

**METALLIZATION OF 3D-PRINTED PLASTIC SHEETS
BY MAGNETRON SPUTTERING**

Vyacheslav Arkadyevich Semenov^{1a}, *Sergey Viktorovich Rabotkin*¹,
*Alexander Sergeevich Grenadyorov*¹, *Andrey Alexandrovich Solovyev*¹,
*Nikita Sergeevich Berdnikov*², *Mikhail Viktorovich Shevelev*², *Dmitry Andreevich Shkitov*²

¹ Institute of High Current Electronics SB RAS, Akademicheskii pr. 2/3, 634055, Tomsk, Russia

² Tomsk Polytechnic University, Lenin pr. 30, 634050, Tomsk, Russia

^a semenofvjacheslav@gmail.com

ABSTRACT

The metallisation of 3D printed plastic products can greatly simplify and reduce the cost of manufacturing some complex shaped products that have previously been made from metals or alloys. Magnetron sputtering metallisation of products has a number of advantages over the widely used electrochemical deposition method. Experiments have been carried out to deposit Cu coatings up to 10 µm thick on 3D printed sheets of PLA, ABS, PETG and HIPS plastics. It is shown that the 150×150×2 mm ABS and HIPS sheets have sufficient heat resistance and do not deform as a result of heating and residual stresses generated during the deposition of Cu coatings. The morphology and surface roughness of the Cu coatings were examined by scanning electron microscopy. The adhesion of the coatings was evaluated according to ASTM D 3359 – 09. It is shown that magnetron sputtering can be successfully used to metallise ABS and HIPS plastic products.

KEYWORDS

3D printing; plastics; metallization; magnetron sputtering; Cu coatings.

**МЕТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПЛАСТИН
ИЗ ПЛАСТИКА, ИЗГОТОВЛЕННЫХ НА 3D-ПРИНТЕРЕ**

Вячеслав Аркадьевич Семенов^{1a}, *Сергей Викторович Работкин*¹,
*Александр Сергеевич Гренадеров*¹, *Андрей Александрович Соловьев*¹,
*Никита Сергеевич Бердников*², *Михаил Викторович Шевелёв*², *Дмитрий Андреевич Шкитов*²

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, Томск, Академический пр., 2/3

² Томский политехнический университет, Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30

^a semenofvjacheslav@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Металлизация пластиковых изделий, изготовленных методом 3D печати, может значительно упростить и удешевить технологию изготовления некоторых изделий сложной формы, которые ранее изготавливались из металлов или сплавов. Металлизация изделий методом магнетрон-

ного распыления имеет ряд преимуществ по сравнению с широко распространенным методом электрохимического осаждения, главным из которых является экологичность. Проведены эксперименты по осаждению Cu покрытий толщиной до 10 мкм на пластины, изготовленные 3D печатью из PLA, ABS, PETG и HIPS пластика. Показано, что пластины из ABS и HIPS размером 150×150×2 мм обладают достаточной теплостойкостью и не изменяют своей формы в результате нагрева и остаточных напряжений, которые возникают в процессе осаждения Cu покрытий. Морфология и шероховатость поверхности Cu покрытий исследованы методом сканирующей электронной микроскопии. Адгезия покрытий оценена согласно стандарту ASTM D 3359 – 09. Показано, что метод магнетронного распыления можно успешно использовать для металлизации изделий из ABS и HIPS пластика.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

3D печать; пластики; металлизация; магнетронное распыление; Cu покрытия.

Введение

В последние годы, достигнут значительный прогресс в развитии методов быстрого прототипирования, особенно технологий 3D печати. Металлизация поверхности напечатанных компонентов позволяет заменить чисто металлические элементы, изготовленные традиционными методами. Кроме того, металлизация изделий из пластика позволяет улучшить их прочность на растяжение и изгиб, повысить износостойкость, твердость поверхности, стойкость к воздействию тепла, УФ излучения и химических реагентов, обеспечить электропроводность поверхности и улучшить внешний вид изделия [1, 2].

Технологии трехмерной печати все чаще используются при создании устройств для эффективного управления и манипулирования электромагнитными волнами. Технологии 3D печати изначально применялись к радиочастотным устройствам, таким как волноводы, антенны, фильтры и так далее. Теперь технологии 3D печати могут создавать компоненты в качестве недорогих и легких альтернатив в миллиметровом и терагерцовом диапазонах [3]. Изготовление винтовых и спиральных антенн с помощью 3D печати было продемонстрировано в [4, 5].

