

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АВТОМАТИКИ ИМ. Н.Л. ДУХОВА»
(ФГУП «ВНИИА»)**

УТВЕРЖДАЮ



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н. Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА») на диссертационную работу Бардиной Ольги Игоревны «Модификация медной поверхности с целью увеличения адгезии внутренних слоев и функциональных покрытий печатных плат», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальностям 2.6.17 – Материаловедение и 2.6.9 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии

Надежность многослойных печатных плат (МПП) зависит от прочности сцепления медной поверхности электролитической медной фольги или токопроводящего рисунка внутренних и внешних слоев с диэлектрическими материалами, такими как препрег (слой эпоксидной смолы, армированной каркасом из стекловолокон), фоторезист и паяльная маска.

В производстве МПП для обеспечения надежного сцепления медной поверхности с указанными материалами на медной поверхности формируют адгезионный слой за счет микротравления медной поверхности с образованием шероховатого слоя, который обеспечивает сцепление слоев не только за счет увеличения площади поверхности контакта (перед нанесением светочувствительных материалов), но и за счет химических связей с полимерным связующим препрега (перед прессованием внутренних слоев).

Традиционные технологии подготовки внутренних слоев МПП к прессованию, заключающиеся в формировании шероховатого адгезионного слоя методом микротравления, не подходят для печатных плат, использующихся в высокочастотной (СВЧ) электронике. Это связано с проявлением скин-эффекта, при котором электрический сигнал распространяется в тонком поверхностном слое проводника. Шероховатость поверхности, формирующаяся при микротравлении, увеличивает путь прохождения тока, приводя к существенным потерям мощности СВЧ-устройств.

В связи с отсутствием отечественных технологий, отвечающих требованиям по адгезии, шероховатости, коррозионной стойкости и стабильности технологических процессов, российские производители печатных плат (ПП) вынуждены использовать зарубежные технологии и композиции для их реализации.

С учетом вышеизложенного разработка технологий модификации медной поверхности с целью увеличения адгезии к неметаллическим слоям и покрытиям является весьма *актуальной научно-технической задачей*, решению которой посвящена настоящая диссертационная работа.

Диссертационная работа состоит из: введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованной литературы и трех приложений.

По содержанию и структуре диссертационная работа полностью отвечает требованиям к научно-квалификационной работе на соискание ученой степени кандидата технических наук по заявленным специальностям.

Работа изложена на 173 страницах печатного текста, содержит 16 таблиц и 96 рисунков. Список литературы содержит 143 источника. К работе прилагаются технологические инструкции (ТИ) на изготовление и технические условия (ТУ) на разработанные композиции, а также акт проведения промышленных испытаний на производстве печатных плат АО «НИЦЭВТ».

Анализ работы по главам

Во введении к диссертационной работе описаны цели и задачи работы, обоснована актуальность работы, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Формулировки всех структурных элементов введения являются корректными и полностью соответствуют поставленным научным задачам.

Аналитический обзор литературы, представленный в первой главе диссертационной работы, выполнен на высоком научном уровне. Текст отличается лаконичностью, смысловой точностью и выдержан в строгом научно-техническом стиле, а его оформление полностью

соответствует общепринятым требованиям к научным работам. Во вводных разделах приведены сведения о производстве ПП, включая классификацию ПП, основные материалы и ключевые технологические процессы их производства. Основная часть обзора посвящена детальному анализу способов формирования адгезионного слоя на медной поверхности.

Во второй главе представлена методика исследования, включающая современные способы анализа толщины, морфологии, структуры и состава формируемых покрытий. Для оценки их функциональных свойств автором обоснованно выбраны такие ключевые критерии, как прочность сцепления, коррозионная стойкость и устойчивость к осыпанию адгезионного слоя. Экспериментальная часть работы выполнена с применением современного оборудования.

Примененный комплекс методов обеспечил достоверность и воспроизводимость результатов исследований.

В третьей главе описаны объекты исследований, приведены и обсуждены результаты экспериментов. Описаны установленные закономерности микротравления и формирования адгезионного слоя, в т.ч. зависимости функциональных характеристик адгезионного слоя от составов модифицирующих растворов и режимных параметров процесса.

Четвертая глава диссертации посвящена разработке технологических процессов подготовки поверхности меди с целью обеспечения адгезии внутренних слоев МПП, а также полимерных функциональных покрытий ПП.

Определены рабочие диапазоны концентраций разработанных композиций, а также режимных параметров для каждой из стадий подготовки поверхности меди перед прессованием и нанесением фоточувствительных полимерных пленок. Разработаны и протестированы режимы корректировки рабочих растворов для подготовки внутренних слоев МПП к прессованию (композиции УМ-А) и подготовки поверхности фольгированного диэлектрика к нанесению фоторезиста и паяльной маски (композиции УМ-Ф) в процессе их эксплуатации с использованием в качестве корректирующих растворов соответствующих концентратов.

Приводится перечень утвержденной научно-технической документации: Технические условия (ТУ), технологические инструкции (ТИ) на изготовление, технологические инструкции на применение 7 разработанных композиций.

В *заключении* представлены основные выводы из работы. Диссертация написана понятным научным языком, логично изложена и является самодостаточным, завершенным трудом.

Материалы, представленные в диссертации, опубликованы в 10 печатных работах, включая 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных научного

цитирования Scopus, Web of Science и Chemical Abstracts; работа хорошо апробирована и представлена на 7 международных и всероссийских конференциях и съездах. Опубликованные работы подтверждают новизну и обоснованность выводов и свидетельствуют о признании работы научным сообществом. Содержание диссертационной работы подробно отражено в автореферате.

