

ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВОК ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ НА ОСНОВЕ 3D-ПЕЧАТИ

Паршев В.В., Холод П.В.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Аннотация. Разработан метод изготовления заготовок под печатные платы с использованием 3D печати с последующим нанесением проводящего слоя. Данный метод позволит создавать печатные платы любой кривизны.

Ключевые слова: гальваническое покрытие, 3D-моделирование, FDM-технология, заготовка на основе 3D печати, токопроводящий слой, SolidWorks, электролит.

В рамках научно-практической деятельности стоит задача разработать собственные платы драйвера векторного управления BLDC мотором (далее FOC-платы) и платы датчика тока (далее ТОК-платы). При этом стандартная технология непромышленного производства печатных плат [1] предполагает использование листов текстолита [3], что имеет недостаток в ограниченности возможных форм печатных плат, и сложности вырезки нужной формы из листа, включая проблемы с безопасностью на данном этапе.

Использование 3D-печати для изготовления заготовок под печатные платы в настоящее время является активно развивающейся областью, которая предлагает новые возможности для быстрого прототипирования и создания плат нестандартной формы. В статье рассматривается изготовление диэлектрической основы (подложки) с последующим нанесением проводящего слоя.

Цель: используя 3D-печать и гальваническое покрытие (гальванику), научиться создавать заготовки под печатные платы, что за счёт 3D-печати должно позволить создавать печатные платы любой кривизны.

Этапы создания подложки включают: 3D-моделирование, 3D-печать, нанесение токопроводящего слоя и гальванику.

На первом этапе выполняется чертёж контура платы с отверстиями под компоненты и сохраняется в векторном формате .dxf. Далее он импортируется в SolidWorks, где он преобразуется в трёхмерную заготовку, при этом вокруг добавляются элементы для крепления платы и подключения к ней катода с зажимом типа «крокодил» (рисунок 1).

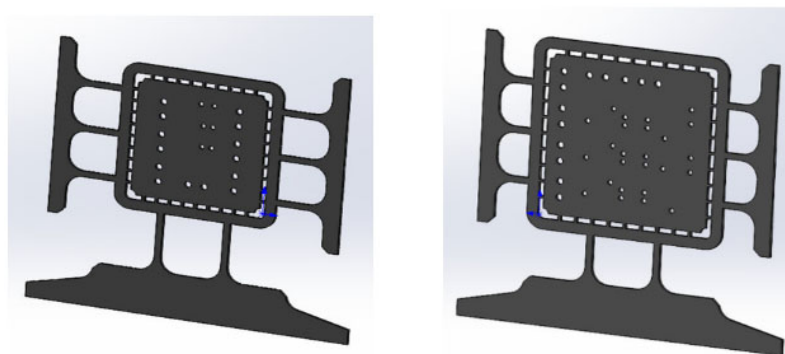


Рисунок 1 – 3D-модель подложки с двух сторон

После, отсекая все участки, где не будет нанесен токопроводящий слой, рассчитывается площадь (рисунок 2).

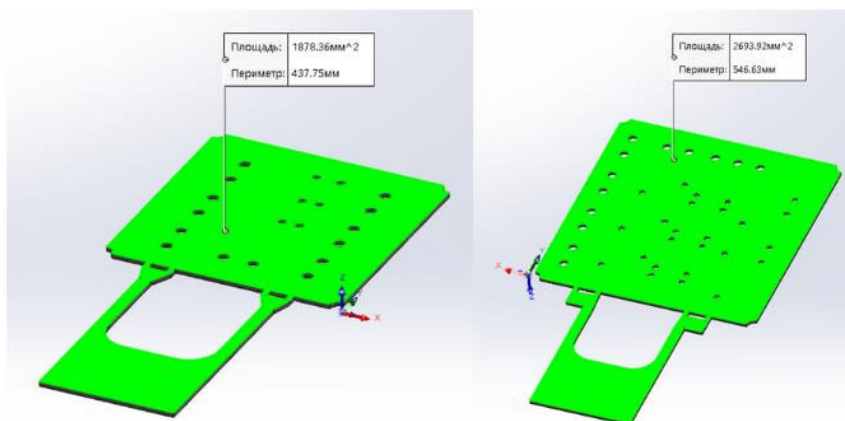


Рисунок 2 – Расчет площади токопроводящего слоя

Полученные результаты переводятся в дм^2 , т.к. плотность тока зачастую считается в А/дм^2 .

Далее выполняется печать нескольких тестовых образцов на 3D-принтере (рисунок 3).