Основными методами металлизации, которые используются в настоящее время, яв-

ляются электроосаждение [6], химическое осаждение [7], термическое распыление [8] и физическое осаждение из газовой фазы (PVD) [9]. Электроосаждение и химическое осаждение используют токсичные жидкости и требуют нескольких сложных стадий. Поэтому наиболее подходящими методами являются экологически безопасные вакуумные методы PVD, в частности, магнетронное распыление. Особенностью этого метода являются относительно низкие температуры, что предотвращает деградацию полимера, и возможность нанесения не только чистых металлов, но и металлических сплавов.

В этой работе была исследована возможность покрытия методом магнетронного распыления пластин из различных материалов для 3D печати слоем меди толщиной от 1 до 10 мкм с приемлемой адгезией металлического слоя, без плавления пластин и изменения их формы.

1. Методика исследований

Пластины толщиной 1–2 мм изготавливались из полилактида (PLA), акрилонитрил бутадиен стирола (ABS), полиэтилентерефталатгликоля (PETG) и ударопрочного полистирола (HIPS) производства компании Bestfilament (Томск). Характеристики данных материалов, взятые с сайта производителя, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики 3D пластиков**Table 1.** Characteristics of 3D plastics

Материал / Material	Температура деформации / Deformation temperature	Температура плавления / Melting temperature	Плотность / Density
Полилактид / Polylactide (PLA)	56 °С	155–170 °С	1,23–1,25 г/см ³
Акрилонитрил бутадиен стирол / Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)	78 °С	210–240 °С	1,04 г/см ³
Полиэтилентерефталатгликоль / Polyethylene terephthalate glycol (PETG)	64 °С	240 °С	>1,29 г/см ³
Ударопрочный полистирол / High impact polystyrene (HIPS)	97 °С	175–210 °С	1,05 г/см ³

Плоские пластины размером 15×15 см² были напечатаны на 3D-принтере Prusa i3 MK3S с дополнительным модулем MMU2.0 на заводской подложке. Параметры печати были следующими: толщина печатного слоя 0,2 мм, диаметр экструдера (сопла) 0,6 мм, скорость печати внутреннего заполнения 70 мм/с, коэффициент заполнения всех пластин 100%. Время печати для пластин толщиной 1 мм составило 76 минут. Масса пластин толщиной 1 мм в зависимости от материала составила 25–30 г.

Дополнительно были напечатаны плоские пластины из ABS и HIPS размером 10×10 см² на 3D-принтере 3DQuality Prism PRO на стеклянной подложке (для адгезии к подложке применялся специальный лак на основе натуральных и синтетических полимерных смол). Параметры печати были следующими: толщина печатного слоя 0,3 мм,

диаметр экструдера (сопла) 0,45 мм, температура экструдера 250 °С, скорость печати внутреннего заполнения 47 мм/с, коэффициент заполнения пластин 100%. Время печати для пластин толщиной 1 мм составило 52 минуты. Масса пластин толщиной 1 мм составила ~12 г.

Нанесение Si покрытия осуществлялось на модернизированной установке ННВ-6 с вакуумной камерой диаметром 600 мм и высотой 600 мм, оснащенной дуальной магнетронной распылительной системой с Si мишенями размером 300×100 мм и ионным источником с замкнутым дрейфом электронов (рис. 1). Нанесение осуществлялось на неподвижные образцы, расположенные на плоском подложкодержателе, который находился в центре вакуумной камеры. Расстояние от мишеней до подложек равнялось около 190 мм.

**Рис. 1.** Фото дуальной магнетронной распылительной системы и подложкодержателя**Fig. 1.** Photo of the dual magnetron sputtering system and substrate holder

Перед нанесением покрытия подложки обрабатывались пучком ионов Ag, генерируемым ионным источником с замкнутым дрейфом электронов. Напряжение и ток разряда при этом равнялись 2,5 кВ и 100 мА соответственно, а время обработки составляло 10 минут. Известно, что бомбардировка ионами Ag вызывает топографические (шероховатость) и химические изменения (образование функциональных групп на поверхности и оборванных химических связей), которые способствуют адгезии металла с полимером [10].

Нанесение Cu проводили при различном электропитании магнетронов (в импульсном режиме, в режиме постоянного тока (DC)) и различной мощности разряда, чтобы выявить режимы с минимальным тепловым воздействием на подложку. В импульсном режиме использовался источник питания магнетронов APEL-M-250DU-650 (ООО «Прикладная электроника»), а в режиме постоянного тока – источник питания APEL-M-5BP-650-2 (ООО «Прикладная электроника»). Рабочее давление Ag составляло 0,3 Па (расход Ag 60 мл/мин).

Средняя шероховатость R_a поверхности пластин до и после нанесения Cu покрытия измеряли методом оптической профилометрии (прибор MNP-2, Проектно-технологический институт научного приборостроения СО РАН, Россия).

