкм на поверхности.

– Основная причина дефектов металлизации отверстий при прямой металлизации — недостаток активатора на стенках отверстий и его неравномерное распределение по высоте стенки. Корректировка методики активации (продувка отверстий сжатым воздухом, дополнительная сушка, изменение режима термообработки и способа нанесения графитовой краски) снизила долю дефектных отверстий для всех исследованных активаторов, сильнее всего для АКГФМ — с 0,50 до 0,14. На основании полученных результатов для струйного способа принята схема подготовки поверхности на основе аммиачного комплекса гипофосфита меди [11, 18, 19, 20]

Чтобы рассчитать маршрут, по которому струя обрабатывает заготовку при металлизации, нужно выбрать учитываемые параметры. Основным параметр струи электролита — объёмный расход, определённый в разделе 2.3.1. Когда вертикальная струя натекает на плоскую преграду — печатную плату, жидкость распределяется по её поверхности неравномерно (Рисунок 48). В разделе построена модель соударения струи с поверхностью платы и определены параметры этого процесса.



После сечения 3–3 начинается основной участок струи. На этом участке скорость жидкости по мере удаления от оси потока убывает от значения u_0 до нуля.

Г. Н. Абрамович [9] получил основные параметры круглой струи и формулы для их расчёта (Таблица 12).

Таблица 12 — Расчётные соотношения для струи круглого сечения

Параметр	Значения параметров или расчетная формула
Коэффициент турбулентной структуры a	0,08
Половина угла расширения струи α	$3,4\alpha$
Расстояние от полюса до начального сечения l_0	$0,29r_0/a$
Длина начального участка L	$0,67r_0/a$
Радиус $R_{стр}$ или полутолщина b струи	$(3,4ax/r_0 + 1)r_0$
Скорость на оси основного участка струи u_{max}	$\frac{0,96u_0}{ax/r_0 + 0,29}$
Расход на основном участке струи	$2,2Q_0(ax/r_0 + 0,29)$

Сначала определим, на каком участке струи, вышедшей из сопла установки, находится плата. Расстояние между соплом и печатной платой x при работе без насадки составляет около 0,04 м. Оценка ниже выполнена для меньшего значения 0,03 м, так как при большем зазоре её вывод только усиливается. Радиус сопла r_0 для оценки принят равным $d/2 = 0,0005$ м (у сопла 18G с насадкой он равен 0,419 мм, у наконечника шприца без насадки — около 1 мм). Тогда расстояние от сопла до полюса струи равно:

$$l_0 = \frac{0,29r_0}{a} = 0,001812 \text{ м.} \quad (26)$$

Суммарная длина потока:

$$L_{сум} = x + l_0 = 0,032 \text{ м.} \quad (27)$$

Это расстояние больше длины начального участка:

$$L = \frac{0,67r_0}{a} = 0,0042 \text{ м.} \quad (28)$$

Следовательно, по теории затопленной струи плата оказалась бы в основном участке потока, где скорость по сечению распределена неравномерно. Однако струя электролита в разработанном способе незатопленная (свободная): в отличие от затопленной струи, истекающей в объём той же жидкости, электролит истекает

из сопла в воздух, и струя имеет свободную поверхность [91]. Ниже показано, что к незатопленной струе этот вывод не относится.

Радиус сечения затопленной струи при соударении с ПП был бы равен:

$$R_{\text{стр}} = r_0 \left(3,4 * \frac{ax}{r_0} + 1 \right) = 0,00866 \text{ м.} \quad (29)$$

Соотношение (29) описывает расширение затопленной струи на её основном участке, обусловленное вовлечением окружающей жидкости в слой смешения. Незатопленная струя окружающую среду не вовлекает, поэтому расширения по (29) нет. До распада струи её сечение меняется в основном под действием силы тяжести и выравнивания профиля скорости, сформированного в канале сопла (раздел 3.2.4). При подаче снизу вверх струя на пути до платы тормозится, и её сечение немного растёт. В рабочем режиме, когда на сопле установлена насадка, а зазор между её срезом и платой около 10 мм, скорость струи снижается на 2 %, а радиус возрастает на 1 %. Расчёт же по (29) для сопла диаметром 0,838 мм ($r_0 = 0,419$ мм), которым получен этот режим, дал бы радиус 3,1 мм, в 7,5 раза больше радиуса сопла. Расчёт по (29) и распределение (30) соответствуют первой из двух гипотез о распределении массоотдачи под струёй (раздел 3.2.2); в моделях (40) и (41) раздела 3.2.3 принят радиус 0,5 мм. Прямое измерение сечения проводника методом рентгеновской компьютерной томографии (раздел 3.3) показывает, что ширина зоны осаждения определяется диаметром сопла.

Распределение плотности потока жидкости по поверхности платы описываем функцией нормального распределения из работы Г. Н. Абрамовича [9]:

$$f(y) = e^{-\beta \left(\frac{y}{2R_{\text{стр}}} \right)^2}, \quad (30)$$

где $\beta = 9,2$. Полученное распределение плотности вертикального потока жидкости, натекающего на поверхность платы, показано на Рисунке 49. По этой зависимости находим точку, на которую приходится половина потока, $y = 0,000275$ м. Следовательно, для равномерного покрытия всей площади платы шаг перемещения h должен составлять $2y \approx 0,00055$ м.

Полученный шаг 0,55 мм отвечает гауссову распределению (30), то есть первой гипотезе о распределении массоотдачи (раздел 3.2.2). Измерение сечения

проводника (раздел 3.3) эту гипотезу для режима сканирования отвергает, и шаг назначается по критерию волнистости покрытия (раздел 4.1).

Определим также другие технологические параметры потока электролита для установки.

Номинальный объёмный расход по разделу 2.3.1 $Q_{\text{ном}} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; по теории затопленной струи расход у поверхности платы составил бы:

Соотношение (31) описывает рост расхода затопленной струи за счёт вовлечения окружающей жидкости; незатопленная струя окружающую среду не вовлекает, и расход у платы равен расходу через сопло. Само значение $Q_{\text{ном}}$ относится к производительности насоса рециркуляционного контура; расход непосредственно через сопло меньше. При $Q = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ скорость истечения из сопла диаметром 0,838 мм составила бы 108 м/с при числе Рейнольдса около $6,5 \cdot 10^4$, тогда как измеренная скорость истечения равна 2,2 м/с, чему отвечает $Re \approx 1,3 \cdot 10^3$ ($\nu = 1,40 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Скорость истечения и число Рейнольдса согласуются между собой, поэтому расход через сопло следует определять по ним; производительность насоса для этого непригодна. Для режима, исследованного в разделе 3.3, расход через сопло составляет около 73 мл/мин, чему отвечает $Re = 1320$, то есть ламинарный режим истечения.

$$Q = 2,2Q_0 \left(\frac{ax}{r_0} + 0,29 \right) = 6,72 * 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}. \quad (31)$$

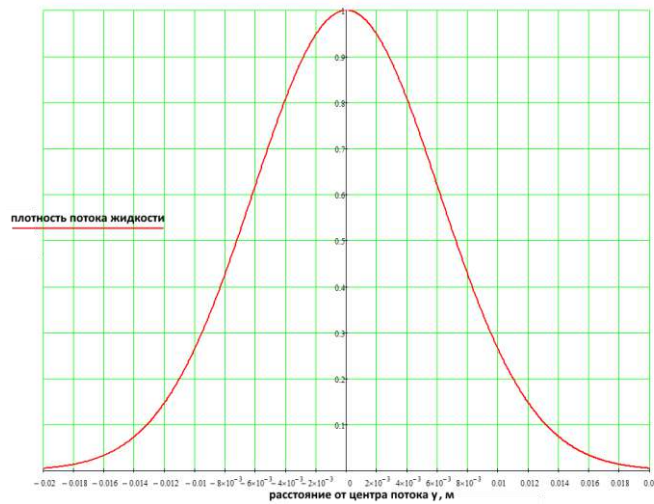


Рисунок 49 — Распределение плотности потока в сечении струи при соударении с плоской ПП

Время обработки для точки в центре линии перемещения потока равно

$$t_{\text{точки}} = \frac{2r}{V} = 0.1 \text{ с},$$

где V — скорость сканирования, 0,01 м/с.

Перемещаясь по поверхности ПП длиной l поток формирует строку шириной $2R_{\text{стр}}$, время обработки одной строки равно:

$$t_{\text{прохода}} = \frac{l}{V}. \quad (32)$$

Далее поток смещается по ширине W ПП на шаг h (0,00055 м) и покрывает площадь печатной платы линией за линией. Количество проходов для полного покрытия можно определить следующим образом:

$$N_{\text{проходов}} = \frac{W - 2R_{\text{стр}}}{h}. \quad (33)$$

Время однократного покрытия всей платы равно

$$t = t_{\text{прохода}} * N_{\text{проходов}}. \quad (34)$$

По этим формулам можно найти также число проходов за весь цикл металлизации и суммарное время обработки одной точки.

3.2 Модель распределения толщины покрытия по поверхности печатной платы

В главе 1 показано, что известные модели струйного электроосаждения построены для неподвижного сопла, а их коэффициенты подбираются по результатам предварительного осаждения. Для металлизации проводящего рисунка, при которой плата перемещается над соплом, требуется модель, рассчитывающая сечение проводника по току, времени металлизации, траектории, диаметру сопла и свойствам электролита. В настоящем разделе такая модель построена на основе закона Фарадея и закономерностей массообмена в зоне натекания струи; её экспериментальная проверка приведена в разделе 3.3.

3.2.1 Исходные соотношения модели

Толщина покрытия растёт со скоростью, пропорциональной местной плотности тока (закон Фарадея); плотность тока ограничена сверху предельной диффузионной, пропорциональной местному коэффициенту массоотдачи:

$$\dot{z}(r) = \frac{M\eta i(r)}{nF\rho}, \quad \dot{z}(r) = \dot{z}_0 f(r), \quad (35)$$

$$i_{\text{пред}}(r) = nFck(r), \quad k(r) = k_0 f(r), \quad (36)$$

где $\dot{z}$ — скорость роста покрытия, м/с; r — расстояние от оси струи, м; i — плотность тока, А/м²; M — молярная масса меди, кг/моль; ρ — плотность меди, кг/м³; $n = 2$ — число электронов, участвующих в реакции; F — постоянная Фарадея, Кл/моль; η — выход по току; $\dot{z}_0$ — скорость роста на оси струи, м/с; c — концентрация ионов меди, моль/м³; k — коэффициент массоотдачи, м/с; k_0 — его значение на оси струи; $f(r)$ — распределение массоотдачи, отнесённое к значению на оси.

Второе равенство (35) выражает допущение, что процесс идёт вблизи предельной плотности тока [87]: скорость осаждения в каждой точке следует местному массопереносу, и её распределение повторяет распределение

массоотдачи $f(r)$. Выполнение этого допущения в режиме настоящей работы проверено в разделе 3.3.4. Расчёт толщины покрытия сводится, таким образом, к двум вопросам: каково распределение массоотдачи под струёй и как оно переносится на плату при её перемещении над соплом.

3.2.2 Две гипотезы о распределении массоотдачи под струёй

Распределение $f(r)$ определяется гидродинамикой струи у платы. Рассмотрены две гипотезы (Рисунок 50).

Согласно первой гипотезе струя ведёт себя как затопленная, поэтому массоотдача максимальна на оси и плавно спадает к периферии, а радиус струи $R_{стр}$ растёт с расстоянием от сопла по теории Г. Н. Абрамовича [9] (соотношение (29)). Распределение массоотдачи при этом гауссово (30), а по опыту с длительной выдержкой оно уточняется степенной экспонентой (раздел 3.2.3):

$$f(r) = e^{-\beta \left(\frac{r}{2R_{стр}}\right)^2} \quad \text{или} \quad f(r) = e^{-\left(\frac{r}{R_{стр}}\right)^m}, \quad (37)$$

где $\beta = 9,2$ и $m = 3,38$ — коэффициенты формы. Первая гипотеза соответствует принятому в обзорной литературе колоколообразному распределению плотности тока под соплом [69] и положена в основу расчёта шага перемещения в разделе 3.1. Она предсказывает рост ширины пятна с зазором, колоколообразное сечение проводника с отношением ширин на уровнях 0,1 и 0,5 от максимума $W_{10}/W_{50} = 1,82$ и плавный спад толщины к краю.

Согласно второй гипотезе струя незатопленная: она не вовлекает окружающую среду и сохраняет сечение сопла. В зоне торможения ламинарной струи толщина диффузионного пограничного слоя постоянна, поэтому массоотдача не зависит от радиуса [45, 61, 96]:

$$f(r) = 1 \quad \text{при} \quad r \leq R_A; \quad f(r) = 0 \quad \text{при} \quad r > R_A, \quad (38)$$

где R_A — радиус зоны равнодоступности электрода, м. Вторая гипотеза предсказывает ширину пятна, равную диаметру сопла и не зависящую от зазора,

полуэллиптическое сечение проводника с $W_{10}/W_{50} = 1,15$ и резкий обрыв осадка у границы зоны (раздел 3.2.5).

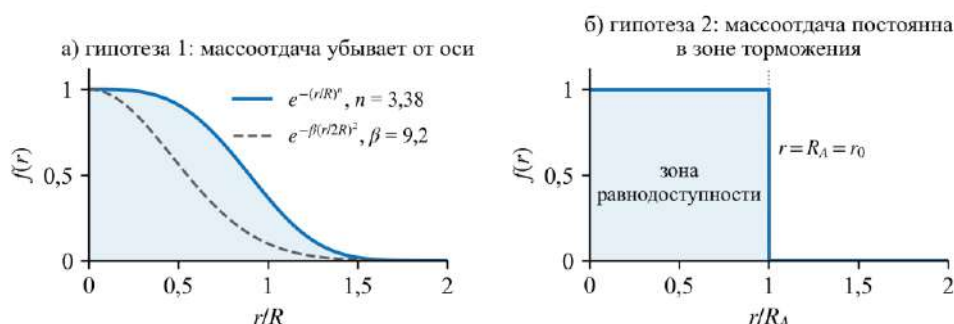


Рисунок 50 — Две гипотезы о распределении массоотдачи $f(r)$ под струёй: а) затопленная струя; б) незатопленная струя

Гипотезы различаются шириной осадка, отнесённой к диаметру сопла, отношением W_{10}/W_{50} и коэффициентом заполнения сечения. Эти признаки не зависят ни от тока, ни от времени металлизации, поэтому гипотезу можно выбрать по измеренной форме сечения проводника (раздел 3.3.2).

3.2.3 Проверка гипотезы затопленной струи опытом с неподвижным соплом

Для проверки первой гипотезы заготовки металлизировали неподвижной струёй в одной точке в течение 30, 45 и 60 мин, после чего измеряли толщину покрытия на разном расстоянии от оси струи.

Параметры опыта:

- Радиус сечения потока, принятый в аппроксимации: 0,5 мм;
- Материал покрытия: медная фольга.
- Сопло: наконечник шприца, внутренний диаметр около 1,5 мм.
- Зазор между срезом сопла и платой: около 40 мм (без насадки).

Параметры процесса металлизации:

- Ток металлизации 0,03 А;
- Время металлизации: 30, 45, 60 минут;

– Скорость потока: 2,2 м/с.

Внешний вид деталей после металлизации представлен на Рисунке 51.



Рисунок 51 — Внешний вид образцов после металлизации

Толщину покрытия измеряли методом компьютерной томографии (КТ) в каждом образце в десяти точках — от оси струи до условной границы металлизации, определённой эмпирически (Рисунок 52). Зависимости толщины от расстояния до оси при разном времени металлизации показаны на Рисунке 53.

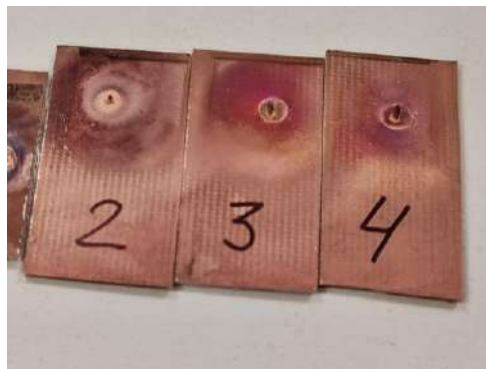


Рисунок 52 — Образец для анализа с помощью КТ

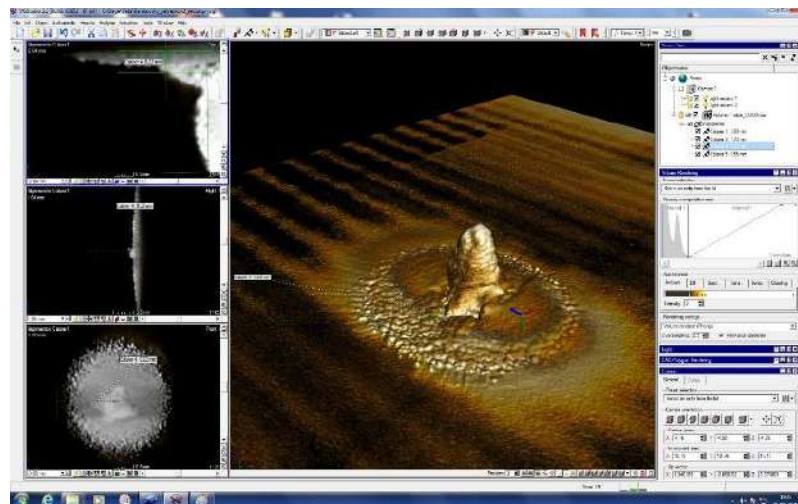


Рисунок 53 — Пример КТ металлизированной детали в трехмерном виде и в разных плоскостях



Рисунок 54 — Внешний вид системы рентгеновского контроля DAGE X-Plane

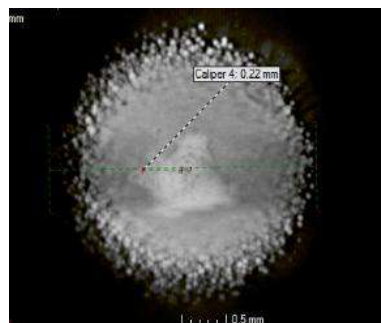


Рисунок 55 — Условная граница металлизации

Сводные результаты измерений показаны на Рисунке 56.

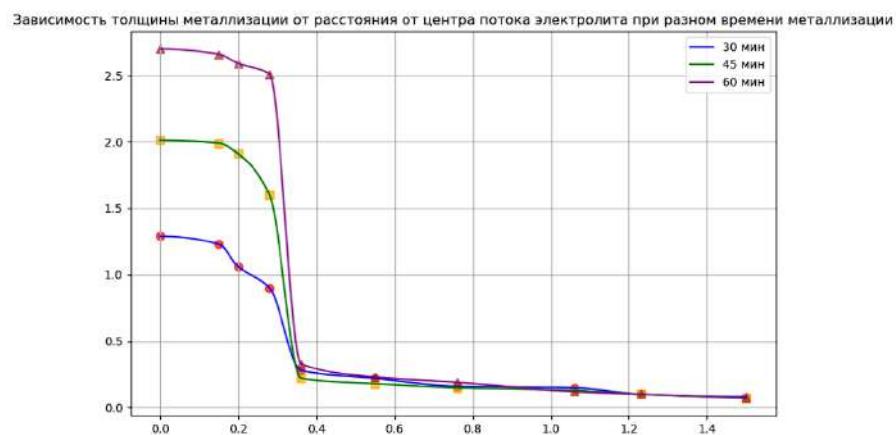


Рисунок 56 — Зависимость толщины металлизации от расстояния от центра потока электролита при разном времени металлизации

По разностям значений на графиках можно предположить, что толщина покрытия растёт со временем линейно (Рисунок 57).

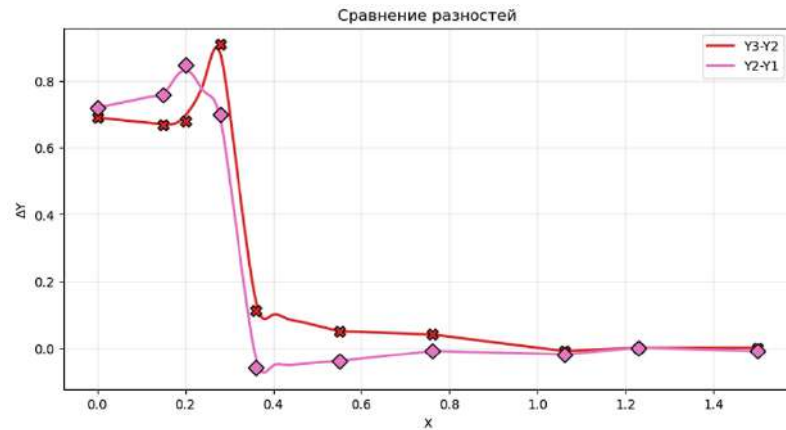


Рисунок 57 — Сравнение разностей между графиками полученных значений толщины металлизации

Для аппроксимации этой зависимости выбрано гауссово распределение (30) раздела 3.1, отвечающее первой гипотезе:

$$f(y) = Ae^{-\beta(\frac{y}{2r_0})^2}, \quad (39)$$

где r_0 – радиус сопла, A – коэффициент, зависящий от времени металлизации.

После подбора коэффициентов получаем:

$$A = 1,28 \cdot 10^{-3}; B = 1,42; r = 3,98 \cdot 10^{-4}.$$

Без множителя A эта функция по характеру полностью совпадает с распределением (30) раздела 3.1 (Рисунок 58).

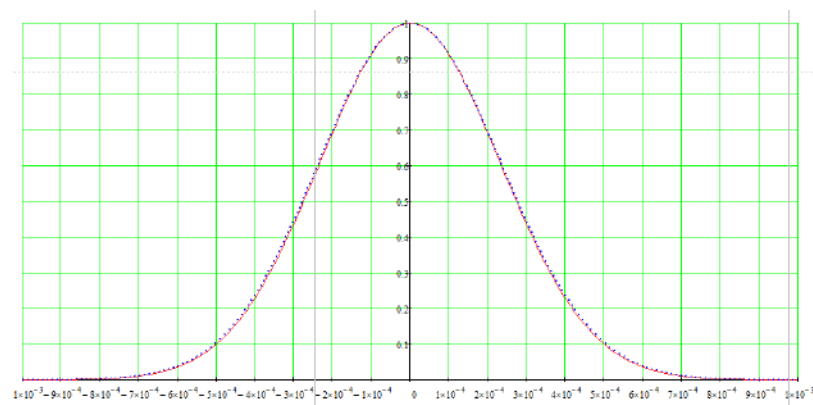


Рисунок 58 — Сравнение функций распределения профиля скоростей и распределения толщины металлизации

Поэтому в модели можно использовать коэффициенты из расчёта гидродинамического режима. После подбора коэффициентов получаем:

- Для 30 минут: $A = 1,44 \cdot 10^{-3}$;
- Для 45 минут: $A = 2,51 \cdot 10^{-3}$;
- Для 60 минут: $A = 3,11 \cdot 10^{-3}$.

Поскольку толщина покрытия растёт линейно, коэффициент A можно представить как $A = a \cdot t$, где t — время металлизации, с.

Таким образом:

$$z(y, t) = a * t * e^{-\beta \left(\frac{y}{2r_0} \right)^2}, \quad (40)$$

где $z(y, t)$ — толщина металлизации, м;

t — время, с;

a — коэффициент, равный $7,778 \cdot 10^{-7}$ м/с.

Аппроксимирующие кривые показаны на Рисунке 59.

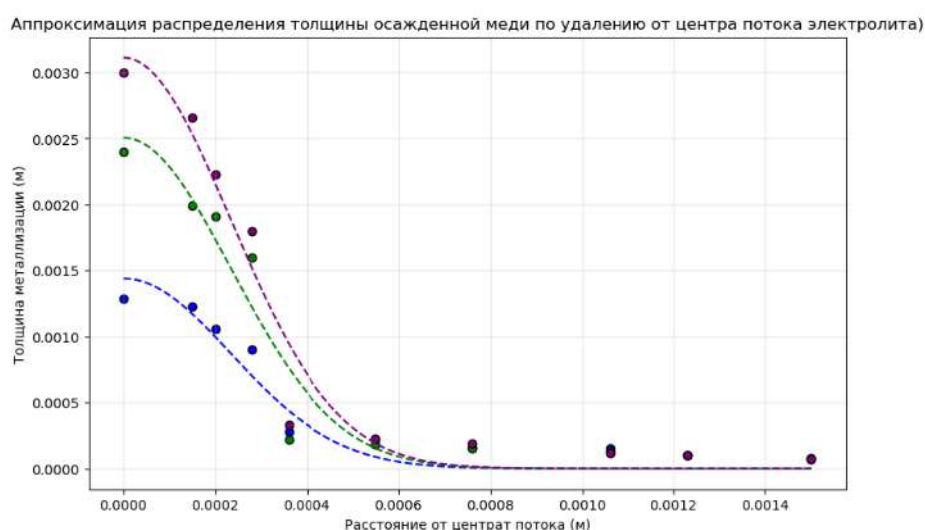


Рисунок 59 — Аппроксимация распределения толщины осажденной меди по удалению от центра потока электролита

Из этой функции следуют характеристики процесса:

За одну секунду в центре потока осаждается около 0,778 мкм меди.

На краю выбранного в разделе 3.1 радиуса y осаждается около 0,388 мкм меди в секунду.

Для осаждения 25 мкм меди необходимо металлизировать один участок в течение 32 с.

За это время на краю радиуса металлизации осядет 12,5 мкм меди. Это согласуется с оценкой раздела 3.1 и соответствует шагу перемещения $2y \approx 0,55$ мм, полученному там по гауссову распределению (30). Однако по измеренному сечению проводника (раздел 4.1) такой шаг даёт волнистость 53 %, поэтому назначен шаг 0,28 мм.

Чтобы одновременно описать центральную и периферийную зоны пятна, модель доработана:

$$z_{\text{пов}}(y, t) = \left(a \cdot e^{-\left(\frac{y}{r_0}\right)^m} + b \right) * (1 + p * (t - 1800)), \quad (41)$$

где $z(y, t)$ – толщина металлизации, мм;

a – коэффициент, равный 1,35

r_0 – радиус сечения сопла

m – степенной коэффициент, равный 3,38

b – коэффициент, равный 0,0636

p – коэффициент, равный 0,0357

t – время, с.

Уточнённая модель показана на Рисунке 60.