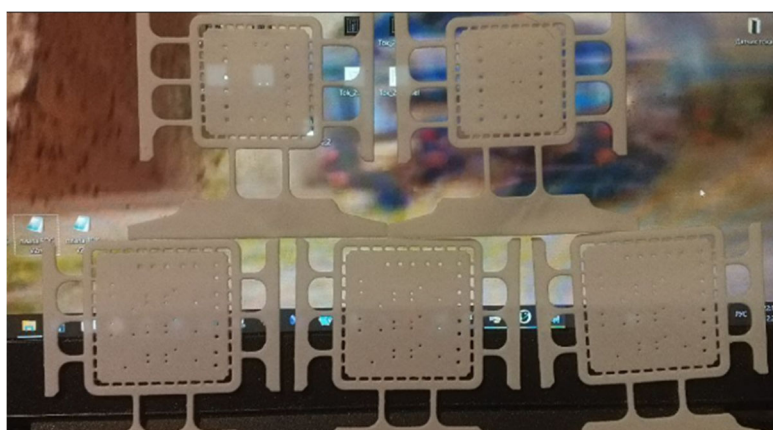


Рисунок 3 – Напечатанные подложки

Затем медная пудра смешивается с цапонлаком в соотношении 1:1 [2] и кистью наносится на напечатанные ранее поверхности (рисунок 4).

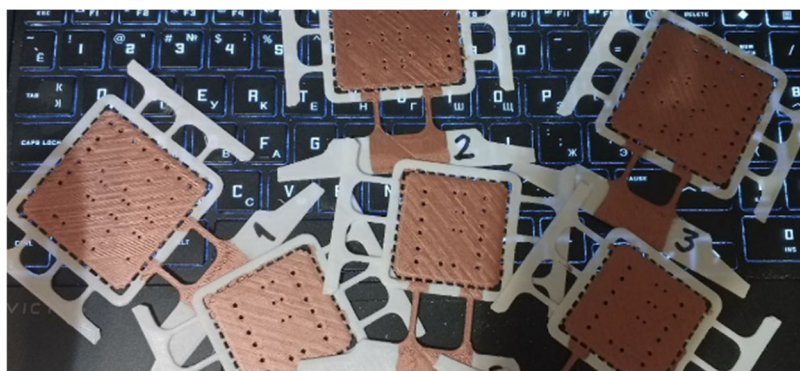


Рисунок 4 – Подложки с нанесённым токопроводящим слоем

Далее производится измерение массы каждой подложки (рисунок 5).

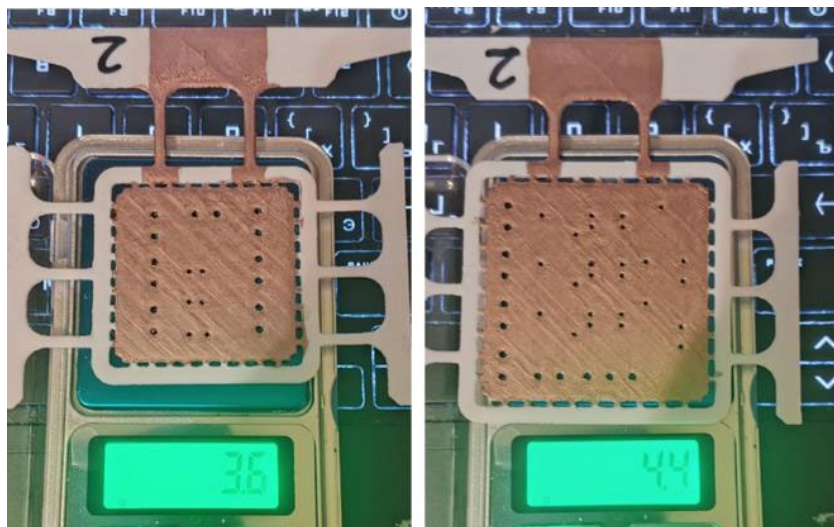


Рисунок 5 – Измерение массы подложек

Результаты этого и всех дальнейших измерений отображены в таблицах 1 и 2.

Далее подготавливается гальваническая ванна [4]: на 1 лист кипяченого дистиллята для матового покрытия нужно смешать 200 г медного купороса (CuSO_4), серную кислоту 150 мл при плотности 1.34 г/см^3 (H_2SO_4), 1 мл спирта 90 градусов ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) и 1 г желатина. Данный раствор подходит для гальванического покрытия при комнатной температуре (20 градусов).

Затем подготавливается ванна, размещаются медные пластины и заготовка, медные пластины подключаются к “+”, а заготовка к “-” (рисунок 6).