Сканирующий электронный микроскоп QUANTA 200 3D (FEI Company, США) использовали для характеристики морфологии поверхности образцов с медным покрытием.

Стойкость медного покрытия к отделению от подложки оценивалась на основе стандарта ASTM D 3359 – 09 (Стандартные методы испытания для измерения адгезии методом клейкой ленты).

2. Результаты и их обсуждение

Отличием магнетронного распыления от термического испарения является более

высокая кинетическая энергия частиц, поступающих на подложку и формирующих покрытие [11]. Поступающие на подложку частицы передают ей импульс, что приводит к увеличению ее температуры и подвижности атомов на поверхности растущего покрытия. Для сравнения условий осаждения и прогнозирования свойств напыляемых покрытий используется такой параметр, как нормированный поток энергии на подложку [12]. Он показывает, какое количество энергии приходится на каждый осажденный атом или объем покрытия и имеет размерность эВ/атом или МДж/см³. Управлять потоком энергии на подложку можно путем изменения параметров электропитания магнетрона. Как правило, при использовании импульсного и переменного тока обеспечивается более высокий поток энергии на подложку по сравнению с DC режимом. Поток энергии на подложку возрастает при увеличении частоты и уменьшении длительности импульсов [13, 14]. Это объясняется увеличением энергии заряженных частиц в плазме, а также небольшим снижением скорости напыления в импульсных режимах, относительно режима постоянного тока [15].

Поскольку целью работы было нанесение покрытия на легкоплавкую подложку, то суммарная мощность магнетронов была ограничена значением 300–500 Вт. На рис. 2 представлены фото пластин из PLA, ABS, PETG пластика размером 50×50×1 мм с Cu покрытием. Пластины данного размера нарезались из пластин размером 15×15 см².

Покрытие наносилось в режиме импульсного магнетронного распыления (суммарная мощность разряда двух магнетронов – 500 Вт, частота следования импульсов – 50 кГц, коэффициент заполнения – 50%) и в DC режиме (суммарная мощность разряда двух магнетронов – 300 Вт). Процесс осаждения происходил непрерывно в течение указанного на рис. 2 времени.

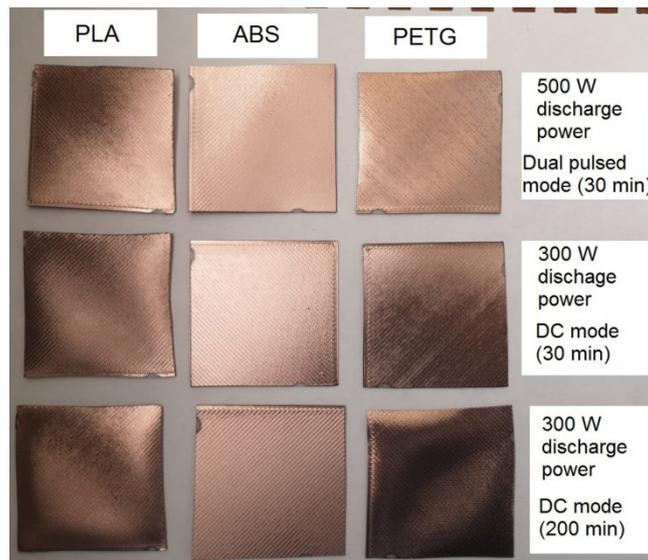


Рис. 2. Фото пластин из PLA, ABS, PETG пластика размером $50 \times 50 \times 1$ мм с Cu покрытием, нанесенным в различных режимах осаждения

Fig. 2. Photo of plates from PLA, ABS, PETG plastic (size: $50 \times 50 \times 1$ mm) with Cu coating deposited in different deposition modes

Из рис. 2 видно, что осаждение Cu покрытия в течение 30 минут в импульсном режиме распыления приводит к перегреву и короблению (изменению формы) пластин из PLA и PETG пластика. Уменьшение мощности разряда до 300 Вт и переход в DC режим приводит к тому, что в результате осаждения Cu покрытия в течение 30 минут происходит изменение формы только пластины из PLA пластика. Толщина покрытия в этом случае равна около 750 нм. При увеличении времени осаждения до 200 минут в DC режиме на подложках формируется покрытие толщиной 5 мкм. При этом происходит изменение формы пластин из PLA и PETG пластика. Таким образом, на нагрев пластин влияет не только мощность разряда, но и длительность процесса осаждения. Поскольку пластик обладает плохой теплопроводностью, в процессе распыления происходит медленный, но непрерывный нагрев подложек до температуры, превышающей температуру деформации (размягчения). Тем не менее, подложки из ABS пластика, который имеет более высокую температуру размягчения (табл. 1), не претерпевают изменения формы вследствие нагрева даже при нанесении

толстого (5 мкм) Cu покрытия. Аналогичный результат был получен и для пластин из HIPS пластика, который имеет максимальную температуру размягчения из исследуемых материалов. Поэтому дальнейшие эксперименты проводились для пластин из ABS и HIPS пластика, на которые Cu покрытие наносилось в DC режиме распыления.