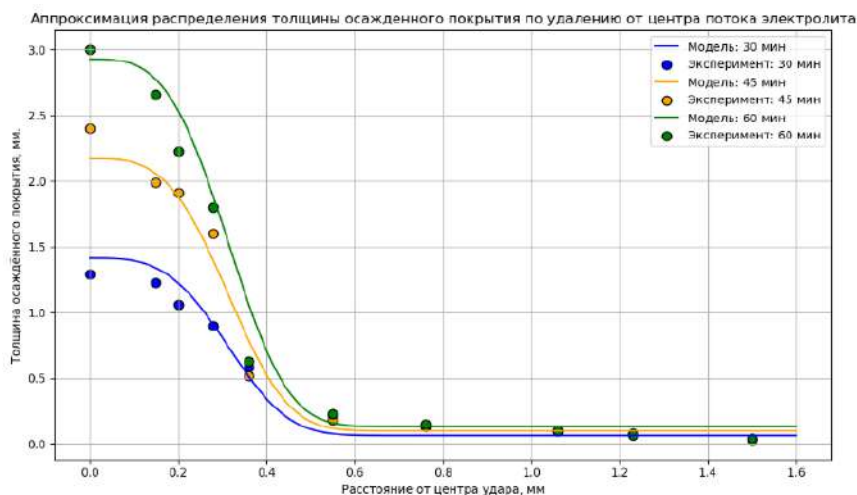


Рисунок 60 — Аппроксимация распределения толщины осажденной меди по удалению от центра потока электролита

Модели (40) и (41) построены по осадку, полученному длительной выдержкой сопла в неподвижной точке, и описывают именно этот режим. Их коэффициенты подобраны по опыту, и перенести их на другой ток, зазор или сопло без повторной калибровки нельзя. Кроме того, осадок в ходе металлизации сам изменяет условия своего роста. В начале процесса скорость осаждения распределена колоколообразно, что согласуется с первой гипотезой. Толщина осадка вокруг центральной части пятна спадает от 0,22–0,33 мм вблизи неё до 0,07–0,08 мм на расстоянии 1,5 мм от оси и после 30 мин не растёт. Центральная же часть пятна вырастает в столбчатый нарост высотой 1,3–2,7 мм при радиусе на половине высоты около 0,3 мм, более узкий, чем сама струя, радиус которой у платы около 0,8 мм (Рисунки 51 и 53). Поэтому коэффициент a в (40) описывает линейный во времени рост нароста, а аддитивный член b в (41) — нерастущий осадок вокруг него; в окне замера находится лишь 44–64 % внесённой током меди (раздел 3.3.6).

Строка, металлизированная по точкам с шагом, найденным по (40), получилась неоднородной (Рисунок 61, а): в каждой точке осадок растёт наростом, и толщина вдоль строки меняется от точки к точке. Поэтому проводящий рисунок формируется непрерывным перемещением платы над соплом (Рисунок 61, б), при котором каждая точка находится под струёй доли секунды за проход и нарост не образуется. Модель для этого режима построена в разделах 3.2.4 и 3.2.5, а первая гипотеза проверена в нём измерением сечения проводника (раздел 3.3).

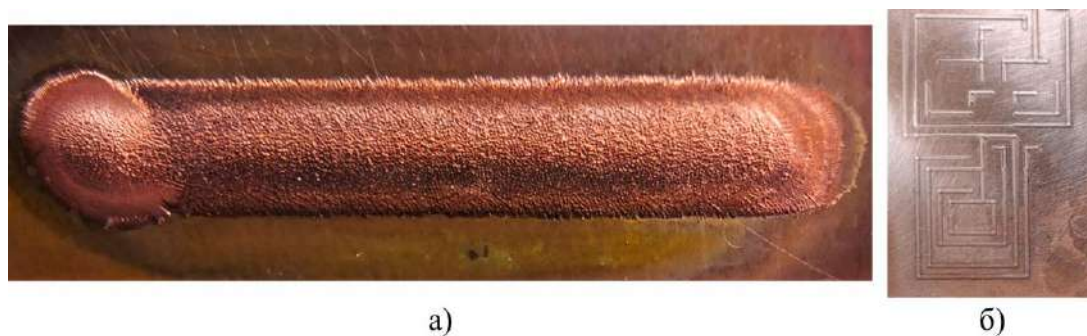


Рисунок 61 — Металлизация по точкам и непрерывным сканированием: а) строка, металлизированная по точкам с шагом по (40); б) рисунок, полученный непрерывным сканированием

3.2.4 Условия сохранения сечения незатопленной струи

Соотношения (29) и (30), на которых построены расчёт раздела 3.1 и первая гипотеза, заимствованы из теории свободной затопленной турбулентной струи [9] и описывают её основной участок. Критерий применимости задан в разделе 3.1 соотношениями (27) и (28). При расчётном значении $x = 0,03$ м (фактический зазор без насадки около 0,04 м) сумма $x + l_0 = 0,032$ м превышает длину начального участка $L = 0,0042$ м, и по теории затопленной струи соударение приходилось бы на основной участок потока.

В рабочем режиме на сопло устанавливается насадка длиной 30 мм, и зазор между её срезом и платой составляет около 10 мм, или 11,9 диаметра сопла. По теории затопленной струи это отвечает отношению $x/x_{\text{и}} = 5$, где $x_{\text{и}} = L - l_0 = 0,38 \cdot r_0/a = 2,0$ мм — расстояние от среза сопла, на котором исчезает потенциальное ядро. Следовательно, соударение происходило бы в основном участке, а радиус пятна по (29) составил бы 3,1 мм. Однако в разработанном способе струя незатопленная. Окружающая среда в неё не вовлекается, тогда как в теории затопленной струи вовлечением обусловлены и слой смешения, и расширение по (29). Поэтому деление на начальный и основной участки к такой струе неприменимо (Рисунок 62).

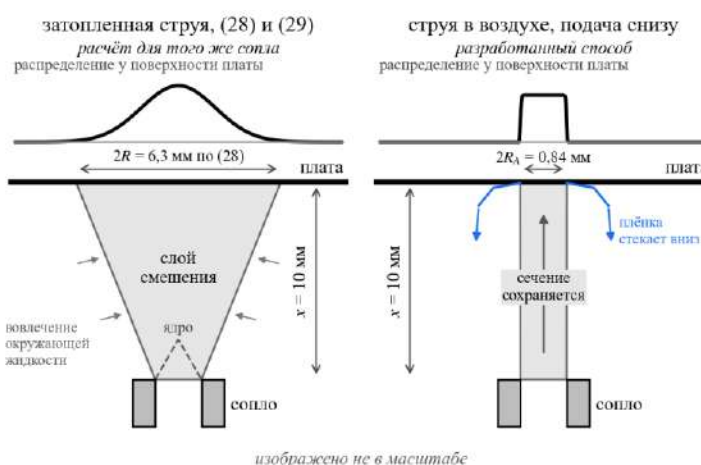


Рисунок 62 — Струя при рабочем зазоре 10 мм: расчёт по теории затопленной струи и незатопленная струя

Сечение незатопленной струи, направленной снизу вверх, изменяется на пути до платы главным образом под действием силы тяжести. Из уравнения Бернулли и условия неразрывности следует:

$$u(H) = \sqrt{u_0^2 - 2gH}, \quad R_{\text{стр}}(H) = r_0 \sqrt{\frac{u_0}{u(H)}}, \quad (42)$$

где u_0 — скорость истечения из сопла, м/с; H — зазор между срезом сопла и платой, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; r_0 — радиус сопла, м; $u(H)$, $R_{\text{стр}}(H)$ — скорость и радиус струи у платы. Для сопла 0,838 мм при $u_0 = 2,2$ м/с и $H = 10$ мм струя тормозится на 2 % и расширяется на 1 %, при $H = 40$ мм — на 8,5 и 4,5 % соответственно. Кроме того, сечение изменяется при выравнивании профиля скорости, сформированного в канале сопла с насадкой. При $Re = 1320$ длина гидродинамического начального участка (около 66 мм) сравнима с длиной канала. При выравнивании профиля струя сужается (для параболического профиля — до 0,87 диаметра канала), но на пути 10 мм выравнивание не завершается. Длина распада струи, оценённая по числу Вебера, составляет около 90 мм, то есть почти в девятеро больше зазора. Оба эффекта на порядок меньше расширения по (29) (Таблица 13).

Таблица 13 — Радиус пятна в опытах работы: расчёт по теории затопленной струи (29) и истечение струи в воздух

Опыт	Сопло d ; зазор x	x/d ; $x/x_{\text{н}}$	Радиус пятна по (29)	Радиус незатопленной струи у платы
Проводник (раздел 3.3), с насадкой	0,838 мм; 10 мм	11,9; 5,0	3,1 мм	0,42 мм (измерено: 0,436 мм)
Пятно (раздел 3.2.3), без насадки	около 1,5 мм; 40 мм	27; 11	11,6 мм	0,8 мм

Если сечение струи сохраняется ($2gH/u_0^2 \ll 1$), струя не распадается до платы (зазор много меньше длины распада), истечение ламинарное ($Re < 2000$) и

перемещение платы не искажает течение ($V/u_0 \ll 0,2$ [78]), зона натекания струи на плату совпадает с сечением сопла. В зоне торможения ламинарной струи электрод равнодоступен при радиусе до половины диаметра сопла [45]. Для струй со свободной поверхностью постоянство массоотдачи в зоне торможения следует из невязкого решения: скорость у стенки линейна по радиусу, толщина пограничного слоя постоянна, и коэффициент массоотдачи не зависит от радиуса [61]. Поэтому радиус зоны осаждения и ширина проводника определяются диаметром сопла и не зависят от зазора:

$$R_A = 0,5d = r_0, \quad (43)$$

$$W = 2R_A = d, \quad (44)$$

где R_A — радиус зоны равнодоступности, м; d — диаметр сопла, м; W — ширина проводника, м. Для струй со свободной поверхностью теория [61] даёт постоянство массоотдачи в пределах 10 % до $0,4d$ при параболическом и до $0,7d$ при равномерном профиле скорости на срезе; для затопленных струй опубликованные оценки радиуса равнодоступной зоны лежат в пределах от $0,3d$ до $0,5d$ [68]; все эти данные получены при зазорах не более шести диаметров. Значение $R_A = 0,5d$ принято по критерию [45] для ламинарного истечения и проверено измерением (раздел 3.3).

Абсолютный уровень массоотдачи в зоне равнодоступности задаёт предельную плотность тока и выход по току:

$$i_{\text{пред}} = n F c k, \quad \eta = \min\left(1; \frac{i_{\text{пред}}}{i}\right), \quad (45)$$

где k — коэффициент массоотдачи в зоне торможения, м/с, вычисляемый по корреляции для ламинарной струи [68] со скоростью и сечением струи у платы. Корреляция справедлива при числе Рейнольдса сопла не выше 2000 и радиусе не более половины диаметра; она получена для затопленной струи при отношении зазора к диаметру около единицы ($0,93 \dots 1,4$) и содержит слабую зависимость от зазора, $(H/d)^{-0,054}$, обусловленную затопленной геометрией. Для незатопленной струи массоотдача в зоне торможения определяется скоростью и сечением струи у платы, сам зазор на неё не влияет, поэтому корреляция применяется при $H/d = 1$.

При $i \leq i_{\text{пред}}$ выход по току близок к единице; при превышении предела избыточный ток расходуется на побочные реакции, а при значительном превышении осадок становится порошковым.

3.2.5 Формирование сечения проводника при перемещении платы

При перемещении платы над соплом каждая точка проходит зону осаждения по хорде, и время её пребывания под струёй пропорционально длине хорды (Рисунок 63). Поэтому толщина в точке, отстоящей на y от оси проводника, равна интегралу скорости осаждения по траектории:

$$z(y) = \frac{T}{L} \int \dot{z}(\sqrt{u^2 + y^2}) du, \quad (46)$$

где $z(y)$ — толщина покрытия на расстоянии y от оси проводника, м; $\dot{z}(r)$ — скорость роста покрытия на расстоянии r от оси струи, м/с; T — полное время металлизации, с; L — длина линии, м; u — координата вдоль направления движения, м.

Для N проходов со скоростью V множитель перед интегралом в (46) равен N/V , а поскольку $T = N \cdot L/V$, то $N/V = T/L$. Следовательно, сечение проводника определяется только полным временем металлизации и длиной линии и не зависит ни от скорости перемещения, ни от числа проходов по отдельности. Одна и та же геометрия покрытия получается при любом сочетании скорости и числа проходов, если их отношение сохраняется.

Соотношение (46) предполагает, что распределение $\dot{z}(r)$ не зависит от движения платы. Это обосновано соотношением скорости перемещения и скорости истечения: $V/u_0 = 0,01/2,2 = 0,0045$, что на два порядка ниже порога 0,2, начиная с которого движение мишени влияет на поле течения соударяющейся струи [78]. Кроме того, (46) предполагает, что высота осадка мала по сравнению с зазором и с радиусом струи и не изменяет условий натекания; выполнение этого допущения и его нарушение при длительной неподвижной выдержке рассмотрены в разделе 3.3.6.

Амплитуда распределения находится без подгонки. Процесс гальваностатический, ток задан источником питания, поэтому полный поток вещества определяется током и выходом по току. Интегрирование (46) по y даёт площадь сечения проводника, а для равномерной зоны (38) — скорость роста на оси струи:

$$\dot{z}_0 = \frac{\eta IM}{nF\rho\pi R_A^2}, \quad A = \int z(y)dy = \frac{T}{L} \cdot \frac{\eta IM}{nF\rho}, \quad (47)$$

где I — ток металлизации, A ; A — площадь сечения проводника, m^2 . Площадь сечения не зависит от вида распределения скорости осаждения. При заданных токе, выходе по току и отношении T/L она одинакова для обеих гипотез раздела 3.2.2, а от распределения зависит только форма сечения. Для равномерной зоны (38) длина хорды равна $2\sqrt{(R_A^2 - y^2)}$, и сечение проводника — полуэллипс:

$$z(y) = \frac{2\eta IMT}{\pi nF\rho L R_A^2} \sqrt{R_A^2 - y^2}, \quad |y| \leq R_A, \quad (48)$$

Для полуэллипса отношение ширин $W_{10}/W_{50} = 1,15$, коэффициент заполнения сечения — отношение площади к произведению ширины на максимальную толщину — $\pi/4 = 0,785$, а максимальная толщина в $4/\pi = 1,27$ раза больше средней. Таким образом, куполообразная форма сечения, послужившая основанием для гауссовой аппроксимации, возникает при сканировании круглой зоны постоянной интенсивности и не связана с формой струи (Рисунок 63). Свёртка гауссова распределения (30), напротив, остаётся гауссианой той же ширины с $W_{10}/W_{50} = 1,82$ и коэффициентом заполнения 0,584.



Рисунок 63 — Формирование сечения проводника при перемещении платы: а) распределение массоотдачи по двум гипотезам; б) время пребывания точки под струёй пропорционально длине хорды; в) сечение проводника

Из (46) следует также ограничение на форму сечения, не зависящее от вида распределения. Если скорость осаждения не возрастает от оси к границе зоны, распределение можно представить суммой равномерных зон радиусом не более R_A , и для каждой из них отношение толщины в точке y к толщине на оси не превышает $\sqrt{1 - (y/R_A)^2}$. Поэтому сечение проводника не может быть полнее полуэллипса той же ширины. Это свойство используется в разделе 3.3.6 при анализе отклонения измеренного сечения от расчётного.

3.3 Проверка модели методом рентгеновской компьютерной томографии

Модель раздела 3.2 проверена прямым измерением сечения проводника, полученного в рабочем режиме, то есть при перемещении платы над соплом. Измерение выполнено методом рентгеновской компьютерной томографии, которая восстанавливает сплошное поле толщин по всему сечению. Измерение решает три задачи: выбор между гипотезами раздела 3.2.2 по признакам формы, не зависящим от тока и времени; проверку абсолютной шкалы модели, рассчитанной без данных опыта; установление границ применимости модели.

3.3.1 Образец и методика измерения

Объектом служил одиночный медный проводник длиной 20 мм, осаждённый струёй электролита на сплошную медную фольгу. Режим получения проводника:

- сопло — игла 18G с внутренним диаметром 0,838 мм, что отвечает радиусу сечения сопла $r_0 = 419$ мкм;

- на сопло установлена насадка длиной 30 мм, поэтому зазор между её срезом и поверхностью платы сократился с номинальных 40 мм примерно до 10 мм (11,9 диаметра сопла); зазор измерен линейкой по месту и входит в расчёт только через слабые поправки (раздел 3.2.4);

- ток металлизации 15 мА (уставка источника питания);

- время металлизации 37–42 мин;

- движение непрерывное возвратно-поступательное вдоль линии, около 565 циклов при скорости перемещения 0,01 м/с, что отвечает полному времени 37,7 мин;

- электролит — кислый сульфатный состава, приведённого в разделе 2.2; концентрация ионов меди по данным титриметрического контроля (раздел 2.7.4) составляет 20,4 г/л.

Измерение выполнено на системе рентгеновского компьютерно-томографического контроля DAGE X-Plane, обработка реконструированного объёма — в программном обеспечении VG Studio; размер вокселя $7,642 \times 7,642 \times 6,038$ мкм. Из объёма получено 500 поперечных сечений проводника; далее приводится профиль, усреднённый по сечениям и симметризованный относительно оси проводника (асимметрия профиля не превышает 1 %), а разброс параметров оценивался по 32 независимым сечениям, разнесённым вдоль проводника.

Толщина оценивалась двумя независимыми способами. Первый — по порогу ISO-50: граница металла проводится по середине между уровнями сплошного материала и фона. Второй — по масс-толщине: вдоль луча интегрируется превышение линейного коэффициента ослабления над уровнем дальнего поля, и

результат нормируется на значение для сплошной меди. Первая оценка устойчива к выбору опорного уровня, но занижает толщину у кромки; вторая в принципе сохраняет полную массу осадка, но чувствительна к уровню фона и в этом опыте завышает массу. Площадь сечения по масс-толщине в области $|y| \leq 450$ мкм составляет 69 394 мкм², что на 11 % больше предельной по прошедшему заряду (62 351 мкм² при $\eta = 1$, Таблица 17). Поэтому баланс массы и абсолютная шкала сопоставляются с оценкой ISO-50. Оценки расходятся: максимальная толщина 85,4 против 97,2 мкм, площадь сечения 61 011 против 69 394 мкм². Это расхождение обусловлено методом измерения и не отражает свойств осадка; далее для каждого сопоставления указано, к какой из двух оценок оно относится.

Границы достоверности измерения установлены отдельно. Вокруг плотного медного объекта реконструкция даёт систематическую отрицательную ошибку: масс-толщина принимает значения до $-11,9$ мкм на удалении 500–650 мкм от оси проводника, причём отрицательна во всех 500 сечениях без исключения, и выходит на нуль только за 2 мм от проводника. Ошибка вызвана ужесточением пучка и усечением проекций рядом с сильно поглощающим объектом. Поэтому форма профиля за пределами $|y| \approx 450$ мкм по этим данным не устанавливается, опорный уровень дальнего поля следует брать не ближе 2 мм от проводника, а ширина переходной кромки не разрешается. Все сопоставления модели с измерением ниже выполнены только в области $|y| < 450$ мкм (Рисунок 64).

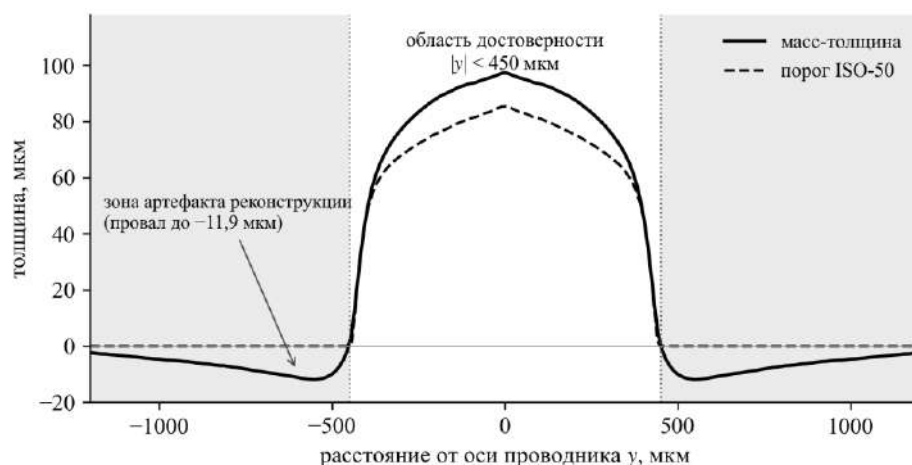


Рисунок 64 — Измеренное сечение проводника по двум оценкам толщины и область достоверности измерения

3.3.2 Выбор между гипотезами о распределении массоотдачи

Гипотезы раздела 3.2.2 различаются отношением ширины проводника к диаметру сопла, отношением ширин W_{10}/W_{50} и коэффициентом заполнения сечения. Эти признаки не зависят от тока, времени металлизации и выхода по току, поэтому для сопоставления по ним абсолютная шкала не нужна. Для сравнения распределения (37) и (38) свёрнуты по (46) при радиусе, равном радиусу сопла, и нормированы на площадь сечения по закону Фарадея (47) при $\eta = 1$ (Таблица 14).

Таблица 14 — Признаки формы сечения проводника: расчёт по двум гипотезам и измерение

Распределение	W_{10} , мкм	W_{50} , мкм	W_{10}/W_{50}	Коэффициент заполнения	Максимальная толщина, мкм	СКО от измеренного: ISO-50 / масс- толщина, мкм
Гипотеза 1: (39), $\beta = 9,2$	838	460	1,82	0,584	127,3	27,9 / 27,1
Гипотеза 1: (41), $m = 3,38$	1004	653	1,54	0,651	95,3	12,1 / 14,8
Гипотеза 2: (48), $R_A = r_0$	834	726	1,15	0,789	94,7	10,7 / 10,3
Гипотеза 2 с учётом наклона струи 19°	882	768	1,15	0,789	89,6	5,4 / 8,6
Измерено, порог ISO-50	872	812	1,07	0,820	85,4	—
Измерено, масс- толщина	875	795	1,10	0,815	97,2	—

Измерение однозначно подтверждает вторую гипотезу. Отношение W_{10}/W_{50} составляет 1,07 по оценке ISO-50 и 1,10 по масс-толщине, что близко к 1,15 для полуэллипса и далеко от 1,82 для гауссова распределения; коэффициент заполнения 0,82 близок к $\pi/4 = 0,785$ и далёк от 0,584. Граница осадка резкая, толщина спадает от половины максимальной до 10 % на расстоянии 30–40 мкм (Рисунок 64). Ширина проводника на уровне 10 % от максимума составляет 872 мкм, или 1,04 диаметра сопла, тогда как по теории затопленной струи (29) она составила бы 6,3 мм.

Гауссово распределение (39) описывает измеренное сечение хуже, чем горизонтальная прямая на уровне средней толщины (среднеквадратичное

отклонение 27,9 против 18,7 мкм по оценке ISO-50), так как свёртка гауссова пятна даёт ширину на половине высоты 460 мкм против измеренных 812 мкм. Распределение (41) с показателем 3,38, подобранным по опыту с неподвижной выдержкой, даёт сечение шире измеренного на 15 % и с плавной границей, тогда как измеренная граница резкая. Тем самым первая гипотеза для режима сканирования отвергается. Колоколообразное распределение описывает осадок при длительной неподвижной выдержке (раздел 3.2.3), но не формирование проводника.

Из одного опыта не следует, что ширина (44) постоянна при изменении зазора. Это свойство опирается на сохранение сечения струи в воздухе (раздел 3.2.4), и его прямая проверка вынесена в перспективы развития работы.

3.3.3 Сопоставление расчётного и измеренного сечения проводника

Расчёт по модели раздела 3.2 выполнен без данных опыта — по току 15 мА, времени металлизации 37,7 мин, длине линии 20 мм, диаметру сопла 0,838 мм и свойствам меди при $\eta = 1$ (выполнение этого условия проверено в разделе 3.3.4). Площадь сечения по (47) составляет 62 351 мкм², средняя толщина в пределах измеренной ширины проводника — 71,5 мкм.

Струя в опыте была наклонена поперёк проводника. Зона натекания наклонной струи на плату имеет форму эллипса с полуосью поперёк проводника $r_0/\cos \theta$; площадь сечения проводника от наклона не зависит, а сечение остаётся полуэллипсом шириной $2r_0/\cos \theta$. Угол наклона на установке не измерялся; по профилю сечения он оценивается в 17–21° по двум оценкам толщины, и в расчёте принято $\theta = 19^\circ$. Площадь сечения и средняя толщина от угла не зависят и рассчитываются без единого параметра, взятого из опыта. Ширина и максимальная толщина зависят от угла, определённого по тому же профилю, поэтому их согласие проверяет только форму сечения (Таблица 15, Рисунок 65).

Таблица 15 — Расчётные и измеренные параметры сечения проводника

Параметр	Расчёт по (47), (48) при $R_A = r_0$	Расчёт с учётом наклона струи 19°	Измерено, порог ISO-50	Отклонение расчёта с учётом наклона
Ширина на уровне 10 % от максимума, мкм	834	882	872	+1,2 %
Площадь сечения, мкм ²	62 351	62 351	61 011	+2,2 %
Средняя толщина, мкм	71,5	71,5	70,0	+2,1 %
Максимальная толщина, мкм	94,7	89,6	85,4	+4,9 %

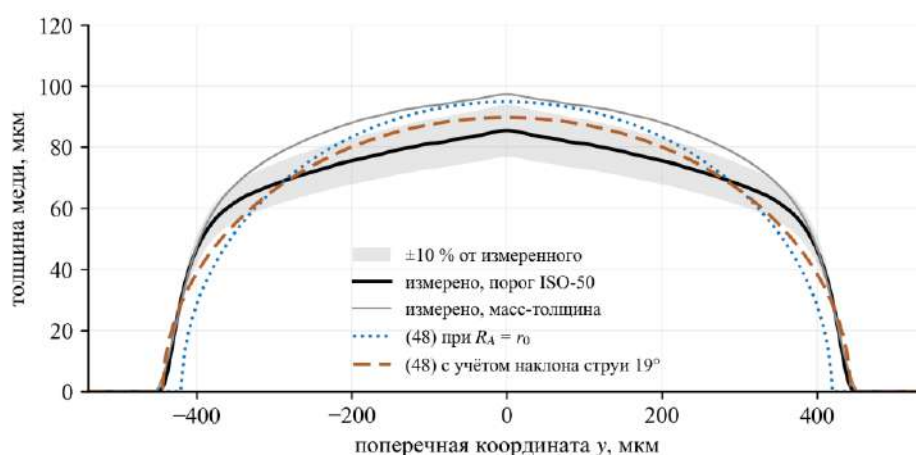


Рисунок 65 — Сечение проводника: измерение по двум оценкам толщины и расчёт по (48) без учёта и с учётом наклона струи

Расчёт отличается от измерения по оценке ISO-50 на 2,2 % по площади сечения и на 2,1 % по средней толщине, с учётом наклона струи — на 1,2 % по ширине и на 4,9 % по максимальной толщине. Два измеренных значения максимальной толщины (85,4 и 97,2 мкм) охватывают оба расчётных значения — 89,6 и 94,7 мкм. Без учёта наклона расчётная ширина на 4,4 % меньше измеренной, а максимальная толщина на 11 % больше оценки ISO-50.

Отклонение по площади сечения лежит в пределах погрешности исходных данных. Ток задан уставкой источника питания, время металлизации — числом циклов движения (окно 37–42 мин соответствует выходу по току от 0,88 до 1,0 при сходящемся балансе), а оценка ISO-50 занижает толщину у кромки. Коэффициент вариации площади сечения по длине проводника составляет 1,6 %, ширины — 1,5 % (раздел 3.3.7), то есть расхождение расчёта с измерением сравнимо с разбросом самого измерения.