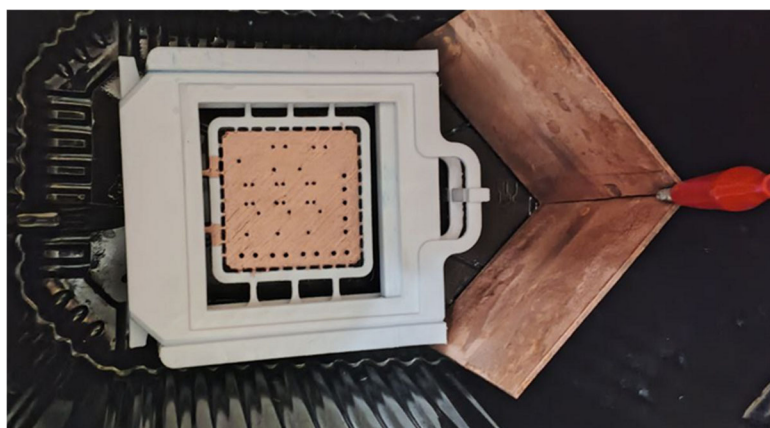


Рисунок 6 – Подготовка гальванической ванны

Заливается электролит и выставляются параметры лабораторного источника питания (ЛБП). Эмпирическим путём получено оптимальное значение плотности тока $j = 2 \text{ А/дм}^2$, от которого путём умножения на площадь токопроводящей поверхности вычисляется необходимый ток ЛБП. Например, для площади платы ТОК 0.39 дм^2 сила тока будет равна 0.78 А . (рисунок 7).

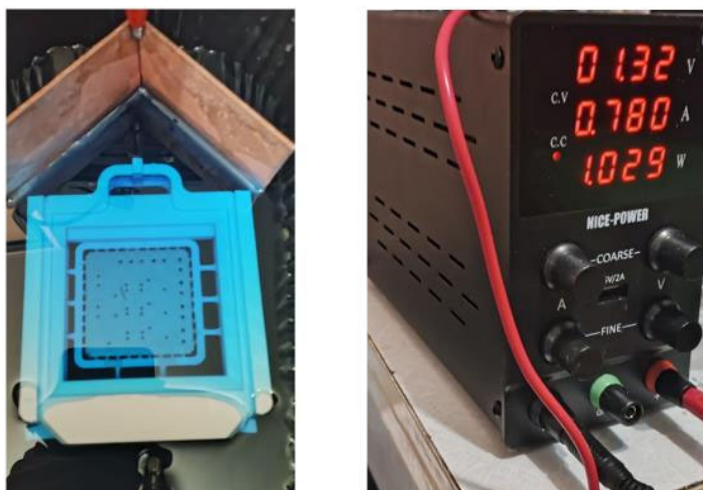


Рисунок 7 – Запуск гальванического покрытия

В результате получается матовое медное покрытие некоторой толщины, которая будет определена далее (рисунок 8).



Рисунок 8 – Результат гальванического покрытия

Далее производится измерение массы полученных пластин (рисунок 9).

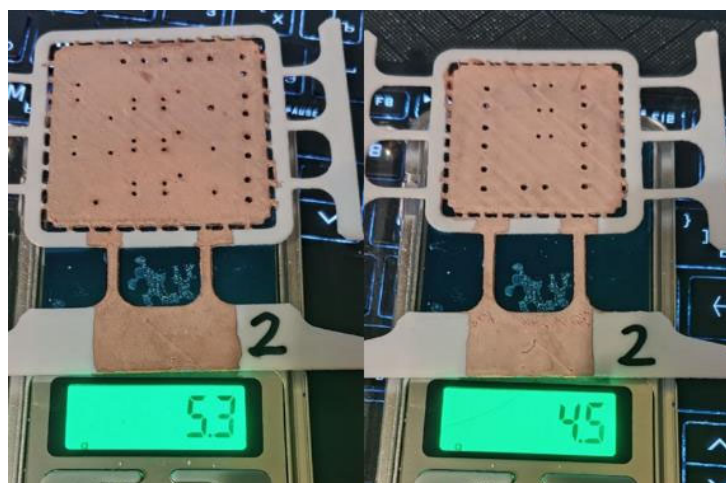


Рисунок 9 – Измерение массы после гальваники

Расчёт толщины полученного медного слоя в мкм производится по формуле 1:

$$h = \frac{(m_{Cu} - m_{кр}) * 10^2}{\rho * S}, \quad (1)$$

где m_{Cu} – масса пластины после гальваники, г;

$m_{кр}$ – масса пластины с нанесенным токопроводящим слоем, г;

ρ – плотность меди, 8.96 г/см³;

S – площадь покрываемой поверхности, дм².