В работе [16] удалось методом магнетронного распыления покрыть слоем Cr толщиной 200 нм детали из PLA пластика без видимых их деформаций. Но в данной работе перед нанесением металлического слоя деталь покрывалась слоем отверждаемой ультрафиолетом грунтовки на акриловой основе толщиной 70–80 мкм, что могло увеличить стойкость материала к нагреву.

Было обнаружено, что на деформацию пластин из пластика влияет их размер и толщина. Нанесение Cu покрытия толщиной 5 мкм на пластину из ABS размером $150 \times 150 \times 1$ мм привело к изгибу пластины (рис. 3, а). Однако увеличение толщины пластин размером 150×150 из ABS и HIPS до 2–2,4 мм предотвращает их деформацию после нанесения Cu покрытия даже толщиной 10 мкм (рис. 3, б).



Рис. 3. Фото пластин из ABS размером $150 \times 150 \times 1$ мм с Cu покрытием толщиной 5 мкм (а) и HIPS размером $150 \times 150 \times 2$ мм с Cu покрытием толщиной 10 мкм (б)

Fig. 3. Photo of the $150 \times 150 \times 1$ mm ABS plate with 5 µm thick Cu coating (a) and the $150 \times 150 \times 2$ mm HIPS plate with 10 µm thick Cu coating (b)

Известно, что для покрытий, наносимых методом магнетронного распыления характерны остаточные внутренние напряжения. Метод распыления основан на осаждении частиц с высокой кинетической энергией. Поэтому существенный вклад в развитие внутренних напряжений в покрытиях вносят дефекты (межузельные атомы, вакансии, дислокации и др.), образующиеся в процессе осаждения [17]. Таким образом, остаточные напряжения и снижение прочности пластика при нагреве в совокупности приводят к деформации относительно тонких (толщиной около 1 мм) пластин большой площади (150×150 мм). Это необходимо учитывать при изготовлении тонкостенных деталей с прецизионной поверхностью.

Дальнейшие исследования проводились с пластинами 10×10 см², напечатанными на более гладкой стеклянной подложке. Покрытие наносилось на более гладкую сторону пластины, которая была обращена к подложке во время печати. Адгезия Cu покрытия была исследована с использованием стандарта ASTM D 3359 – 09, который подразумевает наложение и снятие клейкой ленты на прорезы, сделанные в покрытии острым лезвием. Данный тест классифицирует адгезию между максимальным значением 5В и минималь-

ным 0В. Исследованию подвергались Cu покрытия толщиной 300 нм и 3,5 мкм на ABS и HIPS пластинах. Во всех случаях не наблюдалось отслоения покрытия после удаления клейкой ленты, поэтому адгезию можно отнести к наивысшему уровню (5В). Пример образца с Cu покрытием толщиной 300 нм после теста на адгезию приведен на рис. 4.

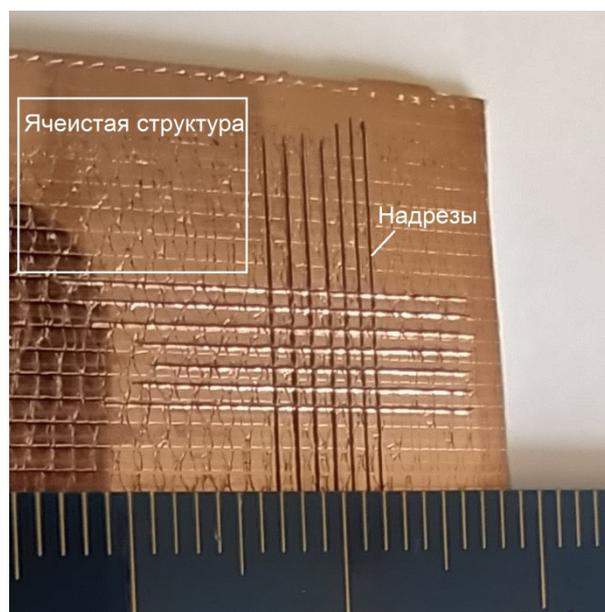


Рис. 4. Фото пластины из HIPS с Cu покрытием толщиной 300 нм после теста на адгезию