3.3.4 Осаждение вблизи предельной диффузионной плотности тока

Модель раздела 3.2 опирается на допущение, что осаждение идёт вблизи предельной плотности тока, и вместе с тем требует, чтобы предел не был превышен, иначе часть тока расходуется на побочные реакции и выход по току в (47) становится меньше единицы. Для режима опыта плотность тока на сечение сопла составляет $I/(\pi r_0^2) = 272 \text{ А/дм}^2$, с учётом эллиптической зоны натекания наклонной струи — 257 А/дм^2 . Это на два порядка выше плотности тока в стационарной гальванической ванне ($3\text{--}4 \text{ А/дм}^2$). Такой режим возможен благодаря интенсивному массопереносу в соударяющейся струе.

Коэффициент массоотдачи вычислен по корреляции для зоны торможения ламинарной струи [68] при $H/d = 1$ со скоростью и сечением струи у платы (раздел 3.2.4); при расходе через сопло 73 мл/мин число Рейнольдса равно 1320. Подстановка $c = 321 \text{ моль/м}^3$ (20,4 г/л), $D = 5,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ и $\nu = 1,40 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ даёт $k = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$ и предельную плотность тока по (45) $i_{\text{пред}} \approx 280 \text{ А/дм}^2$. Таким образом, отношение рабочей плотности тока к предельной составляет 0,97 (0,92 с учётом наклона струи). При формальном распространении зависимости корреляции от зазора до $H/d = 11,9$ оно составило бы около 1,1. Выбор корреляции вносит неопределённость около 1,5 раза, поэтому граница «под пределом — за пределом» лежит внутри полосы этой неопределённости. На форму распределения она не влияет.

Из работы вблизи диффузионного предела следуют четыре наблюдаемых свойства процесса.

— Форма осадка повторяет распределение массоотдачи; распределение тока в омическом поле на неё практически не влияет. Вблизи предела поверхностная концентрация ионов меди мала по сравнению с объёмной, поэтому скорость осаждения в каждой точке следует местному массопереносу, равномерному в зоне торможения. Обзорная литература по струйной электрохимической обработке исходит из противоположного: для цилиндрических сопел распределение плотности тока принимается колоколообразным, а допущение о равномерной

плотности тока в зоне соударения оценивается как нереалистичное [69]. Это верно для процессов вдали от диффузионного предела, где форма осадка следует распределению тока. В исследованном режиме она следует распределению массоотдачи, и сечение проводника близко к полуэллипсу.

— Выход по току близок к единице. Баланс массы при $n = 2$ требует времени металлизации не менее 37 мин, то есть у нижней границы окна 37–42 мин, указанного для опыта (раздел 3.3.1). При принятом времени 37,7 мин (565 циклов) выход по току равен 0,98 (Таблица 17), на верхней границе окна — 0,88.

— Осадок плотный, объёмная доля пустот составляет $9 \cdot 10^{-6}$ (раздел 3.3.7). За диффузионным пределом осадок при таких плотностях тока был бы порошковым. Переход в порошок наступает при отношении рабочей плотности тока к предельной около 1,6, тогда как в исследованном режиме оно не превышает 1,1. Положение рабочего режима относительно предельной плотности тока и порога порошкообразования показано на Рисунке 66.

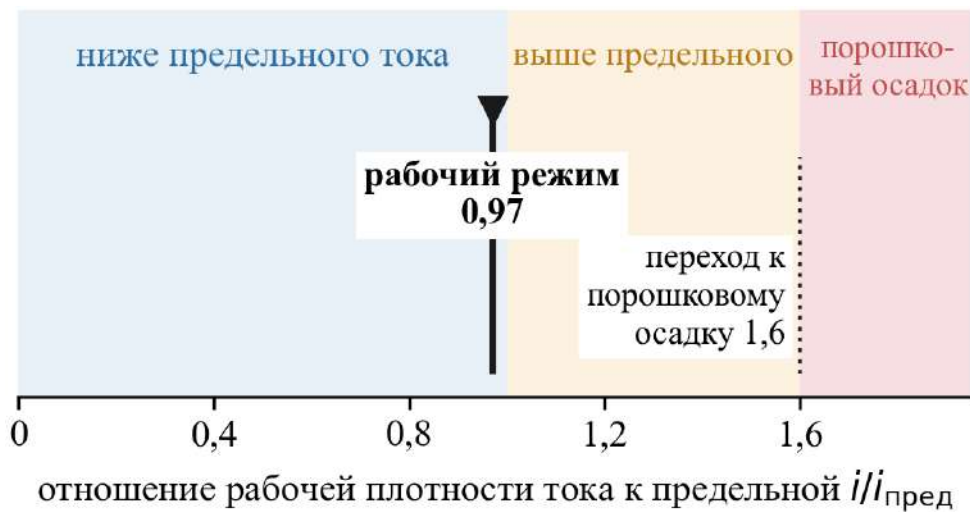


Рисунок 66 — Зоны выбора плотности тока относительно предельной и рабочий режим струйной металлизации

— Распределение тока определяется не только активационной, но и концентрационной поляризацией. Вблизи предела концентрационная составляющая поляризационного сопротивления велика, поэтому распределение

тока смещается от первичного к распределению массоотдачи, и первичное распределение, рассчитанное без учёта поляризации, не реализуется (раздел 3.3.5).

Проверка способа оценки предельного тока на независимых данных. Работа [40], выполненная на золоте при диаметре сопла 400 мкм и зазоре 1 мм, содержит две измеренные кривые: скорость роста осадка и выход по току в зависимости от плотности тока. Если применить к обеим кривым закон Фарадея, можно найти величину, которую авторы не строили, — диаметр эквивалентного диска постоянной толщины, прямую меру локализации осадка. Он составляет 1,49 диаметра сопла при плотности тока 3 А/см² и сжимается до 1,22 диаметра при 16 А/см².

Расчёт предельной плотности тока для их режима по той же корреляции зоны торможения при концентрации золота 20 г/л, температуре 55 °С и числе Рейнольдса 10600 даёт 2,3...3,1 А/см². В этой же точке в их работе наблюдаются три независимых события: выход по току достигает максимума, ширина осадка резко уменьшается с 9 до 1,2 мм и начинается сжатие эквивалентного диска. Совпадение расчётной предельной плотности тока с положением наблюдаемого перехода получено без подгоняемых параметров на другом металле, другом электролите и другой установке.

Следует оговорить границы этой проверки. Корреляция зоны торможения получена для ламинарного истечения, тогда как режим [40] турбулентный; различие внесено в приведённую неопределённость расчёта. Выше предельного тока простая срезка (45) не воспроизводит вид кривой выхода по току: отношение предельной плотности тока к рабочей даёт 0,30 при 9 А/см² против измеренных 0,47. Отклонение одностороннее и растёт с током, что соответствует известному загроблению поверхности осадка при высоких плотностях тока и связанному с ним росту массообмена. В исследованном в настоящей работе режиме рабочая плотность тока не выходит за предел далее неопределённости корреляции, и этот эффект не проявляется.

3.3.5 Граница осадка и ширина проводника

Ширина осаждаемого проводника — ключевая характеристика разработанного способа, поскольку она определяет разрешающую способность и в конечном счёте возможность формировать проводящий рисунок без фоторезиста. Измерение показало, что полуширина проводника на уровне 10 % от максимума составляет 436–438 мкм по двум оценкам толщины, то есть 1,04–1,05 радиуса сопла, а толщина спадает от половины максимальной до 10 % на расстоянии 30–40 мкм (Таблица 16); собственная ширина переходной кромки томографией не разрешается. Чтобы объяснить такую резкую границу, проверены четыре механизма.

Таблица 16 — Характерные полуширины сечения проводника: измерение и расчёт по (48)

Величина	Измерено, ISO-50	Измерено, масс-толщина	Расчёт (48), $R_A = r_0$	Расчёт (48), наклон 19°
Полуширина на уровне 50 % максимума, мкм	406	398	363	384
Полуширина на уровне 10 % максимума, мкм	436	438	417	441
Полуширина на уровне 10 %, в долях r_0	1,04	1,05	0,995	1,05

Хвост пристенной струи. Гипотеза о том, что граница осадка совпадает с затуханием массообмена в растекающейся пристенной струе, предполагает плавный спад толщины за пределами сечения струи. Расчётный профиль с таким спадом шире измеренного. При последовательном отодвигании границы осадка от 450 до 2000 мкм отклонение расчётного профиля от измеренного монотонно растёт, и этот результат воспроизводится на всех шести привлечённых опубликованных профилях массоотдачи. Гипотеза отвергается.

Первичное (омическое) распределение тока. Рассчитано численно для осесимметричной области: столб электролита радиусом r_0 с изолирующей границей, питаемый током, равномерным по сечению, переходит в протяжённый слой электролита под изолирующей верхней границей. Ток растекается за край сечения струи на сотни микрометров. При толщине слоя от 0,1 до 0,3 диаметра

расчётная ширина профиля на уровне 10 % составляет 960...1390 мкм против измеренных 872 мкм, а при толщине 0,3 диаметра среднеквадратичное отклонение от измеренного профиля — 19,4 мкм. В рабочем режиме растекание тока за пределы пятна ограничено толщиной стекающей по плате плёнки, поэтому расчёт имеет оценочный характер. Решающее значение имеет то, что осаждение идёт у диффузионного предела (раздел 3.3.4) и форма осадка следует распределению массоотдачи. Гипотеза отвергается.

Гидравлический прыжок. Подстановка параметров режима в классические соотношения для радиуса кругового гидравлического прыжка даёт значения в 7,5–41 раз больше измеренного. Кроме того, измеренный радиус в 3,8–4,2 раза меньше радиуса развития плёнки $rb_l = 0,1833 \cdot d \cdot Re^{1/3} = 1685$ мкм, то есть лежит в области, где ни одна из теорий прыжка не определена [39]. Гипотеза отвергается.

Остаётся четвёртый механизм — граница смоченной области. Струя незатопленная, поэтому окружающая среда в неё не вовлекается и сечение не размывается. На пути до платы (около 10 мм) сечение меняется в основном под действием силы тяжести и выравнивания профиля скорости: при подаче снизу вверх струя тормозится на 2 % и расширяется на 1 %, а на капли распадается лишь на расстоянии около 90 мм. Струя приходит на плату практически с сечением сопла, и с радиусом её сечения совпадает радиус равнодоступности электрода в зоне торможения при ламинарном истечении — половина диаметра (43). Однако границу смоченной области гидродинамика струи не определяет. Растёкшаяся плёнка покидает зону торможения со скоростью, близкой к скорости струи (число Вебера плёнки около 16, течение инерционное); сила тяжести за время её пробега на расстояние порядка радиуса сопла практически не успевает её сместить, а по [39] тонкая плёнка растекается до радиуса прыжка независимо от ориентации поверхности. Совпадение границы осадка с границей смоченной области, равной сечению струи, поэтому остаётся гипотезой, для проверки которой нужно прямое наблюдение смоченной области при подаче снизу вверх. Установлено лишь, что осадок сосредоточен в пределах сечения сопла и его полуширина составляет 1,04–1,05 r_0 .

С привязкой ширины зоны осаждения к сечению сопла согласуются независимые источники: расчёт равнодоступной зоны радиусом r_0 для струйного электрода [68]; критерий равнодоступности при ламинарном истечении, полученный для высот сопла от 0,2 до 6 диаметров [45]; измеренный излом профиля осадка на радиусе, равном радиусу сопла, при струйном электроосаждении меди [85]. Все они получены при зазорах не более шести диаметров, большей частью для затопленных струй, тогда как в настоящей работе струя незатопленная, а зазор составляет 11,9 диаметра. Их согласие с измерением получено экстраполяцией, и вывод опирается на само измерение. Омическое перераспределение тока в исследованном режиме также исключается: согласно расчёту [57], максимум плотности тока смещается с оси под кромку сопла лишь при отношении межэлектродного зазора к радиусу сопла менее 0,5, тогда как в настоящей работе межэлектродный зазор не меньше зазора между соплом и платой, и это отношение составляет не менее 24. Следовательно, наблюдаемая форма сечения отражает распределение массоотдачи.

Технологическое следствие. Ширина осаждаемого проводника определяется по (44) диаметром сопла, поскольку на пути до платы струя не расширяется. Измеренная ширина проводника составляет 872 мкм на уровне 10 % от максимума при диаметре сопла 838 мкм, то есть 1,04 диаметра. Таким образом, разрешающая способность способа задаётся выбором сопла. Независимость ширины от расхода электролита и тока металлизации следует из модели (44), но опытом не проверялась.

Зависимость ширины следа струи от зазора в опубликованных данных однозначно не установлена. Три работы содержат параметрические серии по зазору: при струйном осаждении меди соплами 1 и 2 мм относительная ширина пятна растёт с 1,20 до 2,10 при увеличении относительного зазора с 0,25 до 3 [85]; при осаждении с принудительным отсосом диаметр контактного пятна растёт с 475 до 542 мкм при увеличении зазора с 30 до 90 мкм [86]; убывание ширины с зазором получено лишь при анодной обработке [94]. Все эти серии сняты при зазорах не более трёх диаметров и в иных конфигурациях подачи. Постоянство ширины (44)

в разработанном способе опирается на сохранение сечения незатопленной струи: сечение изменяется главным образом под действием силы тяжести (торможение на 2 % при зазоре 10 мм и на 8,5 % при 40 мм), а распад струи наступает лишь на расстоянии около 90 мм. В настоящей работе получена одна измеренная точка: 872 мкм при диаметре сопла 838 мкм и зазоре около 10 мм. Проверка при нескольких зазорах вынесена в перспективы развития работы.

Ширина осадка ограничивается не только сечением струи. В работе [86] при неизменных сопле, зазоре, расходе и токе изменялась только смачиваемость подложки: ширина осадка сократилась с 490 до 330 мкм, а на супергидрофобном покрытии осадок не образовался вовсе. Следовательно, в конфигурации мениска с отсосом ширину определяет граница смоченной области. При подаче струи сверху вниз без удаления плёнки электролит покрывает подложку на пятнадцать диаметров, тогда как ширина осадка составляет 1,33 диаметра [98], а при изменении плотности тока от 0,75 до 9 А/см² ширина осадка изменяется в 7,5 раза при одной и той же смоченной области [40]; рабочая плотность тока настоящей работы, 2,7 А/см², лежит в области узкого осадка. Сопоставление опубликованных отношений ширины к диаметру затруднено тем, что уровень отсчёта ширины в источниках не указан: приведённому в [40] отношению 3,00 отвечает по балансу Фарадея компактное ядро осадка около 1,4 диаметра, а превышение приходится на тонкий периферийный шлейф. Фактическую ширину определяет наиболее жёсткое из действующих ограничений: граница смоченной области, изолирующая стенка сопла или омическое сжатие тока в плёнке. Какое из них действует в разработанном способе, по имеющимся данным установить нельзя.

Отсюда следует и предел разрешающей способности способа: ширина проводника не может превышать размер смоченного пятна, а оно при полном удалении растёкшейся плёнки стремится к сечению струи. Прямой путь к более тонкому проводнику — уменьшение диаметра сопла; влияние зазора, расхода и тока на ширину при подаче снизу вверх опытом не исследовалось.

Проверка неподвижности границы. Пока высота осадка мала по сравнению с радиусом сечения струи, граница не должна смещаться со временем, поскольку не

меняются ни сечение струи, ни область соударения. Для исследованного проводника отношение максимальной толщины к зазору составляет 0,009, а к радиусу струи — около 0,2, и разброс ширины по 32 независимым сечениям составляет 1,5 %, то есть граница действительно неподвижна. Смещения границы следует ожидать тогда, когда высота осадка станет сравнимой с радиусом сечения струи; условие (63) исключает касание сопла и покрытия.

3.3.6 Режимы роста осадка и отклонение сечения от полуэллипса

Измеренное сечение согласуется с расчётом по площади, ширине и максимальной толщине, однако по форме оно полнее полуэллипса: коэффициент заполнения 0,82 против 0,785, $W_{10}/W_{50} = 1,07\text{--}1,10$ против 1,15, а на расстоянии 375 мкм от оси толщина составляет 0,62–0,66 максимальной против 0,52 у полуэллипса той же ширины. Согласно разделу 3.2.5, ни одно распределение, в котором скорость не возрастает к границе зоны, при линейном сложении проходов такого сечения не даёт. Следовательно, у границы зоны осадок растёт быстрее, чем на оси. Это не противоречит второй гипотезе, но требует объяснения.

Распределение толщины по поверхности платы измерялось в работе дважды и на разных установках. Первый раз — по неподвижному пятну (сопло — наконечник шприца с внутренним диаметром около 1,5 мм, без насадки, зазор около 40 мм, ток 0,03 А; раздел 3.2.3), второй — по проводнику (сопло диаметром 0,838 мм с насадкой, зазор около 10 мм, ток 0,015 А). Опыты различаются одновременно диаметром сопла, зазором, током и режимом роста осадка, поэтому сопоставлять их корректно лишь по балансу массы и по качественным признакам формы. Баланс массы выполнен для каждого опыта отдельно: объём меди, вычисленный по прошедшему заряду и закону Фарадея, сопоставлен с объёмом, найденным интегрированием измеренного профиля (Таблица 17).

Таблица 17 — Баланс массы по двум сериям измерений распределения толщины

Опыт	Ток, А	Время, мин	Внесено зарядом, мм ³	Найдено в профиле, мм ³	Доля
Пятно	0,03	30	1,985	1,268	0,64
Пятно	0,03	45	2,977	1,406	0,47
Пятно	0,03	60	3,969	1,754	0,44
Проводник	0,015	37,7	1,247	1,220	0,98

Профиль проводника содержит практически весь прошедший заряд, баланс сходится с точностью 2 %. Профиль неподвижного пятна в окне замера, доведённом до 1,5 мм от оси, содержит 0,64 внесённой меди при 30 мин и 0,47 и 0,44 при 45 и 60 мин, то есть доля убывает с продолжительностью выдержки. Масса осадка в этом опыте не измерялась, а за пределами 1,5 мм толщина не измерялась; поэтому установить, какая часть дефицита массы приходится на периферию пятна, а какая — на пониженный выход по току при росте нароста у предельной плотности тока, по имеющимся данным нельзя.

Отношение толщины осадка к зазору мало в обоих опытах (0,009 для проводника и 0,03...0,07 для пятна), поэтому изменение зазора в ходе опыта не объясняет дефицит меди в пятне. Для незатопленной струи геометрия соударения определяется прежде всего отношением высоты осадка к радиусу струи: для проводника оно составляет около 0,2, а в пятне уже к 30-й минуте струя натекает на медный нарост высотой 1,3 мм, к 60-й — 2,7 мм, при радиусе на половине высоты около 0,3 мм. Поэтому нельзя исключить, что дефицит меди в пятне связан с изменением формы поверхности соударения.

Два набора данных не противоречат друг другу, если учесть, что осадок в ходе металлизации сам изменяет условия своего роста. Вблизи предельной плотности тока скорость осаждения в каждой точке определяется местным массопереносом (раздел 3.3.4), а часть осадка, выступающая в поток, получает электролита больше окружающей поверхности, поскольку диффузионный слой на ней тоньше. Поэтому форма осадка сама себя усиливает, и результат зависит от того, где оказывается выступ (Рисунок 67).

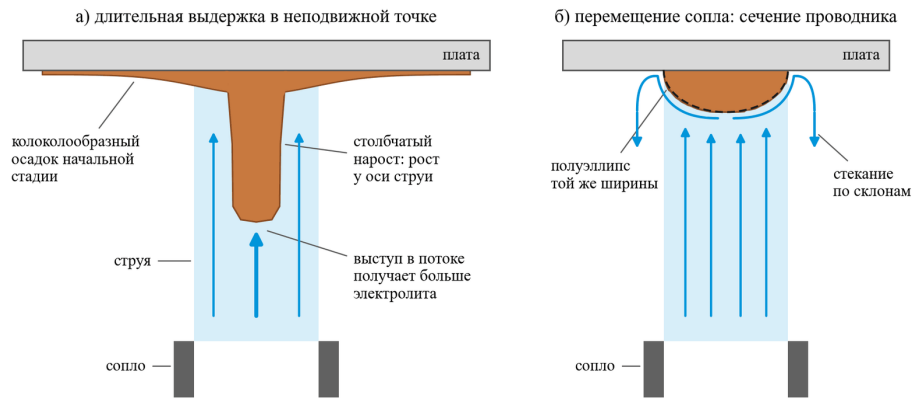


Рисунок 67 — Рост осадка при длительной выдержке в неподвижной точке (а) и при перемещении сопла (б)

При неподвижной выдержке наиболее высокая точка осадка находится на оси, в точке торможения струи, и рост сосредоточивается у оси. Начальное распределение, заданное потоком, колоколообразно: осадок вокруг центральной части спадает от 0,22–0,33 мм до 0,07–0,08 мм на расстоянии 1,5 мм от оси (Рисунок 56), что отвечает первой гипотезе. Далее центральная часть вырастает в столбчатый нарост: уже при 30 мин его высота составляет 1,29 мм при радиусе на половине высоты 0,31 мм, при 60 мин — 2,70 мм при 0,32 мм, то есть 4–8 его радиусов (Рисунки 51 и 53), тогда как у проводника отношение высоты к полуширине около 0,2. Нарост уже самой струи (её радиус у платы около 0,8 мм), и гладкое распределение потока по сечению струи этого не объясняет. Вершина нароста при 45 и 60 мин ровная (до радиуса 0,2 мм толщина отличается от осевой не более чем на 5 %), а между радиусами 0,28 и 0,36 мм толщина падает в 7 раз. Осадок вокруг нароста с 30-й по 60-ю минуту не растёт, тогда как осевая толщина увеличивается с 1,29 до 2,70 мм, то есть весь рост приходится на нарост. Бугристая поверхность нароста на томограмме указывает на рост у предельной плотности тока или выше неё. Модели (40) и (41) описывают именно этот режим: коэффициент a в (40) соответствует скорости роста нароста, аддитивный член b в (41) — нерастущему осадку вокруг него.

При перемещении платы точка торможения перемещается вдоль гребня растущего проводника, и электролит стекает с гребня по его склонам. На выпуклом

склоне плёнка разгоняется и диффузионный слой наиболее тонок, поэтому склоны нарастают быстрее. За 1130 проходов этот эффект накапливается и даёт сечение с крутыми стенками и заполненными плечами, полнее полуэллипса. Строго установлено лишь то, что ни одно распределение, в котором скорость к краю не возрастает, при линейном сложении проходов не даёт сечения полнее полуэллипса той же ширины. Объяснение действием растущего гребня согласуется со всеми измерениями работы, но прямо не проверено; такая проверка вынесена в перспективы. На расчёт по модели это отклонение влияет слабо: площадь сечения от формы распределения не зависит (47), а ширина и максимальная толщина отличаются от измеренных не более чем на 5 % (Таблица 15).

Кроме режима роста, опыты различаются диаметром сопла (около 1,5 мм против 0,838 мм), путём струи до платы (около 27 против 11,9 диаметра), числом Рейнольдса (около 2000–2400 против 1320), торможением струи силой тяжести (8–12 % против 2 %) и током (0,03 против 0,015 А). Дополнительным фактором может быть развитие профиля скорости с удалением от сопла: у струи, подаваемой снизу вверх, сила тяжести тормозит медленные периферийные слои относительно сильнее осевых, и неравномерность профиля у платы растёт с зазором. Разделение этих вкладов вынесено в перспективы.

Отсюда следует правило, принятое в работе. Абсолютная шкала модели задаётся законом Фарадея (47) и подтверждается измерением проводника, замыкающим баланс массы, а данные по неподвижному пятну относятся к режиму длительной выдержки и не задают форму распределения для режима сканирования.

3.3.7 Сплошность, однородность, адгезия и удельное сопротивление покрытия

Качество осаждённого покрытия оценено по тому же томографическому объёму и испытаниями адгезии. На участке проводника длиной 6,2 мм (0,33 мм³ меди по порогу ISO-50) обнаружены четыре замкнутые пустоты объёмом от одного до четырёх вокселей с эквивалентным диаметром не более 14 мкм, расположенные

у нижней границы осадка. Их размер не превышает предела обнаружения метода (около 15 мкм, или двух вокселей), объёмная доля пустот составляет $9 \cdot 10^{-6}$, и в 1017 из 1024 срезов томограммы внутренних пустот нет.

По длине участка площадь сечения проводника постоянна с коэффициентом вариации 1,6 % (1,2 % после вычитания линейного тренда), ширина — 1,5 % (0,8 %), максимальная толщина — 4,1 % (2,0 %). Таким образом, при почти постоянной площади форма сечения плавно меняется по длине (в конце участка максимальная толщина на 12 % больше, а ширина на 4 % меньше); причина этого не установлена. Внешний вид проводника показан на Рисунке 68.

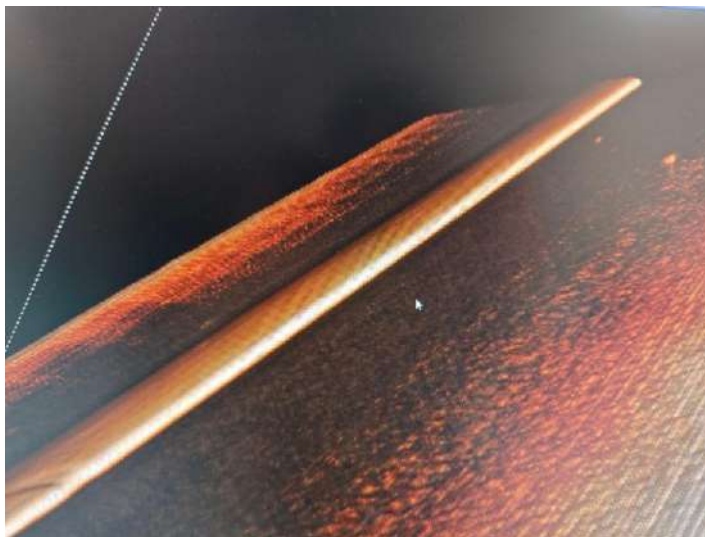


Рисунок 68 — Внешний вид металлизированного проводника

Адгезия металлического покрытия проверена по ГОСТ Р 55744—2013 «Платы печатные. Методы испытаний физических параметров» методом липкой ленты (п. 5.3.6) и методом полировки (п. 5.3.7). После испытаний отслоений и вздутий покрытия не обнаружено, внешний вид проводников не изменился. Количественных норм для этих методов стандарт не устанавливает, поэтому результат означает, что покрытие выдержало испытания указанными методами. Прочность сцепления в количественном выражении (прочность на отслаивание проводников по п. 5.3.2 того же стандарта) не определялась.

Удельное сопротивление осаждённой меди измерено по четырёхпроводной схеме на четырех металлизированных дорожках длиной 100 мм со средней

толщиной покрытия 10 мкм. Измерительный ток 100 мА задавался источником питания DP932A, падение напряжения на измерительном участке измерялось мультиметром DT-830. Сечение дорожек, равное $8,38 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^2$, определено как произведение их ширины 0,838 мм на среднюю толщину покрытия. Сопротивление дорожек составляет около 0,21 Ом, падение напряжения — около 21 мВ, а выделяемая мощность — около 2 мВт, поэтому нагрев дорожек измерительным током пренебрежимо мал. Измерения выполнены в нормальных климатических условиях при температуре 23 °С. Удельное сопротивление составило около 1,75 мкОм·см. Удельное сопротивление отожжённой меди при 20 °С равно 1,724 мкОм·см, а с учётом температурного коэффициента $0,0039 \text{ K}^{-1}$ при 23 °С — 1,744 мкОм·см; изменение температуры на $\pm 2 \text{ °C}$ меняет его на $\pm 0,8 \%$. Таким образом, измеренное значение в пределах погрешности совпадает с удельным сопротивлением массивной меди.