Проведенные Бардиной О.И. исследования позволили получить результаты, составляющие *научную новизну работы*. Впервые показано, что добавление хлорид-ионов в количестве 5-500 мг/л в раствор травления меди, содержащий серную кислоту и пероксид водорода, снижает скорость травления меди в 10-15 раз, а добавление в указанный раствор бензотриазола существенно снижает ингибирующее влияние хлорид-ионов на процесс растворения меди, что может быть использовано для регулирования шероховатости адгезионного слоя с целью обеспечения максимальной прочности сцепления поверхности меди с диэлектриком при минимальной скорости её травления.

Впервые комплексом методов (РФЭС, ПЭМ) экспериментально доказано формирование металлоорганического слоя на поверхности меди в ходе ее обработки в разработанном растворе. Установлено, что одновременно с формированием микрорельефа на медной поверхности формируется химически связанный слой толщиной 20-30 нм на основе соединений меди, углерода и азота, что указывает на его органическую природу и ключевую роль бензотриазола в его формировании.

Практическая значимость работы заключается в разработке и научном обосновании готовых к внедрению технологий модификации медной поверхности для критически важных этапов производства печатных плат, включая подготовку внутренних слоев многослойных печатных плат (МПП) и высокочастотных (СВЧ) плат перед прессованием, а также поверхности перед нанесением функциональных покрытий – фоторезиста и паяльной маски. Разработанные отечественные решения не уступают по ключевым показателям (прочность сцепления, технологичность) зарубежным аналогам, что обеспечивает импортозамещение и технологическую независимость отечественной электронной промышленности. Результаты работы ориентированы на непосредственное внедрение на ведущих предприятиях отрасли, таких как АО «НИЦЭВТ», АО «Микрон», АО «НПП «Радиосвязь», АО «Композит» и другие, что подтверждает высокий потенциал их практического применения и вклад в укрепление технологического суверенитета страны.

Достоверность и обоснованность защищаемых научных положений и выводов подтверждается достаточным объемом и результатами экспериментальных исследований, использованием современного лабораторного и аналитического оборудования.

Диссертация соответствует паспортам специальности 2.6.17 – Материаловедение в пунктах: (11). Разработка функциональных покрытий различного назначения методов управления их свойствами и качеством; (12). Разработка физико-химических процессов получения функциональных покрытий на основе новых металлических, неметаллических и композиционных материалов. Установление закономерной влияния состава, структуры, технологии, а также эксплуатационных и других факторов на свойства функциональных покрытий; и 2.6.9 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии в пункте (3) Электрохимические, химические, физические и комбинированные методы обработки поверхности материалов и нанесения покрытий. Гальванопластика и гальванистегия.

По диссертационной работе необходимо сделать следующие **замечания**:

1. При описании метода нормального отрыва не указан материал «грибков» и способ подготовки их поверхности, обеспечивающий более высокую адгезию поверхности грибка с эпоксидной смолой ЭД-16 по сравнению с адгезией светочувствительного материала к медной поверхности (с. 68-69).

2. В работе не приведено сравнение скоростей травления меди в разработанных модифицирующих растворах и в растворах зарубежных аналогов для процессов подготовки перед нанесением светочувствительных полимеров (раздел 3.1.5).

3. Отсутствуют данные о влиянии продолжительности обработки на функциональные характеристики поверхностей, формируемых перед нанесением светочувствительных полимеров (раздел 3.1.5).

Приведенные вопросы и замечания носят дискуссионный характер; они не портят хорошего впечатления от работы, не снижают ценность полученных результатов и не затрагивают основные результаты работы.

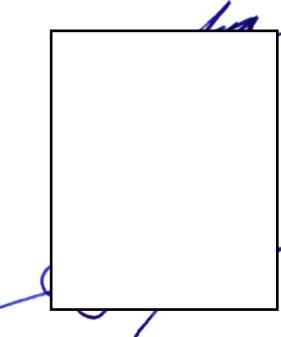
Выводы диссертационной работы достоверны, подтверждены полученными экспериментальными данными и не вызывают сомнений.

Диссертация О.И. Бардиной отвечает требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденного приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103 ОД, а ее автор, *Бардина Ольга Игоревна*, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальностям 2.6.17 – Материаловедение и 2.6.9 – Технология электрохимических процессов и защита от коррозии.

Отзыв подготовила старший научный сотрудник отделения материаловедения, к.х.н.
Павлова Н.В.

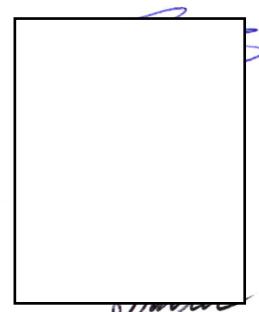
Диссертационная работа Бардиной Ольги Игоревны рассмотрена и обсуждена на заседании научно-технического совещания отделения материаловедения ФГУП «ВНИИА» имени Н.Л. Духова, протокол заседания №Т0075/297-2025 от «26» ноября 2025 г.

Научный руководитель ФГУП «ВНИИА»
д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН



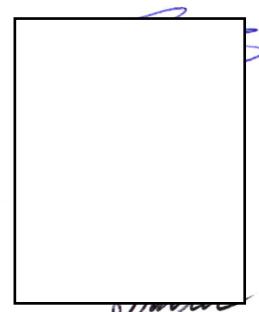
A.B. Андриаш

Заместитель главного конструктора –
начальник отделения материаловедения,
д.т.н., с.н.с.



A.B. Соковишин

Заместитель начальника отделения материаловедения –
начальник научно-технического отдела,
к.х.н.



С.А. Федотов

Старший научный сотрудник
отделения материаловедения ,
к.х.н.



Н.В. Павлова

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова» (ВНИИА). Российская Федерация, 127030, г. Москва, Сущевская улица, 22.

Телефон: 7(499)978-78-03

Электронная почта: vniia@vniia.ru