Fig. 4. Photo of a 300 nm thick Cu-coated HIPS plate after an adhesion test

На рис. 5 приведены изображения поверхности Cu покрытий толщиной 3,5 мкм на пластинах из ABS и HIPS. При малом увеличении микроскопа (рис. 5, а, в), видно, что поверхность пластика неоднородна и состоит из плоских участков с впадинами между ними. Плоские участки образовались в местах плотного прилегания расплавленного пластика к стеклянной подложке, на которой производилась 3D печать. При большем увеличении микроскопа (рис. 5, б, г) видно, что Cu покрытие на плоских участках имеет относительно гладкую поверхность. Однако во впадинах поверхности подложки

покрытие имеет зернистую структуру с размером зерна около 1–2 мкм. Отметим, что исходная поверхность пластика после печати имеет в данном случае ячеистую структуру (см. в рамке на рис. 4). Эта структура появляется вследствие выбранного способа 3D печати, который состоит в последовательном наложении расплавленных нитей пластика на подложку. Вид этой структуры также зависит от настроек принтера при печати. Микроскопия поверхности проводилась на участках внутри ячеек, где поверхность наиболее гладкая.

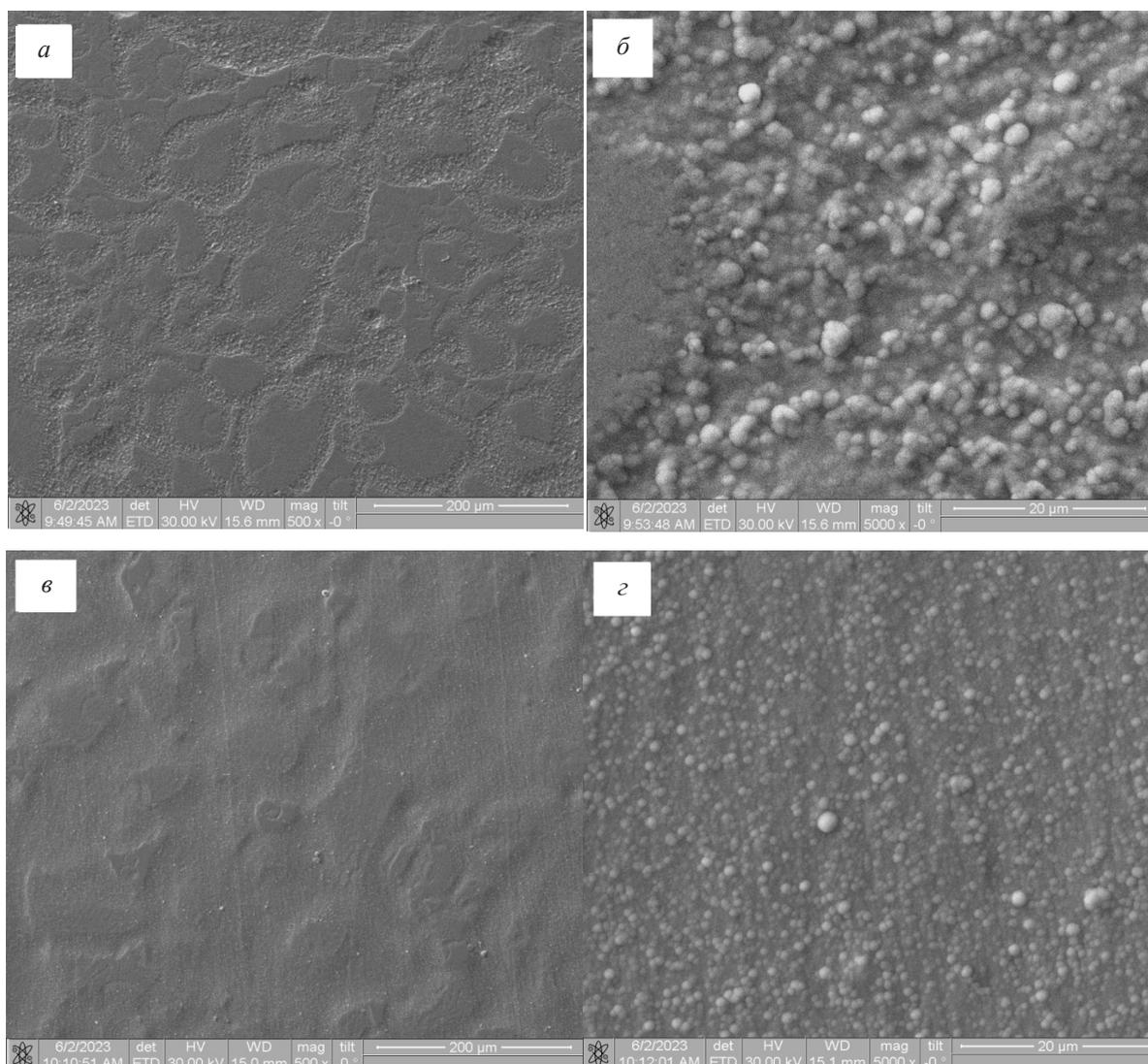
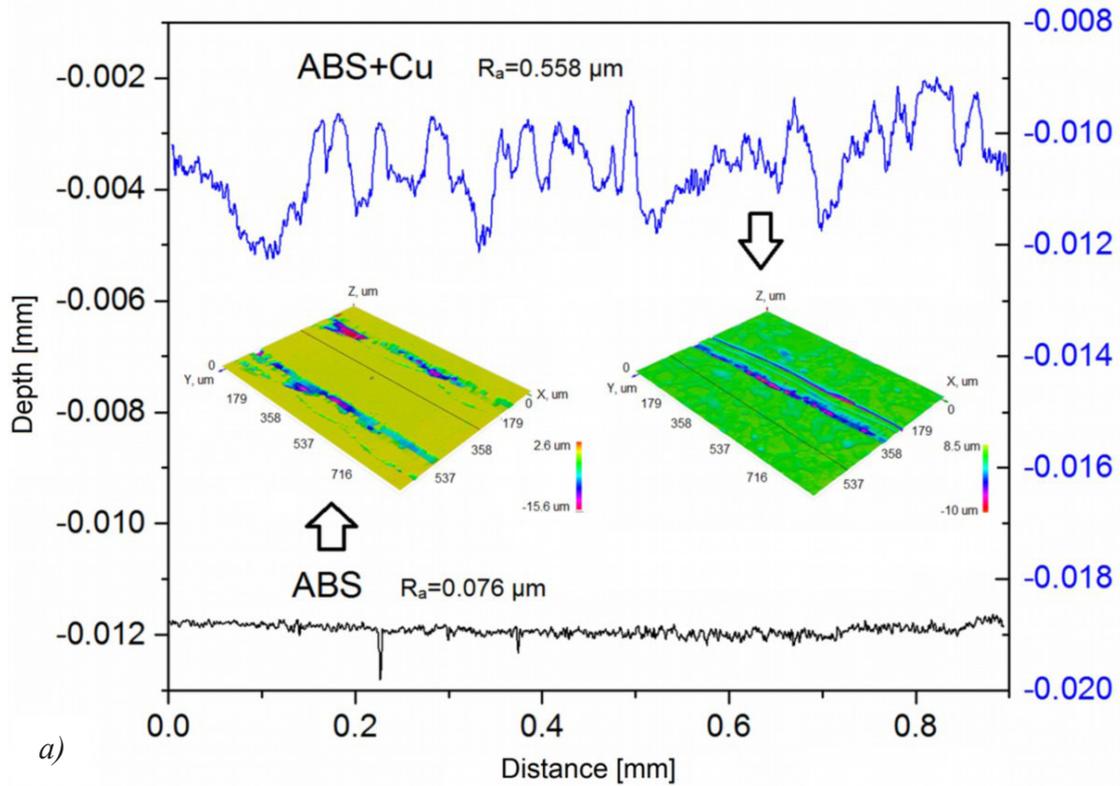
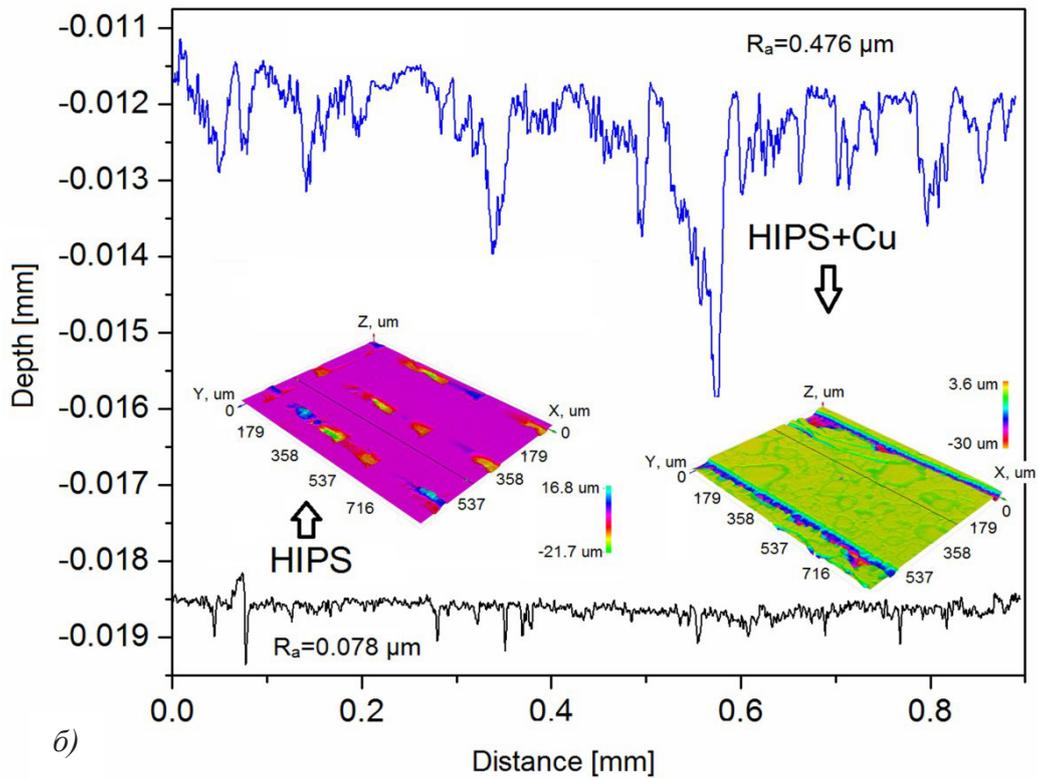