Результаты проверки качества осаждённого покрытия сведены в Таблицу 18.

Таблица 18 — Результаты проверки качества осаждённого покрытия

Показатель	Метод контроля	Результат
Пористость	КТ, воксель 7,6 мкм	объёмная доля пустот $9 \cdot 10^{-6}$; 4 пустоты не более 14 мкм
Сплошность проводника	КТ, 1024 среза на длине 6,2 мм	без пустот 1017 срезов из 1024
Адгезия покрытия	ГОСТ Р 55744—2013, п. 5.3.6 (липкая лента)	отслоения нет
Адгезия покрытия	ГОСТ Р 55744—2013, п. 5.3.7 (полировка)	вздутий и отслоения нет
Металлизация отверстий	осмотр тест-купонов, активация АКГФМ	отверстия 0,8–2 мм без дефектов
Удельное сопротивление	четырёхпроводная схема, 23 °С	1,75 мкОм·см

Осадок плотный: пустоты не превышают предела обнаружения метода, что согласуется с осаждением ниже порога порошкообразования. Отношение рабочей плотности тока к предельной составляет 0,97, тогда как переход к порошковому осадку наступает при отношении около 1,6 (раздел 3.3.4). Покрытие не

отслаивается ни при отрыве липкой ленты, ни при полировке, а его удельное сопротивление соответствует массивной меди.

3.3.8 Границы применимости модели

Модель (35)–(48) описывает распределение толщины покрытия по поверхности платы в исследованном диапазоне режимов. Ниже перечислено то, чего она не описывает, и то, что проверено косвенно.

— Форма сечения. Модель даёт полуэллипс, тогда как измеренное сечение полнее его (раздел 3.3.6); на расстоянии 375 мкм от оси разница достигает 0,14 максимальной толщины. Площадь сечения и средняя толщина от этого не зависят.

— Наклон струи. Угол наклона струи поперёк проводника ($17\text{--}21^\circ$) оценён по профилю сечения, на установке он не измерялся. Без учёта наклона расчётная ширина проводника на 4,4 % меньше измеренной, а максимальная толщина на 11 % больше. Угол проверяется по смещению следа струи при изменении высоты платы над соплом.

— Ширина кромки осадка томографией не разрешается, так как у сильно поглощающего объекта край размывается на несколько вокселей. Это ограничение относится к методу измерения. Для прямого определения нужен поперечный микрошлиф проводника: при толщине 90 мкм он даёт точность на два порядка выше томографической.

— Зависимость от зазора. Величина зазора измерена по месту линейкой и составляет около 10 мм; в расчёт она входит лишь через скорость струи у платы, которая при подаче снизу вверх на этом пути снижается на 2 %. Постоянство ширины (44) возможно лишь до тех пор, пока незатопленная струя сохраняет сечение, то есть при зазорах, много меньших длины её распада (около 90 мм для исследованного сопла). Опыта при нескольких зазорах в настоящей работе не проводилось. Опубликованные серии по осаждению [85, 86] показывают рост ширины следа с зазором, по анодной обработке [94] — убывание; все они получены при зазорах, не превышающих трёх диаметров, и в иных конфигурациях подачи.

— Равенство ширины проводника диаметру сопла установлено по томографии в одном опыте, при диаметре 0,838 мм. Во втором опыте работы (раздел 3.2.3, канал наконечника около 1,5 мм) растущая часть осадка заметно уже сечения канала, что объясняется сосредоточением роста у оси при длительной выдержке (раздел 3.3.6). Проверка требует проводников, полученных вторым соплом с измеренным каналом.

— Квазистационарность. Модель считает зазор постоянным, тогда как осадок растёт навстречу соплу. При полученной толщине 85–97 мкм и зазоре около 10 мм отношение толщины к зазору составляет около 0,009, то есть допущение выполнено с запасом. При многократном наращивании покрытия в одной точке это отношение растёт, и достижимость режима проверяется по (63). Понятие эффективного зазора — расстояния от торца сопла до верха растущего осадка — введено в [97], где показано, что его изменение в ходе процесса вызывает колебания тока и прерывистость проводника. В настоящей работе эффективный зазор за время осаждения изменяется менее чем на один процент.

— Перекрытие соседних проходов рассчитывается линейной суперпозицией; опыта с двумя проводниками при заданном перекрытии не проводилось.

— Близость к предельному току. Модель предполагает $\eta = 1$; при отношении плотности тока к предельной выше единицы выход по току по (45) снижается, а при превышении около 1,6 осадок становится порошковым. Предельная плотность тока рассчитывается по корреляции с неопределённостью около 1,5 раза и зависит от коэффициента диффузии и кинематической вязкости электролита, принятых по литературным диапазонам с погрешностью 15–20 % (раздел 3.3.4).

3.4 Модель распределения толщины покрытия в сквозных отверстиях печатной платы

3.4.1 Массообменное и омическое ограничения в сквозном отверстии

Распределение толщины покрытия на плоской поверхности платы (разделы 3.2, 3.3) определяется гидродинамикой соударяющейся струи, так как вблизи

предельного тока скорость роста повторяет распределение массоотдачи. Перенести этот подход внутрь сквозного отверстия нельзя, поскольку там действуют два независимых ограничения и определяющим оказывается иное, чем на поверхности.

Первое ограничение, массообменное, определяет наибольшую плотность тока, при которой медь осаждается плотным слоем. Эта величина зависит от скорости электролита в отверстии и потому при струйной подаче выше, чем в ванне; в этом состоит преимущество способа.

Второе ограничение, омическое, определяет долю тока, вошедшего в устье, которая доходит до середины стенки. Эта величина от скорости электролита не зависит, и потому переход от ванны к струе её не улучшает.

Разделение массообменных и омических ограничений при металлизации сквозных отверстий рассмотрено в работах [91, 92] и положено в основу излагаемой ниже модели. Оно объясняет, почему интенсификация подачи электролита, надёжно повышающая производительность на поверхности, сама по себе не решает задачу металлизации отверстия, и почему при высоких плотностях тока, характерных для струйного способа, качество покрытия в отверстии определяется прежде всего геометрией отверстия.

3.4.2 Течение электролита и предельная плотность тока в отверстии

Отверстие печатной платы толщиной 2 мм при диаметрах 0,3...1,0 мм и скорости электролита порядка единиц метров в секунду работает в режиме, для которого установившееся течение не успевает сформироваться. Сопоставление трёх характерных длин при диаметре 0,8 мм и скорости 2,42 м/с (число Рейнольдса 1383, число Шмидта 2800) даёт: гидродинамический начальный участок $0,06 \cdot Re \cdot d_0$ составляет 66 мм, то есть превышает длину отверстия в 33 раза; концентрационный начальный участок $0,05 \cdot Re \cdot Sc \cdot d_0$ составляет 155 м, то есть превышает её в 77 тысяч раз.

Отверстие целиком лежит внутри обоих начальных участков с многократным запасом. Отсюда следуют два вывода, существенных для модели.

Во-первых, использовать выражение $0,06 \cdot \text{Re} \cdot d_0$ как масштаб длины внутри отверстия некорректно, поскольку это длина стабилизации течения, в 33 раза превышающая длину отверстия. Никакого перехода к развитому профилю течения на длине отверстия не происходит.

Во-вторых, диффузионный пограничный слой по ионам меди нарастает от самого входа и остаётся тонким на всей длине. Для такого режима при большом числе Шмидта коэффициент массоотдачи описывается решением Блазиуса для развивающегося слоя, что даёт локальную предельную плотность тока

$$i_{\text{пред}}(x) = nFc \cdot 0,339 \cdot D^{\frac{2}{3}} U^{\frac{1}{2}} \nu^{-1/6} x^{-1/2}, \quad (49)$$

где x — расстояние от того торца отверстия, куда входит поток, м; U — средняя скорость электролита в отверстии, м/с; D — коэффициент диффузии ионов меди, м²/с; ν — кинематическая вязкость электролита, м²/с; c — концентрация ионов меди, моль/м³; $n = 2$ — число электронов, участвующих в реакции; F — постоянная Фарадея, Кл/моль.

Показатель $-1/2$ в формуле (49) получен теоретически и подтверждён прямым измерением локальной скорости массопереноса в сквозном отверстии под натекающей струёй на секционированном электроде: найденное значение составило $-0,50$ для незатопленной и $-0,58$ для затопленной струи [91].

Согласно формуле (49), предельный ток максимален у входа потока и убывает вглубь отверстия. Поэтому вход зарастает быстрее середины, что ограничивает продолжительность процесса сверху.

3.4.3 Распределение тока по стенке отверстия и длина омического проникновения

Ток, вошедший в устье отверстия, в каждой точке стенки распределяется между двумя путями: осесть здесь либо пройти дальше по столбу электролита. Выбор определяется сопоставлением сопротивлений этих путей [99]. Сопротивление столба на единицу длины составляет $4/(\kappa \pi d_0^2)$, сопротивление

перехода через границу «электролит — стенка» на единицу длины равно $R_p/(\pi d_o)$, где R_p — поляризационное сопротивление, Ом·м².

Задача сводится к уравнению линии передачи, решение которого содержит единственный масштаб длины — длину омического проникновения

$$\lambda = \frac{1}{2} \sqrt{R_p \kappa d_o}, \quad R_p = \frac{RT_K}{\alpha_c F j'} \quad (50)$$

где κ — удельная электропроводность электролита, См/м; α_c — коэффициент переноса катодной реакции; j — средняя плотность тока на стенке отверстия, А/м²; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T_K — температура, К.

Из формулы (50) следуют два важных вывода. Во-первых, длина λ не содержит ни скорости электролита, ни расхода, ни числа Рейнольдса. Омическая задача от гидродинамики не зависит, и потому переход от ванны к струе равномерность покрытия в отверстии не улучшает. Во-вторых, λ убывает с ростом плотности тока пропорционально j в степени минус одна вторая, поскольку при большем токе поляризационное сопротивление ниже и ток преимущественно разряжается у входа. Следовательно, с ростом плотности тока равномерность покрытия снижается.

При подводе тока с обеих сторон платы распределение плотности тока по длине отверстия имеет вид

$$i(x) = i_y \cdot \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{x - L_o/2}{\lambda}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{L_o}{2\lambda}\right)}, \quad (51)$$

где i_y — плотность тока у устья, А/м²; L_o — длина отверстия, равная толщине платы, м. Профиль симметричен относительно середины, минимум находится в середине стенки.

При струйной подаче анод находится в тракте подачи электролита, и ток входит в отверстие только через нижнее устье, в которое натекает струя. Для такого подвода распределение плотности тока по длине отверстия имеет вид

$$i(x) = i_y \frac{\operatorname{ch}((L_o - x)/\lambda)}{\operatorname{ch}(L_o/\lambda)}, \quad (52)$$

где x отсчитывается от нижнего устья. Минимум находится у верхнего устья, и при том же λ распределение менее равномерно, чем при двустороннем подводе: отношение плотности тока у верхнего устья к плотности у нижнего равно $1/\operatorname{ch}(L_0/\lambda)$, тогда как при двустороннем подводе отношение в середине стенки равно $1/\operatorname{ch}(L_0/2\lambda)$. При переворачивании платы на середине процесса распределения, полученные при подводе снизу и сверху, складываются, и отношение толщины в середине стенки к толщине у устьев становится равным $1/\operatorname{ch}(L_0/2\lambda)$, как при двустороннем подводе.

3.4.4 Безразмерный параметр меднения

Если привести формулу (51) к безразмерному виду, оказывается, что диаметр, длина, плотность тока и проводимость входят в ответ единственным сочетанием

$$\xi_{\text{Тк}} = \frac{\alpha_c j F L_0^2}{2 \kappa R T_K r_0}, \quad \left(\frac{L_0}{\lambda} \right)^2 = 4 \xi_{\text{Тк}}, \quad (53)$$

где $r_0 = d_0/2$ — радиус отверстия, м. Рассеивающая способность отверстия, то есть отношение толщины покрытия в середине стенки к толщине у устья, выражается через эту величину в замкнутом виде:

$$\text{РС} = \frac{z(L_0/2)}{z(0)} = \frac{1}{\operatorname{ch} \sqrt{\xi_{\text{Тк}}}}. \quad (54)$$

При одностороннем подводе тока (52) отношение толщины у верхнего устья к толщине у нижнего составляет $1/\operatorname{ch} 2\sqrt{\xi_{\text{Тк}}}$; при $\xi_{\text{Тк}} = 1$ оно равно 0,27, тогда как при двустороннем подводе отношение в середине стенки составляет 0,65 (Рисунок 69). Проверка модели по опубликованным данным (раздел 3.4.6) выполнена для двустороннего подвода, как в ванне. При струйной подаче без переворачивания платы время металлизации следует назначать по толщине у верхнего устья.

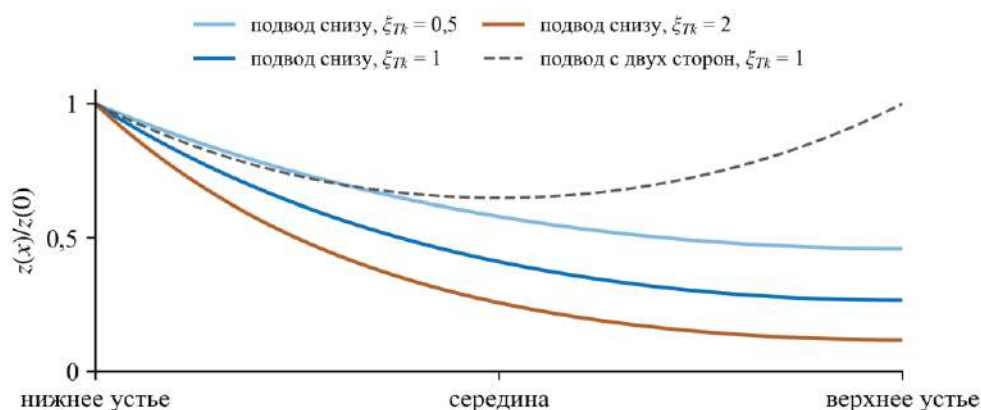


Рисунок 69 — Толщина покрытия по длине сквозного отверстия, отнесённая к толщине у нижнего устья, при подводе тока снизу и с двух сторон

Величина ξ_{Tk} имеет прямой физический смысл: это отношение омического сопротивления столба электролита к тафелевскому сопротивлению переноса заряда, взятых на половине отверстия. Она была введена Кесслером и Алкире в 1976 году [89] и экспериментально проверена Энгельмайером и Кесслером в проточной ячейке в 1978 году [90], где установлены границы годного режима: $\xi_{Tk} < 1$ без выравнивающих добавок либо $\xi_{Tk} < 2$ при их использовании, и одновременно отношение средней плотности тока к предельной диффузионной ниже 0,25.

Параметр (53) получен здесь из уравнения линии передачи и совпадает с опубликованным критерием; это два независимых вывода одной и той же величины, а их тождественность проверена численно на четырёх режимах. В общепринятой терминологии электрохимии ξ_{Tk} равна обратному числу Вагнера, умноженному на аспектное отношение отверстия.

Безразмерная форма полезна тем, что сводит три размерных параметра (диаметр, длину и плотность тока) к одной оси. Режимы с разной геометрией и разным током, но одинаковым ξ_{Tk} дают одинаковую равномерность покрытия. Это позволяет сопоставлять между собой опыты, поставленные в различных условиях, и такое сопоставление использовано в разделе 3.4.6 для проверки модели.

Требуется пояснения, почему этот аппарат применим внутри отверстия, если на плоской поверхности форма осадка определяется распределением массоотдачи (раздел 3.3.4). Эти положения не противоречат друг другу. На поверхности осаждение идёт непосредственно у диффузионного предела, отношение рабочей плотности тока к предельной составляет около 0,9–1,0. Вблизи предела производная перенапряжения по плотности тока неограниченно растёт, поляризационное сопротивление обращается в бесконечность, и распределение тока оказывается равномерным независимо от геометрии электрода. Внутри отверстия положение обратное. Допустимая плотность тока вчетверо ниже предельной, поляризационное сопротивление конечно и описывается тафелевским выражением [88], поэтому распределение тока определяется соотношением сопротивлений. Таким образом, выражения (50)–(54) применимы, если отношение рабочей плотности тока к предельной не превышает 0,25. Это согласуется с критерием, полученным для сквозного отверстия под натекающей струёй: влияние перемешивания на распределение тока становится пренебрежимым, когда плотность тока не превышает 0,2 предельной [91].

Это условие проверяется экспериментально. В опытах Энгельмайера и Кесслера скорость электролита в отверстиях меняли в пятьсот раз — от 0,17 до 87 см/с. Точки, снятые при разных скоростях, но одинаковом $\xi_{\text{Тк}}$, совпадают между собой в пределах 8 %, пока указанное условие выполнено, а две точки, у которых оно нарушено, отклоняются до 50 %. Таким образом, гидродинамика влияет на распределение толщины только при нарушении массообменного критерия.

3.4.5 Расчёт толщины покрытия и продолжительности металлизации отверстия

Локальная плотность тока равна меньшей из двух величин: омически доступной по формуле (51) и предельной по массообмену по формуле (49). Толщина покрытия находится по закону Фарадея:

$$z(x, t, d_0) = \frac{M}{nF\rho} \eta \cdot \min[i(x); i_{\text{пред}}(x)] \cdot t, \quad (55)$$

где M — молярная масса меди, кг/моль; ρ — плотность меди, кг/м³; η — выход по току; t — продолжительность процесса, с.

Продолжительность, необходимая для набора заданной толщины в самом тонком месте стенки (в середине отверстия), находится из обратной задачи подстановкой (54) в (55):

$$t = \frac{z_{\text{цел}} n F \rho \cdot \operatorname{ch} \sqrt{\xi_{\text{Тк}}}}{M \eta i_y}, \quad (56)$$

где $z_{\text{цел}}$ — требуемая толщина покрытия в середине отверстия, м. Выражение (56) используется в технологическом процессе (раздел 4.3.3) для назначения времени металлизации.

Модель (49)–(56) содержит два эмпирических числа: выход по току η и долю полного тока, входящую в отверстие; обе величины определяются взвешиванием. Все остальные величины в модели — измеряемые свойства электролита и геометрия отверстия. Подгоняемых параметров формы модель не содержит.

Существенные свойства модели: знак профиля (покрытие толще у устьев и тоньше в середине); наличие зависимости от плотности тока; зависимость от аспектного отношения L_0/d_0 , входящая через $\xi_{\text{Тк}}$; связь с независимо измеряемыми величинами κ , R_p , U и I ; совместимость с поверхностной моделью — тот же электролит, то же число электронов, тот же коэффициент диффузии.

3.4.6 Проверка модели по собственным и опубликованным данным

Модель проверена на трёх независимых наборах данных: на собственных измерениях настоящей работы и на двух опубликованных работах, выполненных в других условиях.

Проверка по данным настоящей работы. Таблица 5 раздела 2.6 содержит минимальную толщину покрытия в отверстиях четырёх характеристических отношений, полученную при одном режиме — плотность тока 3 А/дм², продолжительность 65 мин, толщина платы 2 мм. Толщина на поверхности по

закону Фарадея при выходе по току, близком к единице, составляет 43,0 мкм; отношение к ней минимальной толщины даёт измеренную рассеивающую способность (Таблица 19).

Таблица 19 — Проверка модели металлизации отверстий по данным Таблицы 5

Характеристическое отношение	d_o , мм	z_{min} , мкм	РС измеренная	ξ_{Tk}	РС расчётная
6,7 : 1	0,30	30	0,698	1,422	0,556
4 : 1	0,50	40	0,930	0,849	0,687
2,5 : 1	0,80	40	0,930	0,531	0,783
2 : 1	1,00	44	1,023	0,425	0,820

Без введения поправок расчёт занижает рассеивающую способность в среднем на 21 %, причём отклонение одностороннее для всех четырёх точек, что указывает на недоучтённый множитель: случайным разбросом такое отклонение не объясняется. При этом форма зависимости от диаметра воспроизводится. И в опыте, и в расчёте переход от отношения 6,7 : 1 к 2 : 1 повышает рассеивающую способность примерно в полтора раза, а нормированные на самую узкую точку значения совпадают в пределах 7 %.

Односторонний сдвиг объясняется присутствием в электролите выравнивающей добавки J-PLATE CU-400, повышающей поляризационное сопротивление. Введение единственного множителя G , понижающего ξ_{Tk} , сводит все четыре точки со средним отклонением 7,9 % при $G = 2,78$. Порядок величины совпадает с опубликованной практикой: Энгельмайер и Кесслер для ванны с добавкой Cubath M ослабляют критерий с $\xi_{Tk} < 1$ до $\xi_{Tk} < 2$, то есть вводят множитель того же порядка.

Проверка по данным Энгельмайера и Кесслера [90]. Работа выполнена в проточной ячейке на кислом сульфатном электролите при скоростях электролита в отверстиях 0,17, 25 и 87 см/с. Из десяти опубликованных точек восемь удовлетворяют массообменному критерию. Для семи точек, лежащих при $\xi_{Tk} \leq 1,5$, среднее отклонение расчёта по формуле (54) составляет 6,0 %.

Проверка по данным Изотова [93]. Работа выполнена в ванне с качанием катода, то есть при принципиально иной гидродинамике. Из трёх приведённых

режимов два лежат при $\xi_{\text{Тк}} \leq 1,5$ и описываются расчётом с отклонениями 8,4 и 8,9 %. Особенно показательна пара режимов с одинаковой геометрией и разной плотностью тока (200 и 50 А/м²): предсказанный переход рассеивающей способности с 0,420 на 0,769 сопоставляется с измеренным значением 0,760, и расхождение составляет 0,9 процентного пункта без единого подгоняемого параметра. Это наиболее строгая из имеющихся проверок масштабного закона по плотности тока.

Установленная граница применимости. Совокупность трёх наборов данных показывает, что выражение (54) справедливо при $\xi_{\text{Тк}}$ не свыше 1,5. При $\xi_{\text{Тк}} = 3,27$ расчёт завышает неравномерность на 57 %, что связано с переходом реакции в смешанный режим, где поляризационное сопротивление перестаёт быть чисто тафелевским. За этой границей формула (54) даёт лишь оценку сверху.

3.4.7 Эмпирическая зависимость толщины покрытия от глубины отверстия

Для проверки модели в течение 30 мин металлизировали отверстия диаметром от 0,5 до 1,0 мм и длиной 2 мм, после чего измерили толщину покрытия по длине отверстия (Рисунок 70).

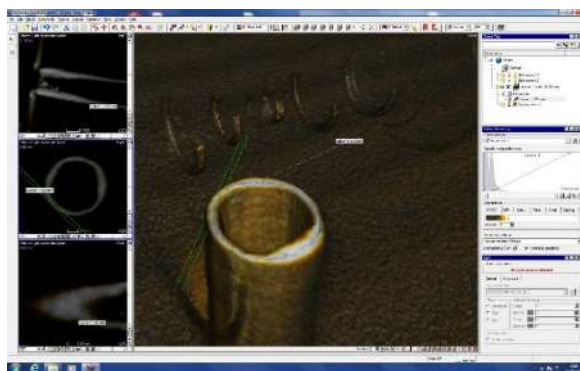


Рисунок 70 — Пример КТ металлизированного отверстия в трехмерном виде и в разных плоскостях

На рисунке 71 приведены 28 экспериментальных точек для трёх диаметров. Зависимость вида «толщина пропорциональна корню из протяжённости»

описывает их со среднеквадратичным отклонением 3,5 мкм, а определённый по данным без каких-либо допущений показатель степени составляет 0,490 при 0,500 в формуле. В пределах своей области аппроксимация справедлива и сохраняется в работе как проверочная.

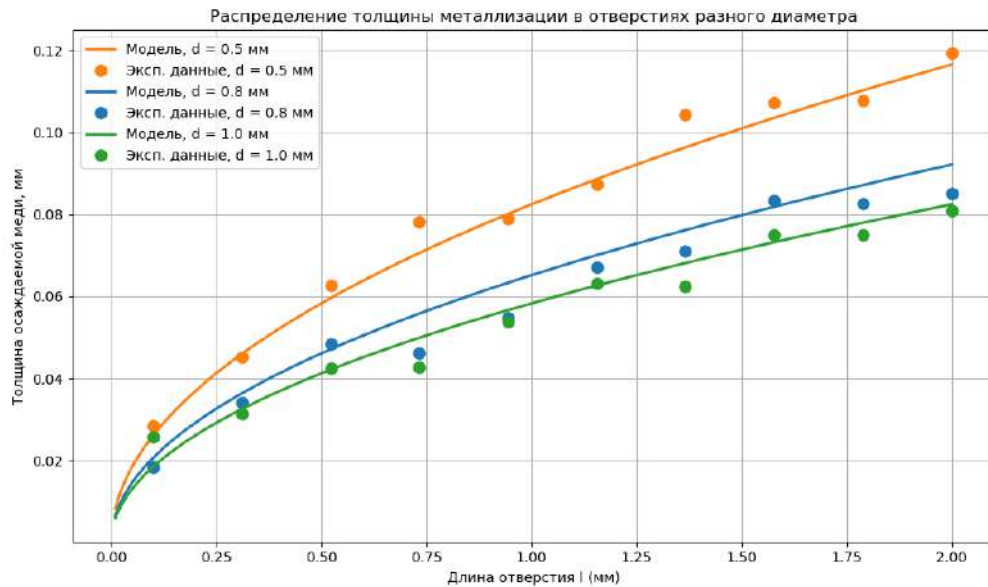


Рисунок 71 — Распределение толщины металлизации в отверстиях разного диаметра по протяжённости отверстий

Вместе с тем нужно оговорить три обстоятельства. Во-первых, первоначально предложенное обоснование этой зависимости (нарастание массопереноса вглубь отверстия по параболическому закону) не соответствует установленному режиму течения. Отверстие целиком лежит в начальном участке, и предельный ток по (49) от входа убывает (раздел 3.4.2), поэтому зависимость сохраняется как эмпирическая. Во-вторых, направление отсчёта координаты в протоколе опыта не зафиксировано: при отсчёте от противоположного торца корневая зависимость описывает спад толщины от входа вглубь. В-третьих, плотность тока в опыте не зафиксирована, поэтому омическую модель он не проверяет: измеренная зависимость амплитуды профиля от диаметра объясняется постоянством полного тока, при котором плотность тока на стенке падает обратно пропорционально диаметру.

Поэтому проверкой модели служит Таблица 5, снятая при заданной плотности тока, а Рисунок 71 приводится как эмпирическое описание конкретного режима. Количественная проверка масштабного закона по плотности тока выполнена в разделе 3.4.6 на независимых данных [93] с расхождением 0,9 процентного пункта; прямая проверка в струйном режиме отнесена к перспективам развития работы. Расчёт предсказывает падение рассеивающей способности с 0,68 до 0,077 при росте плотности тока с 5 до 60 А/дм².

3.4.8 Режим металлизации отверстий и согласование диаметра сопла

Из модели (49)–(56) следуют три положения, определяющие технологический режим металлизации отверстий струйным способом.