Расчёт скорости гальваники в мкм/мин производится по формуле 2:

$$v = \frac{h}{t}, \quad (2)$$

где h – толщина медного слоя, мкм;

t – время процесса гальванического покрытия, мин.

В таблицах 1 и 2 отображены основные параметры и все ранее проделанные измерения для выборок из нескольких образцов полученных заготовок печатных плат.

В таблице 1 представлены результаты измерений и расчётов для ФОС-плат.

Таблица 1 – Результаты измерения ФОС-плат

Номер образца	1	2	3	5	8	10
Состояние платы перед гальваникой	Отличное	Отличное	Нейтральное	Плохое	Нейтральное	Плохое
j , Плотность тока А/дм ²	2	1,4	3,33	2	4	2
Масса исходной подложки, г	4,2	4,3	4,2	4,2	4,3	4,2
Масса платы, покрытой токопроводящим слоем, г	4,4	4,4	4,4	4,3	4,4	4,4
Платы после гальваники, г	6,3	5,3	6,4	6,9	6,7	5,6
t , Время гальваники, мин	92	64	60	120	60	60
h , Толщина покрытия, мкм	37,9	17,9	39,9	51,8	45,8	23,9
$U = h/t$, Скорость гальваники, мкм/мин	0,41	0,28	0,66	0,43	0,76	0,40

В таблице 2 представлены результаты измерений и расчётов для ТОК-плат.

Таблица 2 – Результаты измерения ТОК-плат

Номер образца	1	2	7	9	10
Состояние платы перед гальваникой	Отличное	Отличное	Нейтральное	Плохое	Нейтральное
j, Плотность тока, А/дм ²	2	2	2	2	2
Масса исходной подложки, г	3,5	3,5	3,5	3,5	3,6
Масса платы, покрытая токопроводящим слоем, г	3,6	3,6	3,6	3,6	3,7
Платы после гальваники, г	4,9	4,5	4,5	4,5	4,6
t, Время гальваники, мин	92	64	64	64	64
h, Толщина покрытия, мкм	25,9	17,9	17,9	17,9	17,9
$\vartheta = h/t$ Скорость гальваники, мкм/мин	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28

Расчёт удельной скорости гальваники производится по формуле 3:

$$\vartheta' = \frac{\vartheta}{j} \quad (3)$$

Полученные расчётом значения представлены в таблице 3:

Таблица 3 – Результаты измерения и усредненные значения

Показатель	Значения для платы ФОС	Значения для платы ТОК	Единица измерения
Площадь	0,56	0,39	дм ²
Рекомендуемая плотность тока	1,4	2	А/дм ²
Масса пластины	4,24	3,49	г
Масса с краской	4,38	3,6	г
Масса наращенной меди	21,4	18,4	мг/(мин*А)
Удельная скорость гальваники	0,2		дм ² *мкм/(мин*А)

Во время процесса гальванического покрытия происходит постепенное изменение напряжения источника питания при неизменном токе. Для представления этой зависимости строится график зависимости напряжения на клеммах ЛБП с ходом времени в первые 5 минут (рисунок 10).

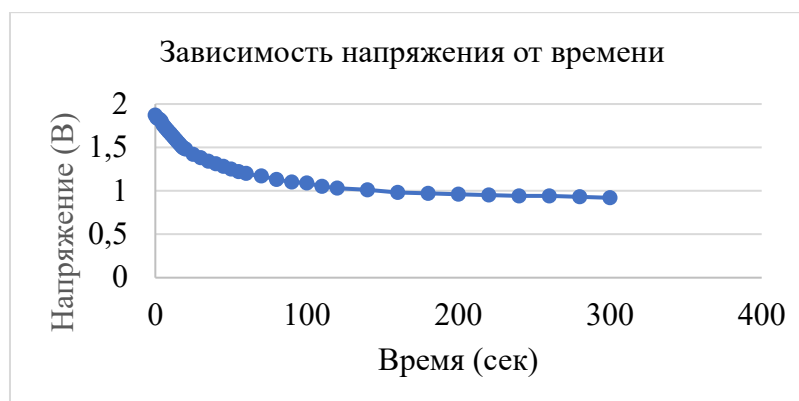


Рисунок 10 – График зависимости напряжения от времени

Как видно из графика, для пластины с плотностью тока 2 А/дм^2 в первые 20 секунд процесс линейный и напряжение падает, что говорит о быстром нарастании медного слоя поверх токопроводящего, следующие 2 минуты с момента начала гальванизации процесс плавно переходит со стремительного нарастания к статичной скорости нарастания меди.