Рис. 5. Поверхность Cu покрытий толщиной 3,5 мкм на пластинах из ABS (а, б) и HIPS (в, г). Сканирующая электронная микроскопия

Fig. 5. Surface of 3.5 μm thick Cu coatings on ABS (a, б) and HIPS (в, г) plates. Scanning electron microscopy



a)



b)

Рис. 6. Рельеф поверхности пластин ABS, ABS+Cu (3,5 мкм) (а) и HIPS, HIPS+Cu (3,5 мкм) (б).

Вставки – изображения поверхности, полученные оптическим профилеометром

Fig. 6. Surface relief of ABS and ABS+Cu (3.5 μm) plates (a) and HIPS and HIPS+Cu (3.5 μm) plates (b).

Inserts are surface images obtained with an optical profilometer

Результаты измерения шероховатости и профиля поверхности пластин из ABS, HIPS с Cu покрытием толщиной 3,5 мкм и без него представлены на рис. 6. Профиль поверхности измерялся вдоль линий длиной 1 мм, которые изображены черными прямыми линиями на цветных изображениях, полученных оптическим профилометром. Профиль и шероховатость поверхности измерялись внутри ячеек ячеистой структуры, представленной на рис. 4. Исходные пластины из ABS и HIPS на данных участках имеют среднюю шероховатость 0,076 и 0,078 мкм соответственно. После нанесения Cu покрытия R_a увеличивается в 6–7 раз и становится равной 0,588 мкм для подложки из ABS и 0,476 мкм для подложки из HIPS.

Если принимать во внимание всю поверхность пластин (с границами ячеек), то средняя шероховатость будет значительно больше. Цветные шкалы на рис. 6 показывают перепад высот по оси Z. Видно, что перепад высот (R_{max}) исходной пластины из ABS равняется примерно 18 мкм. После нанесения покрытия этот параметр не изменяется. R_{max} исходной пластины из HIPS вдвое больше и равняется 38 мкм. После нанесения покрытия этот параметр уменьшается до 34 мкм.

Выводы

В этой работе показана возможность нанесения Cu покрытий толщиной до 10 мкм на пластины из пластика, изготовленные методом 3D печати. Металлизации методом магнетронного распыления были подвергнуты четыре термопластичных материала (PLA, PETG, ABS и HIPS). Нагрев подложки в процессе распыления привел к деформации пластин из PLA и PETG размером 50×50×1 мм, так как данные материалы обладают наименьшей температурой деформации (менее 64 °C). В то же время на образцах из ABS и HIPS аналогичного размера, которые обладают более высокой температурой деформации (более 78 °C), изменения формы после металлизации обнаружены

не были. Cu покрытия на пластинах из ABS и HIPS имеют наивысший уровень адгезии согласно стандарту ASTM D 3359 – 09. После нанесения Cu покрытия средняя шероховатость поверхности увеличивается с 0,076 до 0,588 мкм для пластин из ABS и с 0,078 до 0,476 мкм для пластин из HIPS. Для снижения шероховатости металлических покрытий необходимо проводить предварительную полировку изделий из пластика. Результаты работы показывают, что метод магнетронного распыления может быть использован как альтернатива электрохимической металлизации пластиковых изделий.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института сильноточной электроники СО РАН № FWRM-2021–0006 и при частичной поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (программа «Наука» № FSWW-2023-0003).