Плотность тока в отверстии не может назначаться из соображений производительности. Она задаётся условием $\xi_{\text{Тк}} \leq 1,5$, то есть верхней границей проверенной области модели (раздел 3.4.6). Опубликованный критерий годного режима ($\xi_{\text{Тк}} < 1$ без выравнивающих добавок и $\xi_{\text{Тк}} < 2$ при их использовании [90]) эту границу охватывает. При толщине платы 2 мм и диаметре отверстия 0,8 мм допустимая плотность тока составляет 8,5 А/дм², чему соответствуют полный ток 0,004 А и рассеивающая способность по (54) 0,54. На плоской поверхности тот же способ работает при 272 А/дм² (раздел 3.3.4), то есть при плотности тока примерно в 30 раз выше.

Продолжительность процесса ограничена сверху зарастанием устья. Поскольку предельный ток по формуле (49) максимален у входа потока, устье зарастает быстрее середины, и когда толщина осадка у входа становится сравнимой с радиусом отверстия, подача электролита нарушается. Расчётное время до этого события определяет верхнюю границу режима независимо от того, набрана ли к этому моменту требуемая толщина в середине.

Неравномерность не может быть скомпенсирована увеличением продолжительности. Рассеивающая способность (54) равна отношению толщин и от времени не зависит, поскольку время увеличивает обе толщины в одинаковое

число раз. Если в середине стенки осаждается восьмая часть от толщины у устья, это отношение сохранится при любой продолжительности. Изменить его можно только снижением плотности тока, изменением геометрии либо введением выравнивающих добавок, повышающих поляризационное сопротивление.

Диаметр сопла должен быть согласован с диаметром отверстия. При этом действуют два противоположных фактора. Если сопло шире отверстия, в отверстие попадает лишь вырезанная им часть потока, доля которой равна квадрату отношения диаметров, а остальная часть растекается по поверхности платы. Если сопло уже отверстия, весь поток входит, но струя покрывает лишь часть сечения устья, и периферия стенки омывается только вторичным течением. Произведение этих двух долей (показатель согласования) максимально при равенстве диаметров.

Практически предпочтительно брать сопло несколько уже отверстия, поскольку при этом весь поток входит в отверстие, пока смещение оси не превышает половины разности диаметров, и появляется допуск на позиционирование. Рекомендуемый диаметр сопла — от 0,7 до 0,9 диаметра отверстия. Показатель согласования при этом остаётся в пределах 0,49...0,81, а допустимое смещение оси составляет от 0,05 до 0,15 диаметра отверстия, то есть от 40 до 120 мкм для отверстия диаметром 0,8 мм.

Применённое в работе сопло диаметром 0,838 мм согласовано с отверстием диаметром 0,8 мм и частично с отверстием 1,0 мм. На краях исследованного ряда согласование падает всемерно: до 0,13 при диаметре 0,3 мм и до 0,18 при 2,0 мм. Одним соплом ряд диаметров от 0,3 до 2,0 мм не обслуживается, поэтому его следует разбивать на поддиапазоны со сменными соплами либо мириться с потерей производительности на краях ради универсальности оснастки.

Струйный способ существенно интенсифицирует металлизацию поверхности печатной платы. Плотность тока в зоне осаждения составляет 272 А/дм², что в 70–90 раз выше, чем в гальванической ванне (3–4 А/дм²), а средняя толщина 25 мкм по сечению проводника набирается за 64 прохода со скоростью 100 мм/мин. Вместе с тем внутри сквозного отверстия, как показано в разделах 3.4.1–3.4.8, определяющим оказывается омическое ограничение, и допустимая там

плотность тока примерно в 30 раз ниже поверхностной. Поэтому струйный способ не предназначен для сплошного покрытия платы медью: при формировании проводящего рисунка он существенно сокращает цикл, а для металлизации отверстий требует отдельного, значительно более мягкого режима.

3.5 Выводы по главе 3

Показано, что при подаче электролита снизу вверх незатопленная струя не вовлекает окружающую среду и на пути до платы сохраняет сечение сопла: при зазоре 10 мм (11,9 диаметра) она тормозится на 2 % и расширяется на 1 %, тогда как расчёт по теории затопленной струи (29) дал бы ширину следа 7,5 диаметра. Соотношения (29) и (30), использованные в разделе 3.1, к такой струе неприменимы.

Рассмотрены две гипотезы о распределении массоотдачи под струёй: колоколообразное распределение затопленной струи и постоянная массоотдача в зоне торможения ламинарной струи, сохраняющей сечение. Опыт с длительной неподвижной выдержкой описан калибровочными моделями (40) и (41), коэффициенты которых подобраны по опыту. При такой выдержке рост сосредоточивается у оси и образует столбчатый нарост, а профиль в окне замера содержит лишь 0,44–0,64 внесённой током меди, поэтому эти модели на режим сканирования не переносятся.

Построена модель распределения толщины покрытия по поверхности платы при перемещении платы над соплом (35)–(48). В ней ширина проводника равна диаметру сопла (44), сечение равно интегралу скорости осаждения по траектории (46) и зависит только от отношения полного времени металлизации к длине линии, площадь сечения определяется током по закону Фарадея (47) и не зависит от распределения скорости осаждения, а при равномерной зоне сечение имеет форму полуэллипса (48). Модель не содержит коэффициентов, подбираемых по результатам предварительного осаждения.

Методом рентгеновской компьютерной томографии (500 сечений проводника; сопло 0,838 мм, зазор 10 мм, ток 15 мА) подтверждена вторая гипотеза и отвергнута первая: $W_{10}/W_{50} = 1,07\text{--}1,10$ по двум оценкам толщины при 1,15 для полуэллипса и 1,82 для гауссова распределения, граница осадка резкая, ширина проводника — 872 мкм, или 1,04 диаметра сопла. Расчёт без данных опыта отличается от измерения на 2,2 % по площади сечения и на 2,1 % по средней толщине; с учётом наклона струи 19° , оценённого по профилю сечения, — на 1,2 % по ширине и на 4,9 % по максимальной толщине.

Показано, что на поверхности платы осаждение идёт вблизи предельной диффузионной плотности тока (отношение рабочей к предельной около 0,9–1,0 при неопределённости корреляции около 1,5 раза), поэтому форма осадка следует распределению массоотдачи, выход по току близок к единице (баланс массы сходится с точностью 2 %), а осадок плотный: объёмная доля пустот $9 \cdot 10^{-6}$. Покрытие выдержало испытания адгезии методами липкой ленты и полировки по ГОСТ Р 55744—2013 без отслоения и вздутий, а его удельное сопротивление 1,75 мОм·см при 23 °С соответствует массивной меди.

Измеренное сечение проводника полнее полуэллипса, а такого сечения при линейном сложении проходов не даёт ни одно распределение, в котором скорость не возрастает к границе зоны. Различие режимов неподвижной выдержки и сканирования объяснено самоусилением роста осадка вблизи предельного тока: при выдержке рост сосредоточивается у оси, при сканировании — на склонах проводника. Объяснение согласуется с измерениями, но прямо не проверено. На площадь сечения это отклонение не влияет.

Установлено, что внутри сквозного отверстия действуют два независимых ограничения процесса: массообменное задаёт наибольшую допустимую плотность тока и зависит от скорости электролита, омическое задаёт равномерность покрытия по глубине и от скорости электролита не зависит, поскольку длина омического проникновения (50) не содержит ни расхода, ни числа Рейнольдса. Интенсификация подачи электролита, дающая выигрыш на поверхности платы, сама по себе равномерность металлизации отверстия не улучшает.

Разработана модель распределения толщины покрытия по длине сквозного отверстия (49)–(56), связывающая толщину с плотностью тока, диаметром и протяжённостью отверстия, продолжительностью процесса и свойствами электролита и сведённая к одному безразмерному параметру $\xi_{\text{Тк}}$ (53). Модель воспроизводит опубликованные данные в проточной ячейке и в ванне с качанием катода со средним отклонением 6,0 и 8,4–8,9 % при $\xi_{\text{Тк}} \leq 1,5$; на собственных данных форма зависимости от диаметра воспроизводится в пределах 7 %. При струйной подаче ток входит через нижнее устье (52), и распределение при том же $\xi_{\text{Тк}}$ менее равномерно.

Показано, что допустимая плотность тока в отверстии примерно в 30 раз ниже достигнутой на поверхности: при толщине платы 2 мм и диаметре отверстия 0,8 мм она составляет 8,5 А/дм² против 272 А/дм² при $\xi_{\text{Тк}} \leq 1,5$. Поэтому металлизация отверстий и металлизация проводящего рисунка выполняются в разных режимах, что учтено в разработанном технологическом процессе.

Таким образом, в главе установлены закономерности струйного электроосаждения меди при подаче электролита снизу вверх и построены модели распределения толщины покрытия, позволяющие рассчитать результат металлизации до начала процесса. На поверхности печатной платы поток электролита сохраняет сечение сопла, осаждение идёт вблизи предельной диффузионной плотности тока. Поэтому ширина проводника определяется диаметром сопла, а его сечение — током и отношением времени металлизации к длине линии; модель (35)–(48) подтверждена томографическим измерением с расхождением не более 2,2 % по площади сечения и средней толщине. В сквозных отверстиях определяющим становится омическое ограничение, не зависящее от гидродинамики. Равномерность покрытия задаётся параметром $\xi_{\text{Тк}}$; модель (49)–(56) воспроизводит опубликованные данные с погрешностью не более 9 % при $\xi_{\text{Тк}} \leq 1,5$. Из различия этих механизмов следует, что поверхность платы и сквозные отверстия металлизуются в разных режимах, а полученные модели служат основой методики расчёта режимов и параметров технологического процесса струйной металлизации.

Глава 4. Методика расчёта режимов и технологический процесс струйной металлизации печатных плат

В настоящей главе представлены методика расчёта технологических параметров автоматизированной системы струйной металлизации печатных плат и технологический процесс металлизации печатных плат струйным способом, основанный на применении разработанных моделей распределения толщины осаждённой меди и схемы прямой металлизации на основе аммиачного комплекса гипофосфита меди (ГФМ).

4.1 Методика расчёта технологических параметров и режимов

Методика расчёта технологических параметров автоматизированной системы струйной металлизации печатных плат основана на применении модели распределения толщины осаждённой меди по поверхности печатной платы (35)–(48) (раздел 3.2), проверенной в разделе 3.3, и модели распределения толщины в сквозных отверстиях (49)–(56) (раздел 3.4). Соотношения теории затопленной струи, по которым в разделе 3.1 рассчитаны радиус пятна и шаг 0,55 мм, к незатопленной струе неприменимы (раздел 3.2.4) и в методике не используются.

Исходными данными для расчёта служат:

- геометрические параметры установки: радиус сечения сопла r_0 и зазор H между срезом сопла и поверхностью платы;
- параметры движения и потока: скорость сканирования V и объёмный расход Q через сопло (для проверки предельной плотности тока);
- параметры изделия: габаритные размеры печатной платы (ширина W , длина l), диаметры и протяжённость сквозных отверстий, подлежащих металлизации;
- электрические параметры: ток металлизации I и выход по току η ;
- свойства электролита: концентрация ионов меди c и удельная электропроводность k ;

— требуемая целевая толщина металлизации z , мкм, с указанием метрики — средняя по сечению или максимальная.

Методика реализуется в следующей последовательности:

1. Определение ширины проводника и сечения одного прохода. Согласно модели раздела 3.2, скорость осаждения постоянна в зоне равнодоступности радиусом $R_A = r_0$ (43) и равна нулю вне её. Ширина осаждаемого проводника вычисляется по (44) и при заданном сопле постоянна. Сечение проводника вычисляется по (46), а для равномерной зоны — по (48). От режима оно зависит только через отношение полного времени металлизации к длине линии T/L ; для одного прохода $T/L = 1/V$. Амплитуда задаётся током по (47), а выполнимость режима проверяется отношением плотности тока к предельной по (45).

Траектории перемещения платы для основных элементов проводящего рисунка показаны на Рисунке 72: одиночный проводник формируется повторными проходами вдоль осевой линии, элемент шире проводника — параллельными проходами с шагом h , контактная площадка — спиралью от центра с замыкающей окружностью по контуру.

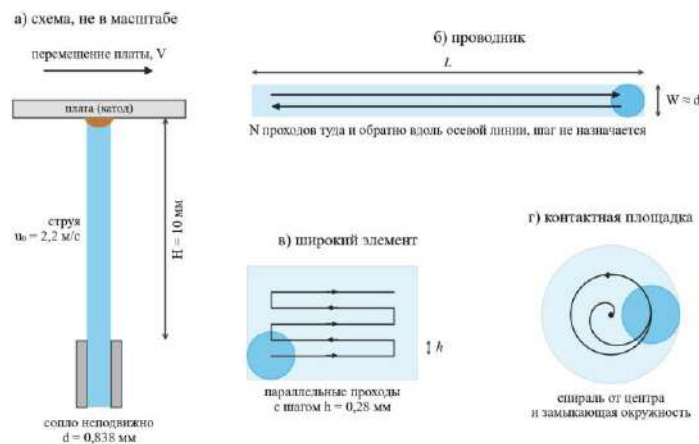


Рисунок 72 — Траектории перемещения платы над неподвижным соплом: а) схема перемещения; б) проводник; в) широкий элемент; г) контактная площадка

2. Определение шага перемещения сопла. При заполнении сплошных участков проводящего рисунка соседние проходы перекрываются, и толщина покрытия приобретает периодическую неравномерность — волнистость.

Волнистость определяется как отношение размаха толщины к её среднему значению в пределах одного шага:

$$W_B = \frac{z_{max} - z_{min}}{z_{cp}} \cdot 100 \%, \quad (57)$$

где $z(y)$ — суммарная толщина покрытия от всех проходов, вычисленная по (46) при шаге h , м; W_B — волнистость покрытия, %.

Зависимость волнистости от шага приведена на Рисунке 73 для полуэллиптического сечения (48) и для измеренного сечения проводника. Эта зависимость немонотонна, поскольку волнистость определяется преобразованием Фурье профиля сечения на частоте перекрытия. Поэтому у неё есть ряд выраженных минимумов, а верхняя огибающая убывает с уменьшением шага. Шаг 0,55 мм, полученный в разделе 3.1 из гауссова распределения (30), даёт по измеренному сечению волнистость 53 %, то есть толщина покрытия изменяется в полтора раза от прохода к проходу. Для сопла 0,838 мм принят шаг 0,28 мм, при котором волнистость по измеренному сечению составляет 7,8 %. Этот шаг лежит в узком минимуме, и уже при 0,29–0,30 мм волнистость возрастает до 20–30 %. Если профиль сечения известен лишь приближённо, шаг следует назначать по условию гарантированной волнистости, то есть брать наибольший шаг, при котором волнистость не превышает заданной и при любом меньшем шаге. Волнистость не более 20 % обеспечивается при $h \leq 0,22$ мм по измеренному сечению и при $h \leq 0,27$ мм по полуэллипсу, не более 10 % — при $h \leq 0,14$ и 0,16 мм соответственно.

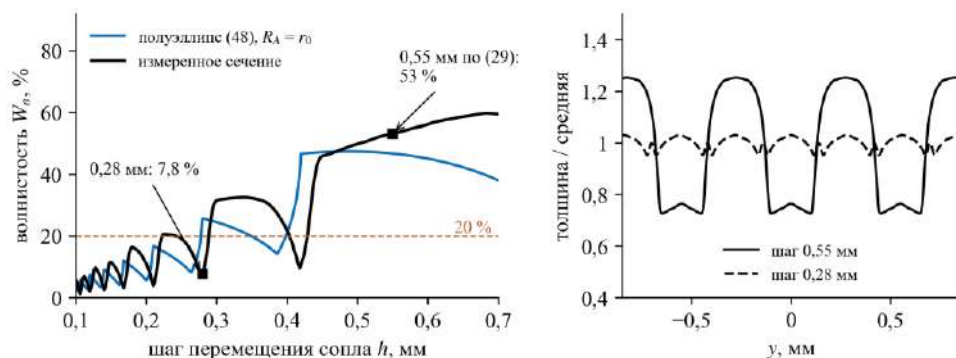


Рисунок 73 — Волнистость покрытия в зависимости от шага перемещения сопла и профиль покрытия при двух значениях шага

Для одиночных проводников, ширина которых не превосходит ширины осаждения (44), перекрытие отсутствует и шаг не назначается: проводник формируется повторными проходами сопла вдоль его осевой линии.

3. Расчёт времени обработки одной точки металлизированной поверхности:

$$t_{\text{точки}} = 2r / V, \quad (58)$$

где V — скорость сканирования (скорость перемещения платы относительно сопла), м/с; $r = R_A$ — радиус зоны осаждения по (43), м.

4. Расчёт времени обработки одной строки при перемещении потока по поверхности платы длиной l :

$$t_{\text{прохода}} = l / V. \quad (59)$$

5. Расчёт количества параллельных проходов для заполнения элемента шириной W :

$$N_{\text{проходов}} = [(W - 2R_A) / h] + 1, \quad (60)$$

где R_A — радиус зоны осаждения (43), м; h — шаг перемещения сопла, м; $[]$ — округление до целого в большую сторону.

6. Расчёт времени полного покрытия печатной платы одним проходом сопла по всей площади:

$$t = t_{\text{прохода}} \times N_{\text{проходов}}. \quad (61)$$

7. Расчёт числа проходов по заданной целевой толщине покрытия. Толщина покрытия растёт линейно с числом проходов, поэтому

$$N = \frac{z_{\text{цел}}}{z_1}, \quad (62)$$

где N — число проходов; $z_{\text{цел}}$ — целевая толщина покрытия, м; z_1 — толщина, набираемая за один проход и вычисляемая по (46) при $T/L = 1/V$. При задании целевой толщины необходимо указывать метрику: средняя по площади сечения проводника или максимальная. Для сечения, близкого к полуэллипсу, эти метрики различаются в $4/\pi = 1,27$ раза, и подмена одной другой даёт систематическую ошибку числа проходов того же порядка. Для сопла 0,838 мм при

токе 15 мА и скорости 100 мм/мин средняя толщина за проход составляет 0,395 мкм, максимальная — 0,503 мкм; для средней толщины 25 мкм требуется 64 прохода.

8. Проверка достижимости режима. Растущий осадок сокращает просвет между соплом и платой, поэтому число проходов ограничено сверху условием

$$N \cdot z_{1,\text{пик}} \leq H - \Delta, \quad (63)$$

где $z_{1,\text{пик}}$ — пиковая толщина за один проход, м; H — зазор, м; Δ — технологический запас, м. При нарушении этого условия сопло касается покрытия; в этом случае процесс разбивают на этапы с отводом сопла и повторной установкой зазора. Можно также увеличить зазор. Пока незатопленная струя сохраняет сечение, это не изменяет ширину проводника, а скорость струи у платы при подаче снизу вверх снижается незначительно — на 2 % при зазоре 10 мм. При рабочем зазоре около 10 мм условие (63) выполняется с большим запасом: максимальная толщина проводника за весь цикл составляет менее 1 % зазора.

9. Расчёт режима металлизации сквозных отверстий печатной платы. Плотность тока на стенке отверстия назначается из условия $\xi_{\text{Тк}} \leq 1,5$, соответствующего верхней границе проверенной области модели (раздел 3.4.6); параметр $\xi_{\text{Тк}}$ вычисляется по формуле (53) через диаметр и протяжённость отверстия, плотность тока и удельную электропроводность электролита. Время металлизации до заданной целевой толщины в середине стенки определяется по формуле (56). При подводе тока только через нижнее устье (52) самое тонкое место находится у верхнего устья, что учитывается запасом по времени или переворачиванием платы на середине процесса. Дополнительно проверяется условие непревышения предельной диффузионной плотности тока по формуле (49) и оценивается время до зарастания устья отверстия, ограничивающее продолжительность процесса сверху. Диаметр сопла согласуется с диаметром отверстия (раздел 3.4.8). Показатель согласования максимален при равенстве диаметров, однако рекомендуется сопло диаметром 0,7–0,9 диаметра отверстия, так как это даёт допуск на позиционирование.

Методика позволяет рассчитать технологические параметры металлизации печатной платы по файлам проекта до начала процесса; опытным путём определяются лишь выход по току и доля полного тока, входящая в отверстие (раздел 3.4.5). Программная реализация методики, выполняющая расчёт непосредственно по файлам проекта печатной платы и проверяющая достижимость полученного режима до начала металлизации, приведена в разделе 4.2.

4.2 Автоматизированная система управления установкой

Методика расчёта, изложенная в разделе 4.1, реализована в программном обеспечении автоматизированной системы управления установкой. Программа принимает на вход файлы проекта печатной платы в форматах Gerber (медный слой) и Excellon (сверловка), рассчитывает по ним и по заданному режиму управляющую программу металлизации, вычисляет ожидаемое распределение толщины покрытия и исполняет программу на установке либо в режиме моделирования. Поскольку расчёт, моделирование и исполнение используют одну и ту же управляющую программу, систему управления можно рассматривать как цифровой двойник установки. Блок-схема системы управления установкой представлена на Рисунке 74.

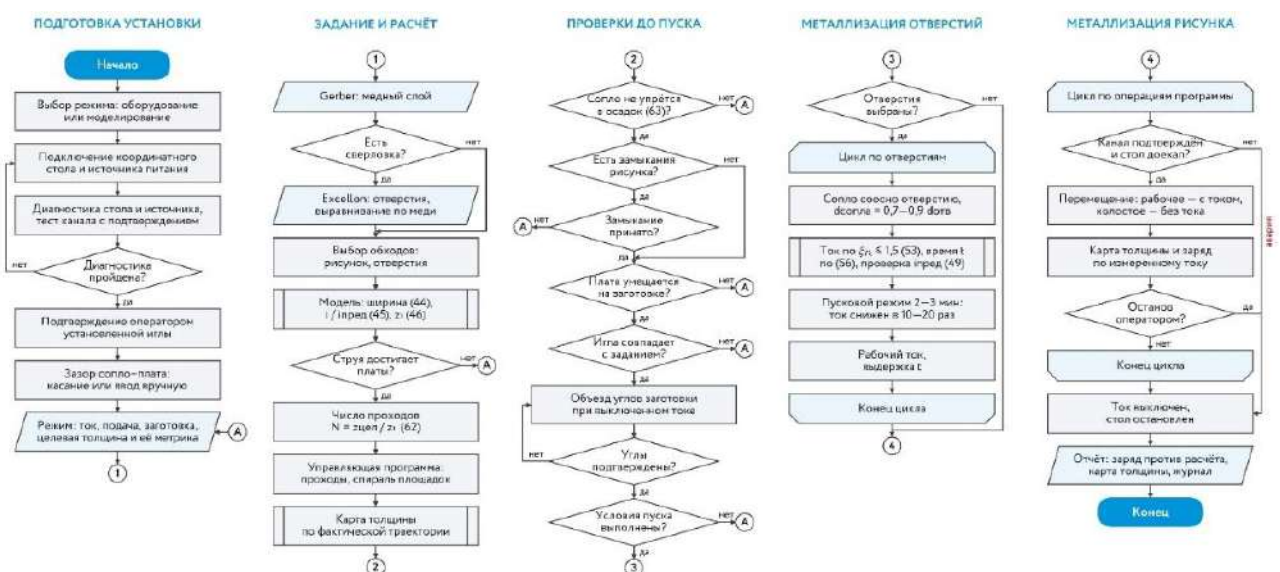


Рисунок 74 — Алгоритм работы автоматизированной системы управления установкой струйной металлизации

4.2.1 Структура и состав

Слоистая структура системы управления приведена на Рисунке 75. Основа построения системы — управляющая программа, то есть детерминированный список операций, который планировщик формирует как чистую функцию задания и режима. Установка и модель исполняют одну и ту же управляющую программу, поэтому результаты моделирования и металлизации совпадают по построению; контрольная сумма программы записывается в журнал процесса. Моделирование отличается от металлизации только источником времени: виртуальные часы идут быстрее реальных. Счётчики заряда, толщины и числа проходов при этом сохраняют натуральный масштаб, ускоряется только отрисовка.

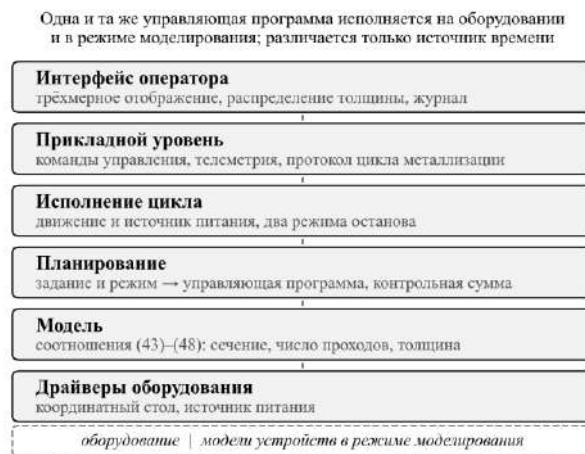


Рисунок 75 — Структура автоматизированной системы управления установкой струйной металлизации

Программа выполнена по схеме «клиент — сервер» и работает на персональном компьютере под управлением Windows. Серверная часть написана на языке Python с использованием веб-каркаса FastAPI и содержит модель, планировщик, исполнитель прогона и драйверы оборудования; интерфейс оператора написан на языке TypeScript с библиотекой React, трёхмерное отображение платы и осадка выполнено с библиотекой three.js. Команды оператора передаются серверу запросами REST, а состояние установки, телеметрия и записи журнала — по каналу WebSocket с частотой 10 Гц. Координатный стол управляется контроллером с прошивкой GRBL 0.9j через преобразователь USB–UART,

источник питания Rigol DP932A — командами SCPI по интерфейсу USBTMC. Файлы проекта печатной платы разбираются библиотекой gerbonara, поддерживающей дуги, макросы апертур и полярность слоёв формата RS-274X.

В основу интерфейса положено отдельное требование: оператор в любой момент должен отличать заданную им величину от прочитанной с прибора и от вычисленной по модели. В программе каждая величина хранится вместе с признаком происхождения: заданная оператором, измеренная прибором или рассчитанная по модели. Эти три вида величин реализованы разными типами данных, которые нельзя подставить один вместо другого, и отображаются по-разному: заданная — в редактируемом поле, измеренная — с указанием прибора и исходного ответа прибора, рассчитанная — с формулой, по которой она получена, без возможности редактирования. Отсутствующее измерение отображается прочерком, поэтому вместо него нельзя показать ноль или последнее известное значение. Это требование важно для процесса, в котором ток задаётся уставкой, а его фактическое значение определяет весь баланс массы (раздел 3.3.4). Интерфейс оператора в режиме металлизации показан на Рисунке 76.