По результатам гальванизации на аноде (медных пластинах) нарастают кристаллы медного купороса, что загрязняют поверхность и увеличивают сопротивление, что увеличивает напряжение гальванизации (рисунок 11). В ходе трёх покрытий подряд при одинаковой плотности тока (2 А/дм^2), одном времени гальванизации (64 минуты) для нанесения 18 мкм слоя меди на одинаковые подложки по показаниям напряжения на ЛБП в конце гальванизации получаем следующие данные:

Конец первой гальванизации $U_1 = 0,88 \text{ В}$

Конец второй гальванизации $U_2 = 0,91 \text{ В}$

Конец третьей гальванизации $U_3 = 0,91 \text{ В}$

Отсюда получается первый прирост сопротивления:

$$(U_2/U_1 - 1) * 100\% = (0,91/0,88 - 1) * 100\% = 3,4\%$$

Второй прирост в связи с равными значениями показателей рассматривается с дискретностью ЛБП, равной 0.01 В.

$$(0.01/U_3) * 100\% = 1.1\%$$

Получается, что сопротивление после первой гальванизации возросло на 3.4%, а после второй гальванизации возросло менее чем на 1.1%.



Рисунок 11 – Нарощенные кристаллы

Вывод: данный метод позволяет быстро и безопасно прототипировать заготовки под печатные платы в домашних условиях, т.к. не содержит в процессе опасных веществ, таких как стеклотекстолитовая пыль при резке, а также заготовка печатается сразу с посадочными отверстиями, что увеличивает точность и не требует дополнительного сверления.

Список использованных источников

1. Технология изготовления печатных плат: [учеб. пособие] / Л. А. Брусницына, Е. И. Степановских; [науч. ред. В. Ф. Марков]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. — 200 с.
2. Бронзовая и медная пудра – URL: <https://funchrome.ru/bronzovaya-i-mednaya-pudra/> (дата обращения: 05.12.2025)

3. Как и чем резать стеклотекстолит в домашних условиях: резка – URL: <https://msel.ru/articles/kak-i-chem-razrezat-steklotekstolit-doma/> (дата обращения: 05.12.2025)
4. Гальваника: рецепты электролитов. Часть 1 – URL: <https://www.livemaster.by/topic/1722193-article-galvanika-retsepty-elektrolitov-chast-1> (дата обращения: 05.12.2025)

ОПТИЧЕСКОЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ: АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ, ОГРАНИЧЕНИЙ И ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ

Шорохов А.С.

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Москва

***Аннотация.** В статье анализируются возможности оптического измерительного оборудования в современной промышленности. Рассмотрены основные сферы его применения, а также проведено сравнение с механическими, ручными и лазерными методами измерения по ключевым критериям — точности, скорости, стоимости и потенциалу автоматизации. Отмечены ограничения, обусловленные оптическими свойствами поверхности (блеск, прозрачность, поглощение света), и предложены способы их преодоления, в частности применение матирующих спреев. Обозначены перспективы развития: интеграция с технологиями искусственного интеллекта, миниатюризация сенсоров, расширение доступности для малого и среднего бизнеса, а также использование в рамках концепции цифровых двойников. В результате сделан вывод о том, что при грамотном внедрении оптические измерительные системы становятся неотъемлемым элементом интеллектуальной производственной экосистемы.*

***Ключевые слова:** оптическое измерение; система технического зрения; машинное обучение; бесконтактный контроль; геометрические параметры; качество продукции; цифровизация производства; матирующий спрей; 3D-сканирование; цифровой двойник*

В нынешней ситуации улучшение точности и скорости контроля размеров продукции становится очень важным для конкурентоспособности предприятий. Поэтому бесконтактные способы, особенно оптические системы измерения, становятся всё популярнее. Сейчас такие системы помогают следить за окружающей обстановкой, что важно, когда мало информации об объекте. Системы технического зрения в настоящее время являются одним из главных средств развития автоматических систем управления в условиях, когда объём априорной информации не достаточен и для решения задач управления необходим анализ внешней обстановки в режиме реального времени [1].

Оптическое измерительное оборудование в основном применяют в машиностроении, авиации, космосе, микроэлектронике, автомобильном производстве, медицине и фармацевтике. В металлургии и производстве труб оптические сканеры измеряют диаметр и форму труб в реальном времени. В авиации они проверяют аэродинамические поверхности с высокой точностью. В микроэлектронике анализируют проводники и дефекты пайки, где обычные