This work was supported by the Government Contract of the Institute of High Current Electronics (Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences) under Grant FWRM-2021–0006 and was partially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (program “Science” No. FSWW-2023-0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bernasconi R., Natale G., Levi M., Magagnin L. Electroless Plating of PLA and PETG for 3D Printed Flexible Substrates // ECS Trans. 2015. V. 66. P. 23–35. DOI: 10.1149/06619.0023ecst.
2. Afshar A., Mihut D. Enhancing durability of 3D printed polymer structures by metallization // J. Mater. Sci. Technol. 2020. V. 53. P. 185–191. DOI: 10.1016/j.jmst.2020.01.072.
3. Sun J., Hu F. Three-dimensional printing technologies for terahertz applications: A review. // Int. J. RF Microw. Comput.-Aided Eng. 2019. V. 30, Iss. 1. Article number 21983. DOI: 10.1002/mmce.21983.
4. Ghassemiparvin B., Ghalichechian N. Design, fabrication, and testing of a helical antenna using 3D

printing technology // *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2019. V. 62, Iss. 4. P. 1577–1580. DOI: 10.1002/mop.32184.

5. Filonov D., Kolen S., Shmidt A., Shacham-Diamand Y., Boag A., Ginzburg P. Volumetric 3D-Printed Antennas, Manufactured via Selective Polymer Metallization // *Phys. Status Solidi RRL Rapid Res. Lett.* 2019. V. 13, Iss. 6. DOI: 10.1002/pssr.201800668.

6. Lammel P., Whitehead A. H., Simunkova H., Rohr O., Gollas B. Droplet erosion performance of composite materials electroplated with a hard metal layer // *Wear*. 2011. V. 271, Iss. 9–10. P. 1341–1348. DOI: 10.1016/j.wear.2010.12.034.

7. Bazzaoui M., Martins J. I., Bazzaoui E. A., Albourine A., Wang R., Hong Po-Da. A simple method for acrylonitrile butadiene styrene metallization // *Surf. Coat. Technol.* 2013. V. 224. P. 71–76. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.02.050.

8. Gonzalez R., Ashrafizadeh H., Lopera A., Mertiny P., McDonald A. A Review of Thermal Spray Metallization of Polymer-Based Structures // *J. Therm. Spray Technol.* 2016. V. 25. P. 897–919. DOI: 10.1007/s11666-016-0415-7.

9. Maurer C., Schulz U. Solid particle erosion of thick PVD coatings on CFRP // *Wear*. 2014. V. 317, Iss. 1–2. P. 246–253. DOI: 10.1016/j.wear.2014.05.016.

10. Pedrosa P., Rodrigues M. S., Neto M. A., Oliveira F. J., Silva R. F., Borges J., Amaral M., Ferreira A., Godinho L. H., Carvalho S., Vaz F. Properties of CrN thin films deposited in plasma-activated ABS by reactive magnetron sputtering // *Surf. Coat. Technol.* 2018. V. 349. P. 858–866. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.06.072.

11. Wendt R., Ellmer K., Wiesemann K. Thermal power at a substrate during ZnO:Al thin film deposition in a planar magnetron sputtering system // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 82. P. 2115–2122. DOI: 10.1063/1.366092.

12. Thornton J. A., Lamb J. L. Substrate heating rates for planar and cylindrical-post magnetron sputtering sources // *Thin Solid Films*. 1984. V. 119, Iss. 1. P. 87–95. DOI: 10.1016/0040-6090(84)90160-3.

13. Bradley J. W., Backer H., Aranda-Gonzalvo Y., Kelly P. J., Arnell R. D. The distribution of ion energies at the substrate in an asymmetric bi-polar pulsed DC magnetron discharge // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2002. V. 11, No. 2. P. 165–174. DOI: 10.1088/0963-0252/11/2/307.

14. Cada M., Bradley J. W., Clarke G. C. B., Kelly P. J. Measurement of energy transfer at an isolated substrate in a pulsed dc magnetron discharge // *J. Appl. Phys.* 2007. V. 102, Iss. 6. Article number 063301. DOI: 10.1063/1.2779287.

15. Bradley J. W., Welzel T. Physics and phenomena in pulsed magnetrons: an overview // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2009. V. 42. Article number 093001. DOI: 10.1088/0022-3727/42/9/093001.

16. Romani A., Mantelli A., Tralli P., Turri S., Levi M., Suriano R. Metallization of Thermoplastic Polymers and Composites 3D Printed by Fused Filament Fabrication // *Technologies*. 2021. V. 9, Iss. 3. Article number 49. DOI: 10.3390/technologies9030049.

17. Shugurov A. R., Panin A. V. Mechanisms of Stress Generation in Thin Films and Coatings. // *Tech. Phys.* 2020. V. 65. P. 1881–1904. DOI: 10.1134/S1063784220120257.