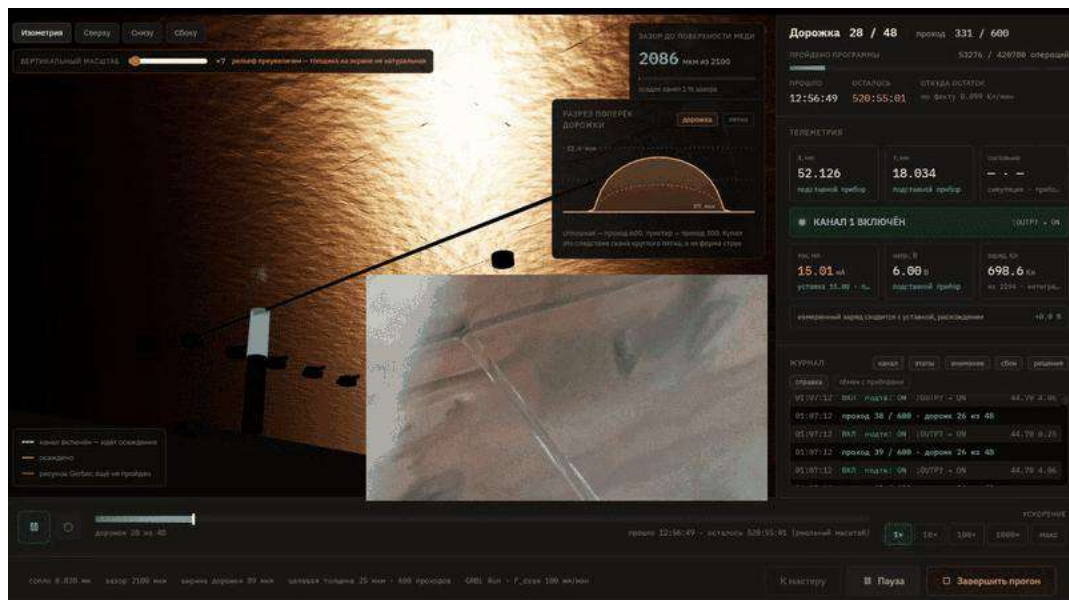


Рисунок 76 — Интерфейс оператора автоматизированной системы управления в режиме металлизации

4.2.2 Подготовка задания и режима

Подготовка к металлизации организована как последовательность шагов: подключение оборудования и диагностика, выбор сопла и зазора, загрузка задания и расчёт режима, калибровка и пуск. Перейти к пуску нельзя, пока не выполнены условия всех предыдущих шагов; невыполненное условие программа называет в явном виде при попытке перейти к следующему шагу.

На первом шаге (Рисунок 77) программа находит подключённые приборы, запрашивает у источника питания идентификатор, а у контроллера стола — его настройки, которые затем используются при оценке продолжительности процесса. Диагностика проверяет связь со столом, чтение координат, отсутствие аварийного состояния и работу канала источника. Переключение канала проверяется в два шага: программа включает канал и ждёт, пока оператор подтвердит, что видит включение на самом приборе, затем так же проверяется выключение.

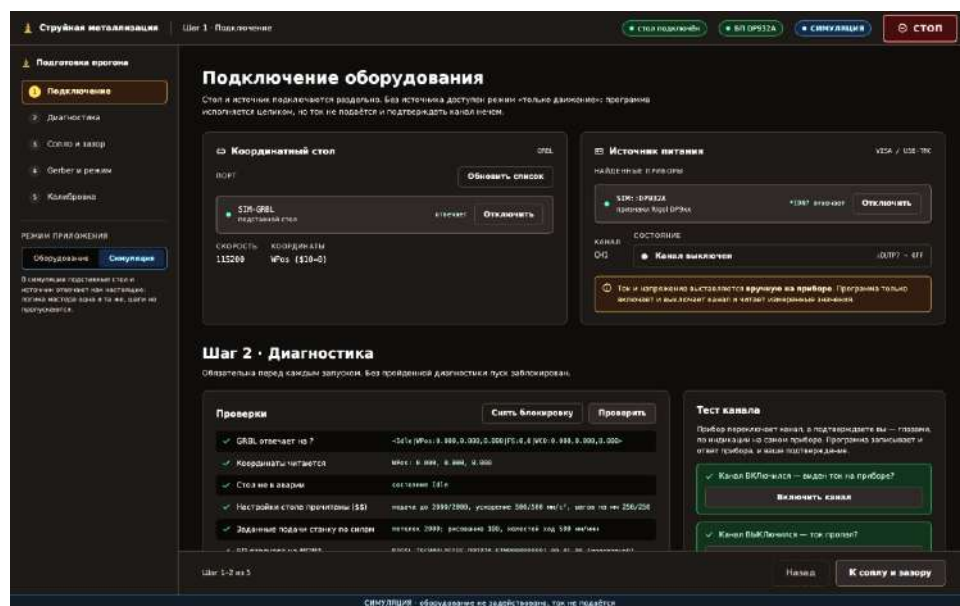


Рисунок 77 — Экран подключения оборудования и диагностики

На втором шаге (Рисунок 78) оператор выбирает иглу из ряда 16G–23G или задаёт диаметр сопла вручную и подтверждает, какая игла установлена, поскольку диаметр сопла определяет всю геометрию осадка. Зазор от среза насадки до платы задаётся вручную или измеряется серией касаний сопла с медью с оценкой

повторяемости. Под полями ввода программа выводит величины, рассчитанные по модели раздела 3.2: радиус зоны равнодоступности $R_A = d/2$ (43), ширину осаждения $W = d$ (44), отношение рабочей плотности тока к предельной (45) и критерий сохранения сечения струи $2gH/u_0^2$ (раздел 3.2.4). Выведенные величины не редактируются, и каждая сопровождается формулой, по которой она получена.

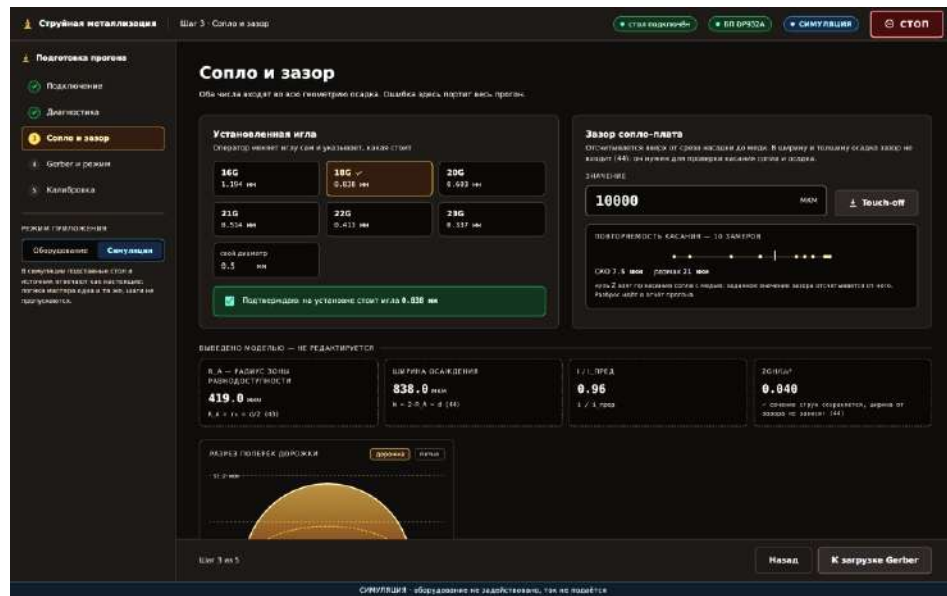


Рисунок 78 — Экран выбора сопла и зазора с величинами, рассчитанными по модели

Панель разреза (Рисунок 79) показывает две кривые, обе рассчитанные по модели: сечение проводника поперёк дорожки после заданного числа проходов, имеющее форму полуэллипса (48), и радиальный профиль скорости осаждения под неподвижной струёй — равномерную зону радиусом R_A с резкой границей. Кривые показываются раздельно, поскольку форма сечения проводника складывается при сканировании и не повторяет форму струи (раздел 3.2.5).

Сверловка совмещается с медным слоем одним сдвигом начала координат, общим для обоих файлов, поэтому отверстия попадают в центры контактных площадок, в том числе при дюймовых единицах в файле медного слоя и неполном описании формата в файле сверловки (Рисунок 81). Отверстия учитываются при проверке габарита заготовки и при объезде её углов.

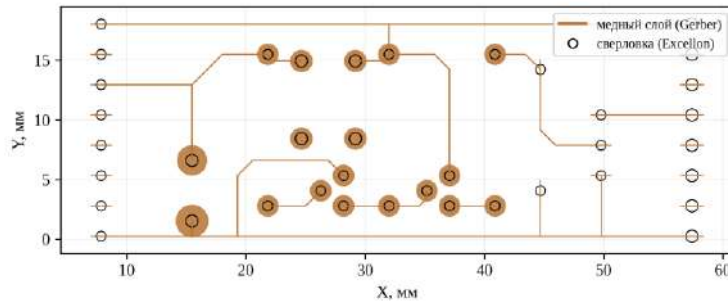


Рисунок 81 — Совмещение файла сверловки с медным слоем платы

Перед пуском программа рассчитывает карту толщины покрытия по фактической траектории сопла (раздел 4.2.3) и выводит распределение толщины по плате, её среднее и максимальное значения и запас до касания сопла (Рисунок 82). Результаты проверок сводятся в перечень предупреждений трёх уровней: сведения, предупреждения, которые оператор может принять, и блокирующие предупреждения (Рисунок 83). Предупреждение о замыкании перечисляет места, где осадок смыкает соседние элементы рисунка, с координатами и величиной перекрытия; оно принимается удержанием кнопки, и решение с отметкой времени записывается в файл прогона. Блокирующие предупреждения (несовпадение установленной иглы с заданием, выход рисунка за пределы заготовки, недостижимость режима по (63)) принять нельзя.



Рисунок 82 — Предсказание распределения толщины покрытия до начала металлизации



Рисунок 83 — Проверки перед пуском металлизации

Обход отверстий выполняется отдельным прогоном (Рисунок 84). Оператор отбирает отверстия по диаметру, задаёт толщину платы и целевую толщину покрытия в середине стенки. Для каждого отверстия программа вычисляет параметр $\xi_{Тк}$ по (53) при токе, выставленном на источнике, и время выдержки по (56); если $\xi_{Тк}$ превышает 1,5, пуск блокируется и выводится допустимый ток.



Рисунок 84 — Обход отверстий: а — параметры обхода; б — результат расчёта по (53)–(56)

На последнем шаге (Рисунок 85) задаётся размещение рисунка на заготовке и выполняется объезд четырёх углов области металлизации с отступом наружу при принудительно выключенном канале; после каждого угла оператор подтверждает, что сопло ничего не задевает. В ручном режиме сопло перемещается с шагом от 0,01 до 10 мм, и текущее положение можно принять за начало координат. Пуск становится доступным, когда выполнены все условия готовности: приборы подключены, диагностика пройдена, игла подтверждена, зазор задан, задание загружено, блокирующих предупреждений нет, объезд углов выполнен.

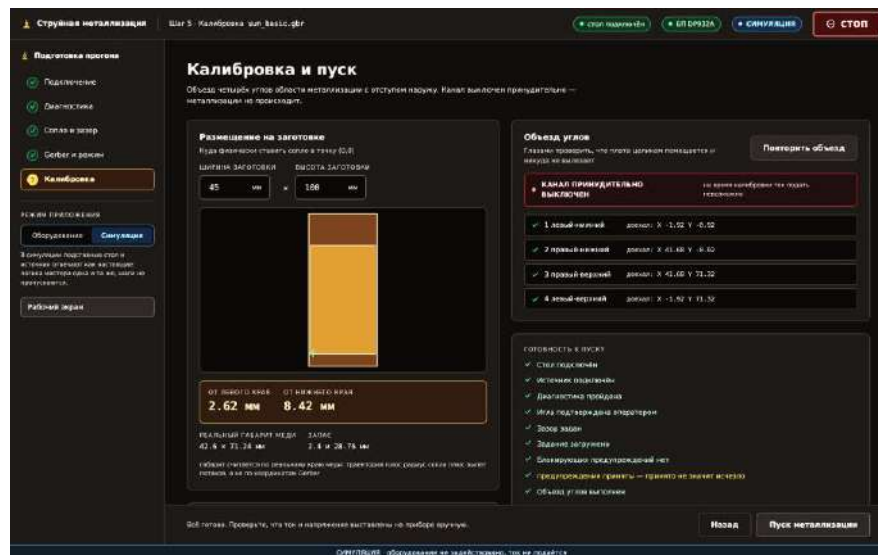


Рисунок 85 — Экран калибровки и пуска

4.2.3 Расчёты, выполняемые до начала металлизации

Помимо формирования управляющей программы система выполняет следующие расчёты, опирающиеся на модель раздела 3.2.

— Ширина осаждения и радиус зоны осаждения по (43) и (44) для заданного сопла; отношение плотности тока к предельной по (45).

— Число проходов по заданной целевой толщине по (62) с явным указанием метрики толщины.

— Карта толщины покрытия по всей плате, вычисляемая по фактической траектории сопла. Для каждого отрезка траектории толщина считается по (46) в конечных пределах, без приближения бесконечной прямой. Отрезки спирального заполнения контактных площадок имеют длину 0,25 мм при радиусе зоны осаждения 0,419 мм, и приближение бесконечной прямой завысило бы толщину на них вдвое.

— Проверка достижимости режима по (63). Расчёт прекращается в точке, где пиковая толщина достигает зазора и сопло касается покрытия, поскольку линейное продолжение за эту точку дало бы физически недостижимое значение. Вместо него выводятся достижимое и, отдельно, запрошенное число проходов.

— Предсказание замыкания соседних элементов рисунка. Просветы между кромками осадка сравниваются только у элементов, разделённых рисунком; соединение элементов одной цепи замыканием не считается.

— Сверка фактического заряда, прошедшего через сопло, с расчётным по времени процесса при подтверждённом токе.

Карта толщины выявляет неравномерность, которую не показывает расчёт по формулам методики. Так, при спиральном заполнении контактной площадки осадок распределён по ней неравномерно, и рельеф осадка зависит от диаметра площадки (Рисунок 86); подробнее это рассмотрено в разделе 4.2.5.

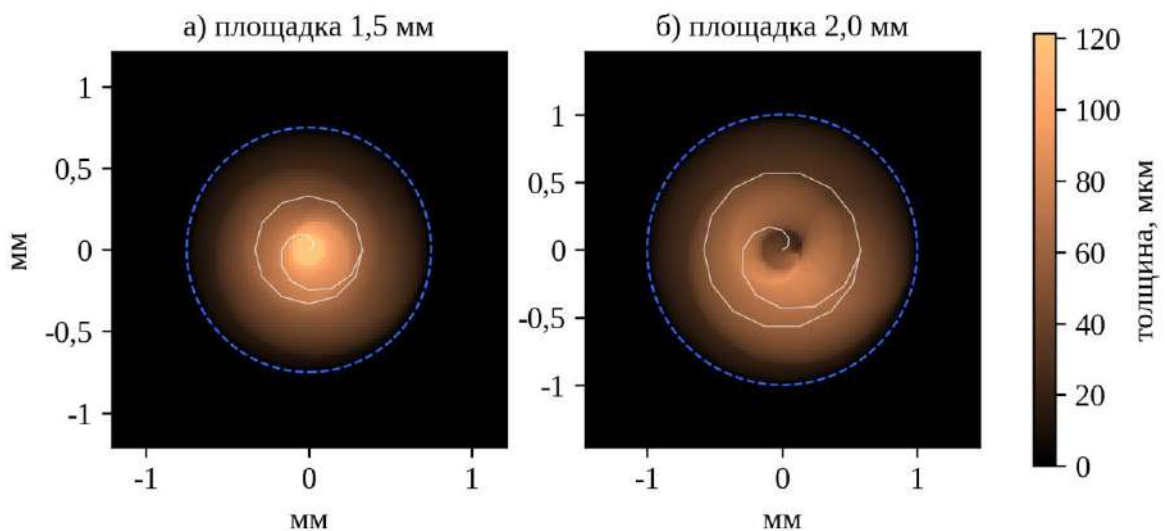


Рисунок 86 — Рельеф осадка на контактной площадке при спиральном заполнении (64 прохода): а — площадка 1,5 мм; б — площадка 2,0 мм

Для отверстий программа рассчитывает режим по модели раздела 3.4. Допустимый ток, при котором $\xi_{\text{Тк}} = 1,5$, растёт с диаметром отверстия и убывает с толщиной платы, а время выдержки при этом токе для заданной толщины в середине стенки с ростом диаметра убывает (Рисунок 87). Для отверстия диаметром 0,8 мм в плате толщиной 2 мм допустимый ток составляет 4,26 мА ($8,5 \text{ А/дм}^2$), рассеивающая способность по (54) — 0,54, а выдержка для толщины 25 мкм в середине стенки — около 17 мин.

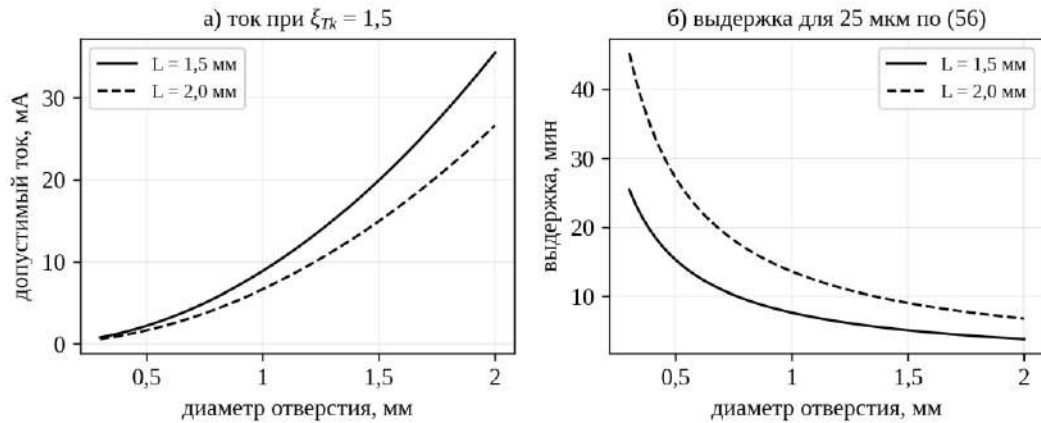


Рисунок 87 — Режим металлизации сквозного отверстия: а — допустимый ток при $\xi_{Tk} = 1,5$; б — выдержка для толщины 25 мкм в середине стенки

4.2.4 Исполнение и требования безопасности

В программу заложены требования, выполнение которых необходимо при работе с источником питания и координатным столом в среде электролита. Перемещение выполняется синхронно: команда — подтверждение — опрос состояния до завершения движения — считывание фактических координат. Канал источника питания переключается только с подтверждением по ответу прибора, и только в этом месте программы изменяется состояние канала. Канал отключается безусловно при любом завершении работы: по паузе, по останову, по исключению, по обрыву связи и по выходу из программы. Предусмотрены два останова с различным поведением: штатное завершение доводит текущий проход до конца и отводит сопло, аварийный останов прерывает движение в текущей точке. В режиме моделирования аварийный останов прекращает процесс так же, как на установке, и выдаёт отчёт о выполненной части.

Состояния программы управления при выполнении прогона и переходы между ними показаны на Рисунке 88. Из любого рабочего состояния (металлизация, пауза, завершение, объезд углов) возможен аварийный останов, а при отказе оборудования или обрыве связи программа переходит в состояние «Отказ». В обоих случаях первым действием выключается канал источника питания.



Рисунок 88 — Диаграмма состояний программы управления

Порядок обмена с оборудованием показан на Рисунке 89. Перемещение считается завершённым только после того, как контроллер сообщил состояние покоя и программа прочитала фактические координаты. Включение канала считается состоявшимся только после ответа прибора на запрос состояния канала; если ответ не получен или не совпадает с командой, прогон переводится в состояние отказа. При аварийном останове сначала с подтверждением гасится канал, затем останавливается подача стола и запрашивается положение сопла для отчёта.

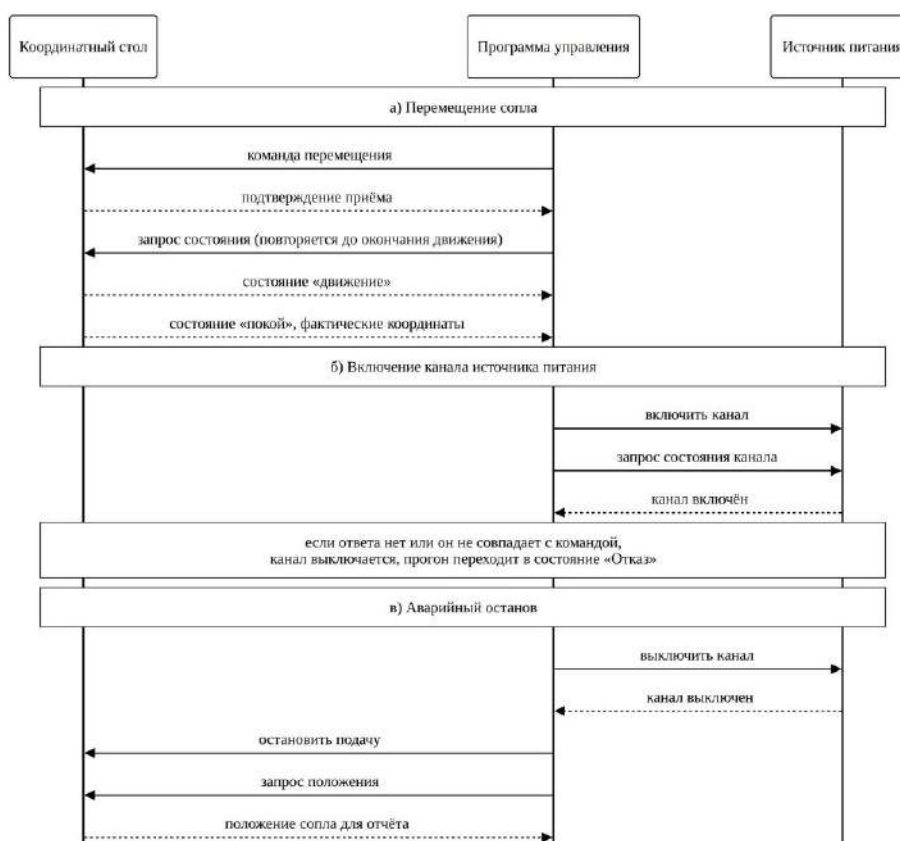


Рисунок 89 — Порядок обмена программы управления с оборудованием: а — перемещение сопла; б — включение канала источника питания; в — аварийный останов

После аварийного останова программа выводит отчёт (Рисунок 90): состояние канала с подтверждением прибора, положение сопла, число пройденных проходов и элементов рисунка, прошедший заряд и время от нажатия кнопки до записи команды в прибор. Журнал прогона записывается построчно с немедленным сбросом на диск, и при остановке в него добавляются последние команды, переданные приборам.



Рисунок 90 — Отчёт об аварийном останове в режиме моделирования

4.2.5 Расчёт толщины покрытия по фактической траектории

Расчёт карты толщины по фактической траектории выявил два обстоятельства, не обнаруживаемые при расчёте по формулам методики раздела 4.1.

Первое. Спиральное заполнение контактной площадки перекрывает само себя вблизи центра. Шаг спирали Архимеда по углу назначается из условия постоянной длины сегмента, поэтому при малых радиусах он оказывается много меньше ширины осаждения, и сопло проходит через центральную область площадки многократно. Результат при 64 проходах, соответствующих средней толщине 25 мкм, приведён в Таблице 20. Максимальная толщина на площадке составляет 30–121 мкм при 32,2 мкм на проводнике: на площадке диаметром 1,0 мм, лишь немного превышающем диаметр сопла, она не больше толщины

проводника, а на площадках диаметром 1,5–3,0 мм превосходит её в 2,4–3,8 раза. При рабочем зазоре 10 мм это не более 1,2 % зазора, поэтому касание сопла и покрытия исключено, однако покрытие площадки получается существенно неравномерным. Зависимость от диаметра площадки немонотонна, поскольку число витков спирали изменяется скачком; следовательно, явление определяется назначением траектории. Возможные меры: начинать спираль не от нуля, а от радиуса, равного половине шага, либо назначать число проходов для контактных площадок отдельно от проводников. Явление подлежит экспериментальной проверке: при первой металлизации следует измерить толщину в центре площадки и на проводнике отдельно.

Таблица 20 — Толщина покрытия на контактной площадке при спиральном заполнении (64 прохода при подаче 100 мм/мин, сопло 0,838 мм, зазор около 10 мм, ток 15 мА)

Диаметр площадки, мм	Толщина в центре, мкм	Максимальная толщина по площадке, мкм	Толщина на проводнике, мкм	Отношение максимума к толщине проводника	Максимум к зазору, %
1,0	30	30	32,2	0,9	0,3
1,5	121	121	32,2	3,8	1,2
2,0	40	92	32,2	2,9	0,9
2,5	61	88	32,2	2,7	0,9
3,0	43	77	32,2	2,4	0,8

На контрольном рисунке из 47 проводников и 18 контактных площадок с общей длиной траектории 612 мм (Рисунок 91) система назначила 64 прохода (средняя толщина по рисунку 27,1 мкм) и нашла три замыкания: кромки осадка площадки 18 и проводника 7 перекрываются на 0,18 мм, проводников 12 и 13 — на 0,10 мм, площадки 18 и проводника 6 — на 0,05 мм. Элементы в рисунке разведены, но их смыкает осадок, который шире проводника рисунка. Максимальная толщина на площадках составляет 148 мкм, что в 4,6 раза больше, чем на проводниках (32,2 мкм). Расчётная продолжительность металлизации контрольного рисунка с учётом измеренного ускорения координатного стола составляет около 10,0 ч (раздел 4.2.6).

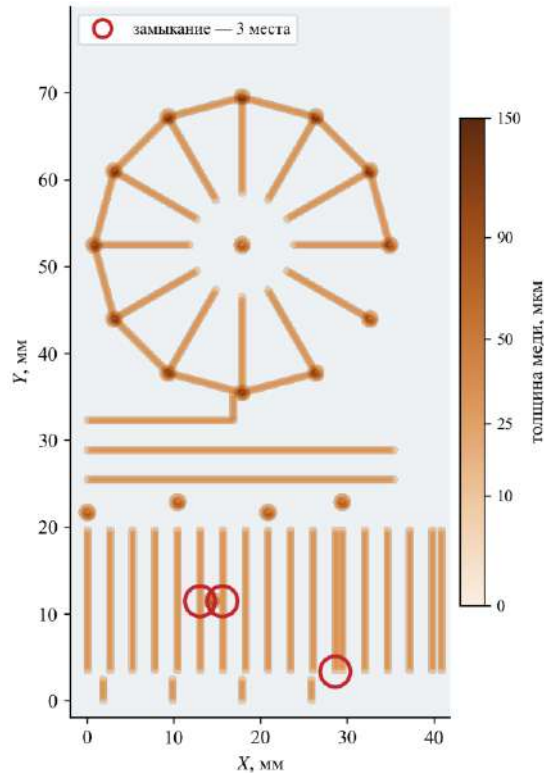


Рисунок 91 — Распределение толщины покрытия на контрольном рисунке, рассчитанное по фактической траектории сопла; окружности — места замыкания соседних элементов

Второе. Оценка времени металлизации по формулам (58)–(61) завышена по проводникам примерно вдвое, поскольку обратный проход считался холостым и выполняемым на скорости перемещения, тогда как в действительности он выполняется под током на рабочей подаче. В системе управления время процесса вычисляется обходом фактической управляющей программы.

4.2.6 Ввод в работу на оборудовании

Ввод системы управления в работу на оборудовании разбит на этапы, на каждом из которых проверяется одна группа функций, а ток на плату подаётся только на последних этапах (Рисунок 92). На этапе 0 проверяются связь со столом, чтение координат и остановка подачи без платы; на этапе 1 — источник питания отдельно от установки: идентификация, переключение канала и измерение тока вхолостую; на этапе 2 — объезд углов заготовки при заблокированном канале; на этапе 3 — касание сопла с медью и повторяемость измерения зазора; на этапе 4 —

металлизация одной дорожки со сверкой роста осадка с моделью; на этапе 5 — металлизация полноразмерного рисунка.

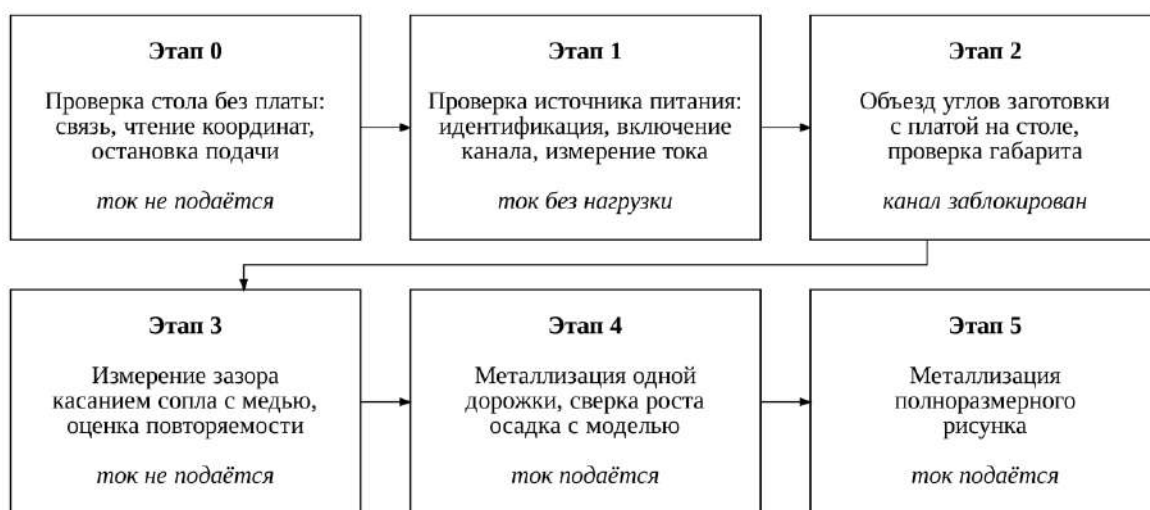


Рисунок 92 — Этапы ввода системы управления в работу на оборудовании

Уже первые этапы выявили расхождения между допущениями программы и оборудованием. Параметр \$10 контроллера, определяющий состав сообщения о состоянии, в прошивке GRBL 0.9 имеет иной смысл, чем в версии 1.1, и чтение координат было приведено в соответствие с установленной прошивкой. Ускорение стола, прочитанное из его настроек, составило 10 мм/с² вместо принятых по умолчанию 500 мм/с²; с учётом измеренного ускорения и измеренной длительности обмена одной командой (0,066 с) расчётная продолжительность металлизации контрольного рисунка увеличилась с 8,5 до 10,0 ч (Рисунок 93). Кроме того, проверка канала источника была переделана в двухшаговую: при одном вызове она подтверждала переключение, которое оператор не успевал увидеть.

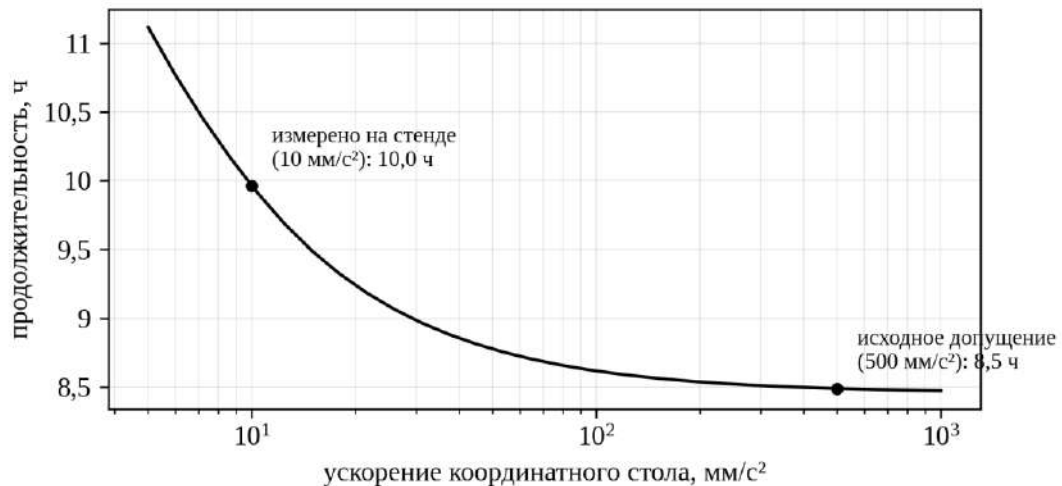


Рисунок 93 — Расчётная продолжительность металлизации контрольного рисунка в зависимости от ускорения координатного стола

4.2.7 Проверка программного обеспечения

Правильность работы системы управления подтверждается тремя видами проверок, выполняемых без оборудования: модульными тестами модели, планировщика, разбора файлов проекта, модуля исполнения и требований безопасности; проверкой соответствия заданным критериям приёмки; наконец, полным циклом обработки реальной печатной платы в режиме моделирования (от разбора файлов проекта до карты толщины). Такой цикл занимает около двух минут и не требует ни оборудования, ни сетевого соединения.

4.3 Технологический процесс струйной металлизации печатных плат

Разработан технологический процесс изготовления металлизированных печатных плат с применением струйного способа металлизации и схемы прямой металлизации на основе аммиачного комплекса гипофосфита меди. Металлизация отверстий и проводящего рисунка выполняется на разработанной автоматизированной системе струйной металлизации (раздел 2.3.2) без гальванических ванн, а подготовка и активация — погружными операциями с термообработкой.

Технологический процесс состоит из четырёх последовательных этапов: подготовки детали к активации, активации заготовки, металлизации сквозных отверстий и металлизации проводящего рисунка. Блок-схема процесса показана на Рисунке 94.

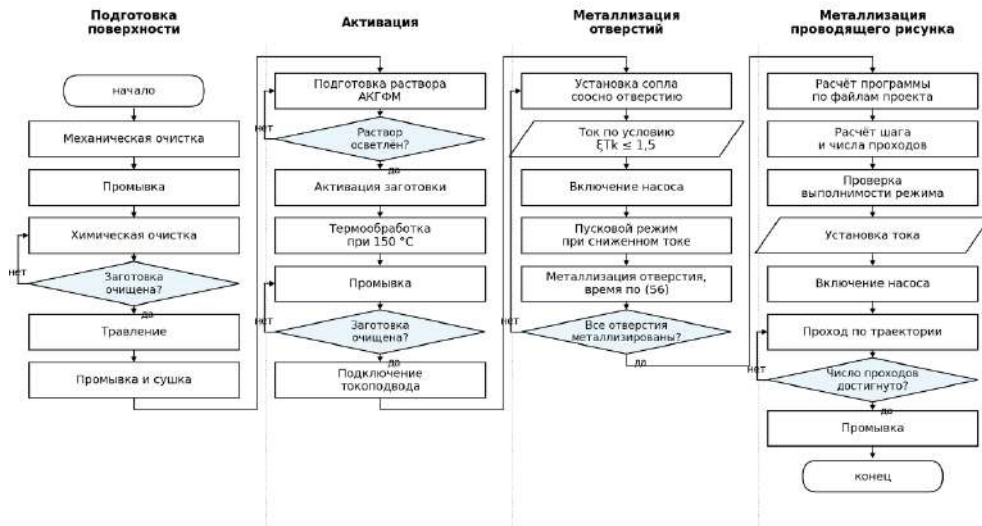


Рисунок 94 — Блок-схема технологического процесса металлизации печатных плат струйным способом

Последовательность изменений заготовки показана на Рисунке 95. Просверленная заготовка не проводит ток: через стеклотекстолит и стенки отверстий ток не идёт, и медь на них не осаждается. Активация создаёт на поверхности и на стенках отверстий сплошной проводящий слой, который включается в цепь как катод, и по этому слою струя наращивает медь.

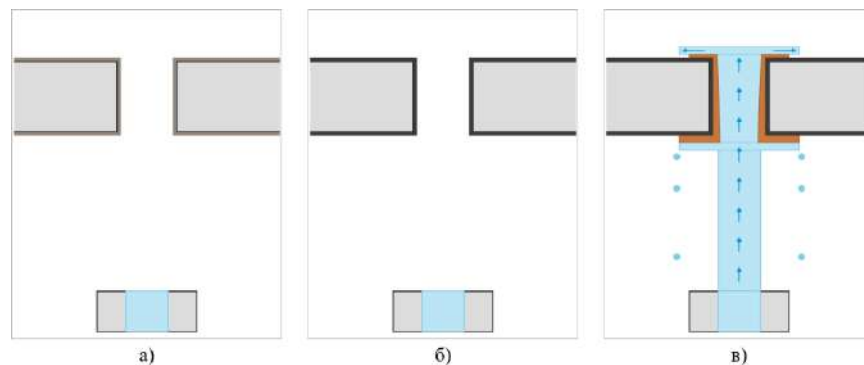


Рисунок 95 — Этапы подготовки и металлизации сквозного отверстия: а) просверленная заготовка; б) заготовка после активации со сплошным проводящим слоем; в) осаждение меди струёй электролита

4.3.1 Подготовка заготовки к активации

Подготовка заготовки к активации включает механическую и химическую очистку поверхности, необходимую для адгезии активирующего состава. Последовательность операций:

1. Зашкурить просверленную заготовку мелкозернистой шлифовальной шкуркой, удаляя остатки сверления.
2. Промыть заготовку.
3. Обработать заготовку нейлоновой щёткой в пемзовой суспензии, захватывая щетиной отверстия.
4. Промыть заготовку.
5. Опустить заготовку в раствор химической очистки и перемещать её перпендикулярно поверхности в течение 5–7 мин.
6. Извлечь заготовку, промыть, проверить степень очистки (вода на поверхности должна распределиться ровной плёнкой, не скатываться).
7. Подтравить медь на поверхности в установке травления в течение 1–1,5 мин.
8. Извлечь заготовку, промыть под горячей, затем холодной водой.

4.3.2 Активация заготовки комплексом гипофосфита меди

Активация создаёт на поверхности платы и в сквозных отверстиях токопроводящий слой, необходимый для последующего гальванического осаждения меди. Применяется схема прямой металлизации на основе аммиачного комплекса гипофосфита меди. Последовательность операций:

1. Перемешать раствор АКГФМ до его осветления.
2. Опустить заготовку в раствор активатора и в течение 10 мин прокачивать раствор через отверстия.
3. Нагреть заготовку до 150 °С и выдержать при этой температуре в течение 10 мин.

4. Смыть осадок с поверхности платы, аккуратно проталкивая очищающий раствор через отверстия.
5. Подключить токоподвод (отрицательный полюс источника питания) к медной фольге заготовки.

4.3.3 Металлизация сквозных отверстий

Металлизация сквозных отверстий выполняется на автоматизированной системе струйной металлизации. Плотность тока назначается из условия $\xi_{\text{Тк}} \leq 1,5$ по формуле (53), время металлизации — по формуле (56) с учётом диаметра и длины отверстия и целевой толщины покрытия в середине стенки. Последовательность операций:

1. Закрепить заготовку на автоматизированной установке струйной металлизации.
2. Проверить контакт токоподвода с заготовкой; медный анод (по ГОСТ 767-91 [2]) установлен в тракте подачи электролита.
3. С помощью программы управления установить сопло соосно отверстию. Диаметр сопла выбирается по разделу 3.4.8 в пределах от 0,7 до 0,9 диаметра отверстия; допустимое смещение оси составляет половину разности диаметров.
4. Выставить ограничение по току металлизации, рассчитанное по формуле (53) из условия $\xi_{\text{Тк}} \leq 1,5$; для отверстия диаметром 0,8 мм в плате толщиной 2 мм оно составляет 0,004 А.
5. Включить насос рециркулятора и убедиться в наличии контакта между анодом и заготовкой.
6. Провести пусковой режим: первые 2–3 минуты вести процесс при токе, сниженном в 10–20 раз относительно рабочего, чтобы фронт металлизации прошёл по всей глубине отверстия по затравочному слою; затем выйти на рабочий ток.
7. Рассчитать время металлизации по формуле (56) и задать его в программе управления.
8. Повторить пункты 3–7 для всех отверстий, подлежащих металлизации.

4.3.4 Металлизация проводящего рисунка

Металлизация проводящего рисунка выполняется непрерывным перемещением платы над соплом по траекториям, рассчитанным системой управления по файлам проекта печатной платы (раздел 4.2): одиночный проводник формируется повторными проходами вдоль его осевой линии, элемент шире проводника — параллельными проходами с шагом по критерию волнистости (раздел 4.1), контактная площадка — заполнением по спирали. Последовательность операций:

1. Закрепить заготовку на автоматизированной установке струйной металлизации и проверить контакт токоподвода с заготовкой.
2. Загрузить в систему управления файлы проекта печатной платы (Gerber, Excellon) и задать режим: диаметр сопла, зазор, ток, расход, скорость перемещения и целевую толщину покрытия с указанием её метрики.
3. Рассчитать управляющую программу: траектории, шаг заполнения широких элементов и число проходов по (62).
4. Проверить выполнимость режима до включения тока: отношение плотности тока к предельной по (45), условие (63) по зазору и отсутствие замыканий соседних элементов по расчётной карте толщины; при выявленных нарушениях скорректировать режим или рисунок.
5. Установить сопло в начальную точку, включить насос рециркулятора и убедиться в наличии контакта между анодом и заготовкой.
6. Установить ток металлизации, при котором плотность тока в зоне осаждения не превышает предельной (для сопла 0,838 мм при расходе 73 мл/мин — 15 мА), и выполнить цикл металлизации по управляющей программе.
7. Выключить ток и насос, снять и промыть заготовку.

Разработанный технологический процесс позволяет получить металлизированную печатную плату струйным способом. Отверстия и проводящий рисунок металлизуются на автоматизированной системе без гальванических ванн, подготовка и активация выполняются погружными операциями с

термообработкой, а нанесение фоторезиста и экспонирование из цикла исключаются.

4.4 Выводы по главе 4

Разработана методика расчёта технологических параметров автоматизированной системы струйной металлизации печатных плат, основанная на применении разработанных математических моделей распределения толщины осаждённой меди по поверхности печатной платы и в её сквозных отверстиях. Методика позволяет определить ширину осаждаемого проводника, шаг перемещения сопла, время обработки отдельных точек поверхности, число проходов по заданной целевой толщине покрытия и время металлизации сквозных отверстий в пределах применимости модели (49)–(56) ($\xi_{Tk} \leq 1,5$), а также проверить достижимость полученного режима.

Проверка модели распределения толщины по результатам компьютерной томографии (раздел 3.3) изменила два параметра методики. Шаг перемещения сопла, вычисленный по гауссову распределению и равный 0,55 мм, даёт по измеренному сечению проводника волнистость покрытия 53 %; принят шаг 0,28 мм с волнистостью 7,8 %, а при приближённо известном профиле шаг назначается по гарантированной волнистости (не более 20 % при $h \leq 0,22$ мм). Ширина осаждаемого проводника равна диаметру сопла (44) и от зазора не зависит, пока незатопленная струя сохраняет сечение, поэтому разрешающая способность способа определяется прежде всего выбором сопла.

На основании разработанной методики получены расчётные формулы для основных технологических параметров: ширины осаждаемого проводника, шага перемещения сопла, времени обработки одной точки, времени обработки одной строки, числа проходов для полного покрытия платы и числа проходов по заданной целевой толщине, а также условие достижимости режима по зазору.

Разработан технологический процесс металлизации печатных плат струйным способом, включающий четыре последовательных этапа: подготовку заготовки к

активации, активацию заготовки по схеме прямой металлизации на основе аммиачного комплекса гипофосфита меди, металлизацию сквозных отверстий и металлизацию проводящего рисунка. Металлизация отверстий и проводящего рисунка выполняется на разработанной автоматизированной системе струйной металлизации (раздел 2.3.2) без гальванических ванн, а подготовка и активация — погружными операциями с термообработкой. Из цикла производства печатных плат исключаются нанесение фоторезиста, экспонирование и проявление.

Разработана автоматизированная система управления установкой, реализующая методику расчёта и позволяющая получить карту толщины покрытия по фактической траектории сопла до начала металлизации, выявить недостижимые режимы и предсказать замыкание соседних элементов проводящего рисунка. На контрольном рисунке из 47 проводников и 18 контактных площадок система выявила три замыкания элементов, разведённых в рисунке, и превышение толщины на контактных площадках при спиральном заполнении до 4,6 раза над толщиной проводника. Установлено также, что расчёт по формулам (58)–(61) примерно вдвое завышает время металлизации проводников.

Разработанный технологический процесс сокращает число стадий производства печатных плат и делает металлизацию доступной для мелкосерийного и единичного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача: разработан и исследован струйный способ локального электроосаждения меди с подачей электролита снизу вверх, обеспечивающий селективное формирование проводящего рисунка и металлизацию сквозных отверстий печатных плат без фоторезиста, экспонирования и гальванических ванн в условиях мелкосерийного и единичного производства.

Основные результаты и выводы.

1. Проведён анализ методов металлизации печатных плат и исследований по струйному электроосаждению. Показано, что проводящий слой на диэлектрике, полученный как химическим меднением, так и прямой металлизацией, затем наращивается гальваническим меднением, и весь процесс выполняется в гальванических линиях с большим числом ванн. Это увеличивает стоимость оборудования и трудоёмкость обслуживания и препятствует применению таких процессов в мелкосерийном и единичном производстве. Струйное электроосаждение применялось к изготовлению печатных плат лишь в единичных работах: массообмен в сквозном отверстии под струёй изучен только на модельной системе без осаждения металла при подаче струи сверху на неподвижную плату, а подача электролита снизу вверх, перемещение платы относительно сопла и осаждение меди в сквозных отверстиях при струйной подаче остаются малоизученными

2. Обосновано применение струйного способа для металлизации печатных плат и определено его место в технологическом процессе: проводящий слой на диэлектрике создаётся прямой металлизацией, после чего медь селективно наращивается струёй, что исключает из цикла нанесение фоторезиста, экспонирование, проявление и гальванические ванны меднения. В качестве схемы подготовки поверхности определена прямая металлизация на основе аммиачного комплекса гипофосфита меди: она исключает палладиевый активатор, не требует импортных реагентов и сокращает число стадий и время подготовки поверхности.

При гальваническом меднении тест-купонов доля дефектных отверстий составила 0,14 против 0,25 и 0,50 для графитовых активаторов; отверстия диаметром 0,8–2 мм металлизированы без дефектов, а все дефекты пришлись на отверстия диаметром 0,5 мм.

3. Разработан макет автоматизированной установки струйной металлизации с подачей электролита снизу вверх и программным перемещением платы над неподвижным соплом. Механизмы перемещения заготовки защищены от электролита экраном, сопла сменные, а объём электролита снижен до 250 мл.

4. Установлены закономерности локального электроосаждения меди при подаче электролита снизу вверх: незатопленная струя на пути до платы сохраняет сечение сопла (при зазоре 10 мм она тормозится на 2 % и расширяется на 1 %), массоотдача в зоне торможения ламинарной струи постоянна, а ширина зоны осаждения определяется диаметром сопла. Сечение проводника при сканировании равно интегралу скорости осаждения по траектории и зависит только от отношения полного времени металлизации к длине линии. Измеренное отношение ширины проводника у подложки и в середине его высоты подтверждает гипотезу постоянной массоотдачи и отвергает гипотезу затопленной струи с колоколообразным распределением.

5. Разработана математическая модель распределения толщины осаждённой меди по поверхности печатной платы (35)–(48), рассчитывающая сечение проводника по току, времени металлизации, длине линии, диаметру сопла и свойствам электролита без калибровки по результатам предварительного осаждения. По данным рентгеновской компьютерной томографии (500 сечений проводника) расхождение расчёта с измерением составляет 2,2 % по площади сечения и 2,1 % по средней толщине, с учётом наклона струи — 1,2 % по ширине и 4,9 % по максимальной толщине.

6. Показано, что на поверхности платы осаждение идёт вблизи предельной диффузионной плотности тока, поэтому форма осадка следует распределению массоотдачи, выход по току близок к единице (баланс массы сходится с точностью 2 %), а осадок плотный (объёмная доля пустот $9 \cdot 10^{-6}$). Покрытие выдержало

испытания адгезии методами липкой ленты и полировки по ГОСТ Р 55744—2013 без отслоений и вздутий; удельное сопротивление покрытия $1,75 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ при 23°C соответствует массивной меди. Различие осадка при длительной неподвижной выдержке (столбчатый нарост) и при сканировании (сечение полное полуэллипса) объяснено самоусилением роста вблизи предельного тока.

7. Установлено, что ширина осаждаемого проводника определяется диаметром сопла. Гипотезы о затухании массообмена в пристенной струе, об омическом распределении тока и о гидравлическом прыжке как причинах резкой границы осадка отвергнуты количественно; в качестве механизма предложена граница смоченной области, что требует прямой проверки. По опубликованным данным отношение ширины металлического покрытия к диаметру сопла при подаче струи сверху вниз составляет от 1,2 до 3,0; в разработанном способе — 1,04.

8. Разработана математическая модель распределения толщины меди по длине стенки сквозного отверстия (49)–(56), учитывающая допустимую плотность тока, омическое ограничение равномерности покрытия, свойства электролита и протяжённость отверстия. Равномерность покрытия в отверстии определяется параметром $\xi_{\text{Тк}}$ и не зависит от скорости электролита. Модель воспроизводит опубликованные данные со средним отклонением 6,0 и 8,4–8,9 % при $\xi_{\text{Тк}} \leq 1,5$. Допустимая плотность тока в отверстии диаметром 0,8 мм в плате толщиной 2 мм составляет $8,5 \text{ А/дм}^2$ при $\xi_{\text{Тк}} \leq 1,5$, то есть примерно в 30 раз ниже плотности тока на поверхности, поэтому отверстия и проводящий рисунок металлизироваться раздельными режимами.

9. Разработана методика расчёта режимов и траекторий струйной металлизации по данным проекта печатной платы: ширина проводника, шаг заполнения широких элементов по критерию волнистости, число проходов по целевой толщине с указанием её метрики, ток и время металлизации отверстий, диаметр сопла для отверстия (0,7–0,9 его диаметра) и проверка выполнимости режима по диффузионному ограничению и по зазору между соплом и осадком.

10. Методика реализована в программном обеспечении автоматизированной установки, которое строит управляющую программу по файлам проекта, до начала

металлизации рассчитывает распределение толщины по фактической траектории сопла, выявляет невыполнимые режимы и замыкания соседних элементов рисунка и исполняет одну и ту же управляющую программу на установке и в режиме моделирования.

11. Разработан технологический процесс металлизации печатных плат струйным способом из четырёх этапов (подготовка поверхности, активация аммиачным комплексом гипофосфита меди, металлизация сквозных отверстий и металлизация проводящего рисунка) без фоторезиста, экспонирования, проявления и гальванических ванн меднения. Результаты работы внедрены в работу ООО «СВВ» и в учебный процесс МАИ.

Таким образом, цель диссертационной работы — обеспечение возможности селективного формирования проводящего рисунка и металлизации сквозных отверстий печатных плат в условиях мелкосерийного и единичного производства посредством разработки струйного способа локального электроосаждения меди с подачей электролита снизу вверх — достигнута, поставленные задачи решены.

Перспективы дальнейших исследований:

Перспективными направлениями развития результатов работы представляются следующие.

1. В части развития технологии струйной металлизации печатных плат:

— Масштабирование разработанной технологии на многослойные печатные платы и на отверстия, для которых значение безразмерного параметра $\xi_{\text{тк}}$ превышает 1,5, что потребует уточнения модели распределения толщины покрытия в отверстиях с учётом перехода катодной реакции в смешанный режим, при котором поляризационное сопротивление перестаёт быть тафелевским (раздел 3.4.6).

— Интеграция автоматизированной системы с цифровыми системами мониторинга и адаптивного управления технологическими режимами по принципам Индустрии 4.0 и исследование импульсного режима электроосаждения для дальнейшего повышения равномерности покрытия и снижения пористости осадка.

— Экспериментальная проверка постоянства ширины осаждаемого проводника при изменении зазора: получение проводников одним соплом при нескольких зазорах — от нескольких диаметров до расстояний, сравнимых с длиной распада струи. Задача имеет самостоятельное значение, поскольку опубликованные серии по осаждению показывают рост ширины с зазором, тогда как (44) предполагает её постоянство.

— Измерение угла наклона струи на установке и его устранение: по профилю сечения проводника угол оценён в $17\text{--}21^\circ$ (раздел 3.3.3), а на установке он не измерялся. Угол определяется по смещению следа струи при изменении высоты платы над соплом; после его устранения сопоставление ширины и максимальной толщины проводника с расчётом по (48) выполняется без параметров, взятых из профиля.

— Проверка механизма, формирующего сечение полное полуэллипса при сканировании: серия проводников с разным числом проходов при неизменных сопле, зазоре и токе и кратковременные выдержки в неподвижной точке при тех же условиях с томографическим измерением профиля. Согласно предложенному объяснению, тонкий проводник должен иметь сечение, близкое к полуэллипсу, заполненность плеч сечения — нарастать с толщиной, а тонкое неподвижное пятно — иметь колоколообразный профиль. Выдержки одним соплом при нескольких зазорах позволят, кроме того, оценить влияние развития профиля скорости струи с удалением от сопла на начальное распределение.

— Уточнение резкости границы осадка по поперечному микрошлифу: при толщине покрытия около 90 мкм металлографический метод даёт точность, на два порядка превосходящую томографическую, и позволяет определить ширину переходной кромки, не разрешаемую томографией.

— Проверка равенства ширины зоны осаждения диаметру сопла при других диаметрах сопла: установленное совпадение получено по томографии при единственном диаметре 0,838 мм. Опыт с неподвижной выдержкой (раздел 3.2.3) проверкой служить не может, поскольку при длительной выдержке рост

сосредоточивается в центре пятна и образует столбчатый нарост; для проверки нужны проводники, полученные вторым соплом.

— Прямая проверка зависимости рассеивающей способности отверстий от плотности тока в струйном режиме: металлизация серий отверстий при плотностях тока, различающихся на порядок, при одинаковом прошедшем заряде. Расчёт предсказывает снижение рассеивающей способности с 0,68 до 0,077 при росте плотности тока с 5 до 60 А/дм².

— Установление физической природы обрыва осадка сразу за радиусом сопла: прямое наблюдение смоченной области при подаче электролита снизу вверх и сопоставление её границы с границей осадка.

— Экспериментальная проверка расчётных предсказаний методики и системы управления: волнистости покрытия при шаге перемещения сопла 0,28 мм, превышения толщины в центре контактных площадок при спиральном заполнении до 3,8 раза над толщиной проводника и замыканий соседних элементов на контрольном рисунке; разработка способа изоляции элементов проводящего рисунка при активации всей поверхности платы.

2. В части оценки соответствия получаемых покрытий требованиям нормативно-технической документации:

— Количественная оценка адгезии медного покрытия к стеклотекстолитовому основанию определением прочности на отслаивание проводников по ГОСТ Р 55744—2013 (п. 5.3.2); качественные испытания методами липкой ленты и полировки по тому же стандарту отслоения покрытия не выявили (раздел 3.3.7).

— Проведение испытаний на термоудар в соответствии с ГОСТ Р 55693—2013 «Платы печатные жёсткие. Технические требования» [3] для оценки надёжности металлизации сквозных отверстий при циклических температурных воздействиях, характерных для процесса пайки.

— Разработка методики количественной оценки равномерности покрытия в сквозных отверстиях на основе статистической обработки массивов замеров

толщины, получаемых методом рентгеновской компьютерной томографии, в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 5725-1—2002.

3. В части расширения области применения разработанного способа:

— Применение разработанной технологии в опытно-конструкторских работах и при изготовлении лабораторных прототипов печатных узлов, а также для локальной металлизации и ремонта готовых печатных плат, в том числе в авиационно-космической отрасли, где замена повреждённых участков без демонтажа платы представляет практический интерес.

— Распространение методики и принципов автоматизированной системы на нанесение иных металлических покрытий (никель, олово, серебро) и на изготовление печатных СВЧ-плат, резонансных поверхностных структур и планарных антенных систем, что потребует адаптации составов электролитов и оценки точности воспроизведения топологии и качества кромки проводника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 1625—2016. Формалин технический. Технические условия. — Введён 2017-07-01. — Москва : Стандартиформ, 2016. — 9 с. — Текст : непосредственный.
2. ГОСТ 767—91. Аноды медные. Технические условия. — Москва : Издательство стандартов, 1991. — 16 с. — Текст : непосредственный.
3. ГОСТ Р 55693—2013. Платы печатные жёсткие. Технические требования. — Введён 2014-07-01. — Москва : Стандартиформ, 2013. — 20 с. — Текст : непосредственный.
4. ГОСТ Р ИСО 5725-1—2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. — Москва : Стандартиформ, 2006. — 33 с. — Текст : непосредственный.
5. Авторское свидетельство № 921124 СССР, М. Кл. Н 05 К 3/10. Способ металлизации отверстий печатных плат : № 2772501/18-21 : заявл. 19.06.1979 : опубл. 17.04.1982, Бюл. № 14 / Ю. И. Михайлов, А. М. Маккаев, О. И. Ломовский, В. В. Болдырев. — 3 с. — Текст : непосредственный.
6. Method of electroplating on a dielectric base : patent US 3099608 A / D. A. Radovsky, B. J. Ronkese. — Публ. 30.07.1963. — Текст : непосредственный.
7. Scanning nozzle plating system : patent US 3810829 / J. C. Fletcher, G. D. Oliver. — Публ. 14.05.1974. — Текст : непосредственный.
8. Liquid carbon black dispersion : patent US 4724005 / K. L. Minten, G. Pismennaya. — Публ. 09.02.1988. — Текст : непосредственный.
9. Абрамович, Г. Н. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Эколит, 2011. — 720 с. — Текст : непосредственный.
10. Бараковский, Ф. А. Струйный метод получения проводящего рисунка печатной платы / Ф. А. Бараковский, С. В. Ванцов, Ф. В. Васильев // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2020. — № 3 (194). — С. 108—113. — DOI 10.22184/1992-4178.2020.194.3.108.112. — Текст : непосредственный.

11. Бараковский, Ф. А. Исследование средств активации-сенсibilизации для мелкосерийного и единичного производства печатных плат / Ф. А. Бараковский, С. В. Ванцов // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2023. — № 5 (226). — С. 126—136. — DOI 10.22184/1992-4178.2023.226.5.126.133. — Текст : непосредственный.

12. Бараковский, Ф. А. Принципы и применение струйной металлизации для производства электроники / Ф. А. Бараковский, С. В. Ванцов, Е. А. Лийн, А. В. Назаров // Морской вестник. — 2026. — № 1 (97). — С. 71—76. — Текст : непосредственный.

13. Бараковский, Ф. А. Моделирование процесса высокоскоростного электроосаждения / Ф. А. Бараковский // Морской вестник. — 2026. — № 2 (98). — Текст : непосредственный.

14. Бараковский, Ф. А. Струйный метод получения проводящего рисунка печатной платы / Ф. А. Бараковский // Гагаринские чтения — 2020 : сборник тезисов докладов, Москва, 14—17 апреля 2020 года. — Москва : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. — С. 931—932. — Текст : непосредственный.

15. Бараковский, Ф. А. Струйный способ металлизации проводящего рисунка печатных плат / Ф. А. Бараковский // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики — 2020 : сборник аннотаций конкурсных работ XII Всероссийского межотраслевого молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов в области авиационной и ракетно-космической техники и технологий, Москва, 23—27 ноября 2020 года. — Москва : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020. — С. 81—82. — Текст : непосредственный.

16. Бараковский, Ф. А. Автоматизированная система для струйного способа металлизации печатных плат / Ф. А. Бараковский, Н. Д. Заикин // Гагаринские чтения — 2021 : сборник тезисов докладов XLVII Международной молодёжной научной конференции, Москва, 20—23 апреля 2021 года. — Москва : Издательство «Перо», 2021. — С. 302—303. — Текст : непосредственный.

17. Бараковский, Ф. А. Струйный метод металлизации печатных плат / Ф. А. Бараковский, Н. Д. Заикин // Авиация и космонавтика : тезисы 20-й Международной конференции, Москва, 22—26 ноября 2021 года. — Москва : Издательство «Перо», 2021. — С. 172—173. — Текст : непосредственный.

18. Бараковский, Ф. А. Исследование средств активации-сенсibilизации для мелкосерийного и единичного производства печатных плат / Ф. А. Бараковский, М. К. Костюкевич // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики : сборник аннотаций конкурсных работ XIV Всероссийского межотраслевого молодёжного конкурса научно-технических работ и проектов, Москва, 21—25 ноября 2022 года. — Москва : Издательство «Перо», 2022. — С. 71—72. — Текст : непосредственный.

19. Бараковский, Ф. А. Исследование альтернативных средств активации-сенсibilизации для металлизации печатных плат в условиях невозможности импорта / Ф. А. Бараковский // Сборник тезисов докладов участников V Международной научной конференции «Наука будущего» и VIII Всероссийского молодёжного научного форума «Наука будущего — наука молодых», Орёл, 20—23 сентября 2023 года. — Москва : ООО «Инконсалт К», 2023. — С. 158. — Текст : непосредственный.

20. Бараковский, Ф. А. Использование альтернативных средств активации-сенсibilизации для производства печатных плат в условиях импортозамещения / Ф. А. Бараковский, Е. К. Романов // Авиация и космонавтика : тезисы 22-й Международной конференции, Москва, 20—24 ноября 2023 года. — Москва : Издательство «Перо», 2023. — С. 120. — Текст : непосредственный.

21. Брусницына, Л. А. Изучение возможности долгосрочной работы раствора на основе меди (I), активирующего поверхности диэлектрика / Л. А. Брусницына, Е. И. Степановских, Т. А. Алексеева // Бутлеровские сообщения. — 2023. — Т. 75, № 7. — С. 24. — DOI 10.37952/ROI-jbc-01/23-75-7-24. — Текст : непосредственный.

22. Григорьев, П. Анализ технологий прямой металлизации отверстий печатных плат. Часть 1 / П. Григорьев, Т. Шимчук, Т. Цивинская // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2018. — № 8. — С. 138—141. — Текст : непосредственный.

23. Григорьев, П. Анализ технологий прямой металлизации отверстий печатных плат. Часть 2 / П. Григорьев, Т. Шимчук, Т. Цивинская // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2019. — № 1 (00182). — С. 128—136. — Текст : непосредственный.

24. Грушевская, С. Н. Свойства полупроводниковых оксидов меди, полученных электрохимическим методом, в реакции восстановления кислорода в щелочной среде / С. Н. Грушевская, А. В. Введенский // Конденсированные среды и межфазные границы. — 2013. — Т. 15, № 3. — С. 335—340. — Текст : непосредственный.

25. Гусев, А. А. Основы гидравлики : учебник для среднего профессионального образования / А. А. Гусев. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2018. — 285 с. — Текст : непосредственный.

26. Ильин, В. А. Технология изготовления печатных плат / В. А. Ильин ; под редакцией П. М. Вячеславова. — Ленинград : Машиностроение, 1984. — 75 с. — Текст : непосредственный.

27. Ломовский, О. И. Физико-химические основы металлизации диэлектриков термическим разложением гипофосфита меди : диссертация ... кандидата химических наук : 02.00.15 / Ломовский Олег Иванович. — Москва, 1983. — 166 с. — Текст : непосредственный.

28. Ломовский, О. И. Кинетика и механизм термического разложения гипофосфита меди / О. И. Ломовский, Ю. И. Михайлов, В. В. Болдырев, В. М. Мاستихин // Известия Сибирского отделения Академии наук СССР. Серия химических наук. — 1978. — № 6. — С. 51—56. — Текст : непосредственный.

29. Медведев, А. Печатные платы. Системы прямой металлизации / А. Медведев, В. Салтыкова, J. Lundquest // Компоненты и технологии. — 2003. — № 4. — С. 203—207. — Текст : непосредственный.

30. Медведев, А. М. Технология производства печатных плат / А. М. Медведев. — Москва : Техносфера, 2005. — 360 с. — Текст : непосредственный.

31. Медведев, А. Каким быть российскому производству электроники? Часть 1 / А. Медведев // Компоненты и технологии. — 2007. — № 69. — С. 231—238. — Текст : непосредственный.

32. Обработка поверхностей металлов и пластмасс с использованием электролитических и химических процессов : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 36—2017 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Бюро НДТ, 2017. — 228 с. — Текст : непосредственный.

33. Отчёт исследования российского рынка печатных плат / Информационно-аналитический центр «Центр современной электроники» ; ООО «СОВЭЛ». — 2018. — 90 с. — Текст : непосредственный.

34. Печатные платы : справочник. В 2 книгах. Книга 1 / под редакцией К. Ф. Кумбза, А. М. Медведева. — Москва : Техносфера, 2011. — 1016 с. — Текст : непосредственный.

35. Слипченко, Н. И. Исследование процессов скоростной металлизации печатных плат и путей её реализации / Н. И. Слипченко, В. Ф. Юзвешин // Радиоэлектроника и информатика. — 1999. — № 4 (9). — С. 26—30. — Текст : непосредственный.

36. Флёров, В. Н. Химическая технология в производстве радиоэлектронных деталей / В. Н. Флёров. — Москва : Радио и связь, 1988. — 106 с. — Текст : непосредственный.

37. Alkire, R. C. High-speed selective electroplating with single circular jets / R. C. Alkire, T. J. Chen // Journal of The Electrochemical Society. — 1982. — Vol. 129, No. 11. — P. 2424—2432. — DOI 10.1149/1.2123560. — Текст : непосредственный.

38. Behnia, M. Simulation of jet impingement heat transfer with the $k-\epsilon-v^2$ model / M. Behnia, S. Parneix, P. A. Durbin // Annual Research Briefs. — Stanford : Center for Turbulence Research, 1997. — P. 149—164. — Текст : непосредственный.

39. Bhagat, R. K. On the origin of the circular hydraulic jump in a thin liquid film / R. K. Bhagat, N. K. Jha, P. F. Linden, D. I. Wilson // Journal of Fluid Mechanics. — 2018. — Vol. 851. — R5. — Текст : непосредственный.

40. Bocking, C. The use of high-speed selective jet electrodeposition of gold for the plating of connectors / C. Bocking, D. B. Cameron // Transactions of the IMF. — 1994. — Vol. 72, No. 1. — P. 33—40. — Текст : непосредственный.

41. Buchlin, J.-M. Convective heat transfer in impinging-gas-jet arrangements / J.-M. Buchlin // Journal of Applied Fluid Mechanics. — 2011. — Vol. 4, № 2. — P. 137—149. — DOI 10.36884/jafm.4.02.11926. — Текст : непосредственный.

42. Chandrasekar, M. S. Pulse and pulse reverse plating — conceptual, advantages and applications / M. S. Chandrasekar, M. Pushpavanam // Electrochimica Acta. — 2008. — Vol. 53, No. 8. — P. 3313—3322. — Текст : непосредственный.

43. Chase, B. D. Jet polishing of semiconductors / B. D. Chase, D. B. Holt, B. A. Unvala // Journal of The Electrochemical Society. — 1972. — Vol. 119, No. 3. — P. 310—313. — Текст : непосредственный.

44. Chin, D. T. An analysis using the Chilton—Colburn analogy for mass transfer to a flat surface from an unsubmerged impinging jet / D. T. Chin, K. L. Hsueh // Electrochimica Acta. — 1986. — Vol. 31, No. 5. — P. 561—564. — Текст : непосредственный.

45. Chin, D. T. Mass transfer to a circular impinging jet electrode / D. T. Chin, C. H. Tsang // Journal of The Electrochemical Society. — 1978. — Vol. 125, № 9. — P. 1461—1470. — DOI 10.1149/1.2131697. — Текст : непосредственный.

46. Coombs, C. F. Coombs' printed circuits handbook / C. F. Coombs. — 6th edition. — New York : McGraw-Hill Professional, 2008. — 1000 p. — Текст : непосредственный.

47. De Vogelaere, M. High-speed plating for electronic applications / M. De Vogelaere, V. Sommer, H. Springborn, U. Michelsen-Mohammadein // Electrochimica Acta. — 2001. — Vol. 47, No. 1—2. — P. 109—116. — Текст : непосредственный.

48. Deponte, D. P. Towards ETEM serial crystallography: electron diffraction from liquid jets / D. P. Deponte, J. T. McKeown, U. Weierstall, R. B. Doak, J. C. H. Spence // Ultramicroscopy. — 2011. — Vol. 111, No. 7. — P. 824—827. — Текст : непосредственный.

49. Dover, S. J. Rapid prototyping using electrodeposition of copper / S. J. Dover, A. E. W. Rennie, G. R. Bennett // Solid Freeform Fabrication Symposium, Texas, 1996. — P. 191—198. — Текст : непосредственный.

50. Gadkari, S. A. Micro fabrication using electrodeposition and ultrasonic acoustic liquid manipulation / S. A. Gadkari, T. H. Nayfeh // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2008. — Vol. 39, No. 1—2. — P. 107—117. — Текст : непосредственный.

51. Gu, W. High-speed electrolyte jet 3D printing of ultrasMOOTH and robust Cu microelectrodes / W. Gu, A. Marianov, Y. Jiang // Journal of Materials Science. — 2024. — Vol. 59. — P. 4605—4619. — Текст : непосредственный.

52. Hackert-Oschätzchen, M. Microstructuring of carbide metals applying jet electrochemical machining / M. Hackert-Oschätzchen, A. Martin, G. Meichsner, M. Zinecker, A. Schubert // Precision Engineering. — 2013. — Vol. 37, No. 3. — P. 621—634. — Текст : непосредственный.

53. Huber, A. M. Effect of jet—jet spacing on convective heat transfer to confined, impinging arrays of axisymmetric air jets / A. M. Huber, R. Viskanta // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 1994. — Vol. 37, № 18. — P. 2859—2869. — DOI 10.1016/0017-9310(94)90340-9. — Текст : непосредственный.

54. Karakus, C. Metal distribution in jet plating / C. Karakus, D. T. Chin // Journal of The Electrochemical Society. — 1994. — Vol. 141, No. 3. — P. 691—697. — Текст : непосредственный.

55. Kawanaka, T. Mirror-like finishing by electrolyte jet machining / T. Kawanaka, M. Kunieda // CIRP Annals — Manufacturing Technology. — 2015. — Vol. 64, No. 1. — P. 237—240. — Текст : непосредственный.

56. Kolonits, T. Effect of bath additives on the microstructure, lattice defect density and hardness of electrodeposited nanocrystalline Ni films / T. Kolonits, P. Jenei, L. Péter, I. Bakonyi, Z. Czigány, J. Gubicza // Surface and Coatings Technology. — 2018. — Vol. 349. — P. 611—621. — Текст : непосредственный.

57. Kozak, J. Study of electrochemical jet machining process / J. Kozak, K. P. Rajurkar, R. Balakrishna // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. — 1996. — Vol. 118, No. 4. — P. 490—498. — Текст : непосредственный.

58. Kozak, J. The effect of electrochemical machining on the fatigue strength of heat resistance alloys / J. Kozak // *Fatigue of Aircraft Structures*. — 2011. — Vol. 2011, No. 3. — P. 86—95. — Текст : непосредственный.

59. Kunieda, M. Rapid prototyping by selective electrodeposition using electrolyte jet / M. Kunieda, R. Katoh, Y. Mori // *CIRP Annals*. — 1998. — Vol. 47, No. 1. — P. 161—164. — DOI 10.1016/S0007-8506(07)62808-X. — Текст : непосредственный.

60. Li, Q. Prediction of electrodeposition rates from an impinging jet / Q. Li, J. D. A. Walker // *AIChE Journal*. — 1996. — Vol. 42, No. 2. — P. 391—404. — Текст : непосредственный.

61. Lienhard, J. H. V. Heat transfer by impingement of circular free-surface liquid jets / J. H. V. Lienhard // 18th National and 7th ISHMT—ASME Heat and Mass Transfer Conference. — Guwahati, India, 2006. — P. 1—17. — Текст : непосредственный.

62. Liu, B. Direct metallization technology introduction / B. Liu // 9th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT). — 2014. — P. 351—354. — Текст : непосредственный.

63. Lytle, D. Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings / D. Lytle, B. W. Webb // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 1994. — Vol. 37, № 12. — P. 1687—1697. — DOI 10.1016/0017-9310(94)90059-0. — Текст : непосредственный.

64. McGeough, J. A. Electroforming process and application to micro/macro manufacturing / J. A. McGeough, M. C. Leu, K. P. Rajurkar, A. K. M. De Silva, Q. Liu // *CIRP Annals*. — 2001. — Vol. 50, No. 2. — P. 499—514. — Текст : непосредственный.

65. Mitchell-Smith, J. Energy distribution modulation by mechanical design for electrochemical jet processing techniques / J. Mitchell-Smith, A. Speidel, J. Gaskell, A. T. Clare // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. — 2017. — Vol. 122. — P. 32—46. — Текст : непосредственный.

66. Rajput, M. S. Modelling of high-speed selective jet electrodeposition process / M. S. Rajput, P. M. Pandey, S. Jha // *Journal of Manufacturing Processes*. — 2015. — Vol. 17. — P. 98—107. — DOI 10.1016/j.jmapro.2014.07.012. — Текст : непосредственный.

67. Rajurkar, K. P. Minimization of machining allowance in electrochemical machining / K. P. Rajurkar, D. Zhu, B. Wei // *CIRP Annals*. — 1998. — Vol. 47, No. 1. — P. 165—168. — Текст : непосредственный.

68. Schneemann, C. Mass transfer at a wall-tube electrode: correlations for the stagnation and wall-jet regions / C. Schneemann [et al.] // *Journal of The Electrochemical Society*. — 2025. — Vol. 172, № 6. — Art. 066503. — DOI 10.1149/1945-7111/add840. — Текст : непосредственный.

69. Speidel, A. Electrochemical jet manufacturing technology: from fundamentals to application / A. Speidel, I. Bisterov, K. Saxena, M. Zubayr, D. Reynaerts, W. Natsu, A. Clare // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. — 2022. — Vol. 180. — 103931. — DOI 10.1016/j.ijmachtools.2022.103931. — Текст : непосредственный.

70. Tan, J. High performance Co—Cr₃C₂ composite coating by jet electrodeposition / J. Tan, H. Song, X. Zheng, Q. Zhang, M. Wang // *Surface Engineering*. — 2018. — Vol. 34, No. 11. — P. 861—869. — Текст : непосредственный.

71. Vasilyev, F. V. Development of the digital site for chemical processes in the manufacturing of printed circuit boards / F. V. Vasilyev, A. M. Medvedev, F. A. Barakovsky, M. A. Korobkov // *Inventions*. — 2021. — Vol. 6, No. 3. — 48. — DOI 10.3390/inventions6030048. — Текст : непосредственный.

72. Walker, J. C. Tribological behaviour of an electrochemical jet machined textured Al—Si automotive cylinder liner material / J. C. Walker, T. J. Kamps, J. W. Lam, J. Mitchell-Smith, A. T. Clare // *Wear*. — 2017. — Vol. 376—377. — P. 1611—1621. — Текст : непосредственный.

73. Wei, W. Additive manufacturing of three-dimensional intricate microfeatures by electrolyte-column localized electrochemical deposition / W. Wei, M. Pingmei, Z.

Xinmin, L. Xinchao, Z. Yunyan, N. Shen, A. Sansan // Additive Manufacturing. — 2022. — Vol. 50. — 102582. — Текст : непосредственный.

74. Wu, M. Fabrication of surface microstructures by mask electrolyte jet machining / M. Wu, J. Liu, J. He, X. Chen, Z. Guo // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2020. — Vol. 148. — 103471. — Текст : непосредственный.

75. Yu, Y. Q. Experimental study of pulsed electrolyte jet machining for small hole / Y. Q. Yu, J. S. Zhao, B. H. Li, J. W. Xu // Key Engineering Materials. — 2010. — Vol. 458. — P. 307—312. — Текст : непосредственный.

76. Zhao, J. Investigation on electrolyte jet machining of three-dimensional freeform surfaces / J. Zhao, M. Kunieda // Precision Engineering. — 2019. — Vol. 60. — P. 42—53. — Текст : непосредственный.

77. Zhao, K. Preparation and properties of nanocomposite coatings by pulsed current-jet electrodeposition / K. Zhao, L. Shen, M. Qiu, Z.-j. Tian, W. Jiang // International Journal of Electrochemical Science. — 2017. — Vol. 12, No. 9. — P. 8578—8590. — Текст : непосредственный.

78. Zuckerman, N. Jet impingement heat transfer: physics, correlations, and numerical modeling / N. Zuckerman, N. Lior // Advances in Heat Transfer. — 2006. — Vol. 39. — P. 565—631. — DOI 10.1016/S0065-2717(06)39006-5. — Текст : непосредственный.

79. Графитовая токопроводящая краска для гальваники. — URL: <https://fractalpaint.com/product/kraska-tokoprovodyaschaya-dlya-galvaniki> (дата обращения: 27.05.2025). — Текст : электронный.

80. Области применения проводящих полимеров в электронике. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/oblasti-primeneniya-provodyaschih-polimerov-v-elektronike/viewer> (дата обращения: 27.05.2025). — Текст : электронный.

81. Руководство по выбору фильтров / 3М. — URL: <https://multimedia.3m.com/mws/media/1725386O/filter-selection-guide.pdf> (дата обращения: 27.05.2025). — Текст : электронный.

82. Тринатрийфосфат / Воскресенский завод фосфорных кислот. — URL: <https://tdofk.ru/catalog/trinatriyfosfat> (дата обращения: 27.05.2025). — Текст : электронный.

83. Электрохимическое меднение / МеталлЭнергоХолдинг. — URL: <https://metatorg.ru/shop/uslugi/pokrytie-metalla/elektrohimicheskoe-mednenie/> (дата обращения: 27.05.2025). — Текст : электронный.

84. COMPACTA 30 : инструкция по эксплуатации / Bungard Elektronik GmbH & Co. KG. — Виндек, Германия, 2022. — 8 с. — URL: https://hitec-ams.com/wp-content/uploads/2022/11/compacta_30_manual_e.pdf (дата обращения: 27.05.2025). — Текст : электронный.

85. Zhao, Y. Process localization at the electrolyte jet machining for additive manufacturing / Y. Zhao, H. Fan // International Journal of Electrochemical Science. — 2020. — Vol. 15, № 12. — P. 12491—12503. — DOI 10.20964/2020.12.61. — Текст : электронный.

86. Kim, H. Fabrication of micro pattern through analysis of contact area of the jet-circulating electrodeposition / H. Kim, C. N. Chu // Journal of the Korean Society for Precision Engineering. — 2019. — Vol. 36, № 6. — P. 523—529. — DOI 10.7736/KSPE.2019.36.6.523. — Текст : непосредственный.

87. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. — 2-е изд., доп. и перераб. — Москва : Физматгиз, 1959. — 699 с. — Текст : непосредственный.

88. Newman, J. Electrochemical Systems / J. Newman, K. E. Thomas-Alyea. — 3rd ed. — Hoboken : John Wiley & Sons, 2004. — 647 p. — Текст : непосредственный.

89. Kessler, T. A model for copper electroplating of multilayer printed wiring boards / T. Kessler, R. Alkire // Journal of The Electrochemical Society. — 1976. — Vol. 123, № 7. — P. 990—999. — Текст : непосредственный.

90. Engelmaier, W. Investigation of agitation effects on electroplated copper in multilayer board plated-through holes in a forced-flow plating cell / W. Engelmaier, T. Kessler // Journal of The Electrochemical Society. — 1978. — Vol. 125, № 1. — P. 36—43. — DOI 10.1149/1.2131394. — Текст : непосредственный.

91. Alkire, R. C. The effect of an impinging fluid jet on mass transfer and current distribution in a circular through-hole / R. C. Alkire, J.-B. Ju // *Journal of The Electrochemical Society*. — 1987. — Vol. 134, № 5. — P. 1172—1180. — DOI 10.1149/1.2100637. — Текст : непосредственный.

92. Lanzi, O. Analysis of mass transport and ohmic limitations in through-hole plating / O. Lanzi, U. Landau // *Journal of The Electrochemical Society*. — 1988. — Vol. 135, № 8. — P. 1922—1930. — Текст : непосредственный.

93. Изотов, С. А. Интенсификация процесса электрохимической металлизации отверстий печатных плат : специальность 05.17.03 : автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук / Изотов Сергей Александрович. — Москва : МХТИ им. Д. И. Менделеева, 1992. — Текст : непосредственный.

94. Li, Y. Fabricating high aspect ratio amorphous alloys microgrooves by using periodically thinning jet electrochemical milling method / Y. Li, P. Ming, D. Li, R. Zhao, S. Niu // *Micromachines*. — 2025. — Vol. 16, № 9. — Art. 979. — DOI 10.3390/mi16090979. — Текст : электронный.

95. Chen, M. High Schmidt mass transfer in a laminar impinging slot jet flow / M. Chen, R. Chalupa, A. C. West, V. Modi // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2000. — Vol. 43, № 21. — P. 3907—3915. — DOI 10.1016/S0017-9310(00)00052-1. — Текст : непосредственный.

96. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг ; пер. с нем. — Москва : Наука, 1974. — 712 с. — Текст : непосредственный.

97. Karnik, M. Fused deposition process combining electrochemical discharge with high speed selective jet electrodeposition / M. Karnik, A. Ghosh, R. Shekhar // *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. — 2009. — Vol. 87, № 5. — P. 264—271. — DOI 10.1179/174591909X438839. — Текст : непосредственный.

98. Arshad, M. H. Electrochemical hybrid additive and subtractive micro-manufacturing on a low cost desktop 3D printer / M. H. Arshad, K. K. Saxena, J. Qian, D. Reynaerts // *Proceedings of the 22nd International Conference of the European Society*

for Precision Engineering and Nanotechnology (euspen), Geneva, 2022. — Текст : непосредственный.

99. Wagner, C. Theoretical analysis of the current density distribution in electrolytic cells / C. Wagner // Journal of the Electrochemical Society. — 1951. — Vol. 98, № 3. — P. 116—128. — Текст : непосредственный.