

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛИМЕРНОГО ИЗДЕЛИЯ  
С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ МЕДЬЮ**

**Н.А. КАНАНОВИЧ, И.Л. ПОБОЛЬ, А.А. ПРЕДКО**

**Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь**

*Изучен комбинированный метод изготовления изделий, сочетающий 3D печать заготовки из полимера с последующим осаждением на нее слоя меди для возможного применения в качестве электродов-инструментов для электроэрозионных прошивочных станков.*

Активно проводятся исследования и разработки по получению деталей методами 3D печати. Наиболее разработана область изготовления изделий из различных полимеров. Значительно более сложными и дорогостоящими являются устройства и технологии печати изделий из металлов.

В работе опробован вариант получения на 3D принтере полимерной заготовки требуемой формы, которая, после нанесения на нее металлического покрытия, приобретет определенную совокупность свойств, присущую изготовленному из массивной заготовки (в том числе из металла). Предполагается, что такая полимерно-металлическая композиция может обладать рядом преимуществ по сравнению с металлическим изделием, полученным традиционными вычитающими методами обработки. Среди них низкая себестоимость, короткий срок изготовления, малая масса, быстрое восстановление покрытия в случае разрушения и др.

Одной из возможных областей использования таких полимерно-металлических композиций является получение электродов-инструментов для электроэрозионных прошивочных станков. Такое оборудование широко применяется для изготовления оснастки (штампов, пресс-форм и т.п.) из твердых сплавов системы WC-Co и других, из инструментальных сталей высокой твердости, деталей авиационной техники (лопаток турбин и др.) из труднообрабатываемых сплавов, в том числе обладающих высокой вязкостью, плохой обрабатываемостью при лезвийной обработке.

Удаление слоев материала с поверхности заготовки происходит последовательно благодаря воздействию электрических импульсов. Прошивочные электроды в процессе эрозионного взаимодействия с обрабатываемым сплавом подвергаются комплексу разнообразных физико-химических,

газо- и гидродинамических, термомеханических воздействий. Это предъявляет специфические требования к материалу электрода. Electrodes изготавливаются из электролитической меди и медных сплавов, композиций меди с вольфрамом, серого чугуна, первичного алюминия и алюминиевых сплавов, графита и графито-полимерных композиций. Учитывая многие технологические параметры, предпочтительным материалом для этих целей является чистая медь.

**Оборудование, материалы и методики исследований.** Для создания полимерной заготовки использовали технологию FDM получения трехмерных моделей, основанную на послойном термическом укладывании полимерной нити. С помощью программы SolidWorks была создана 3D-модель с нужной конфигурацией. Далее модель выращивали на 3D-принтере CreatBot D600 из PLA полимера.

При послойном выращивании материала из проволоки диаметром 1,75 мм неизбежным следствием является небольшая волнистость на боковой поверхности изделия. Чтобы избавиться от нее, поверхность полимерного изделия обрабатывали в растворе хлористого метилена. Далее для повышения адгезии осаждаемой меди к полимерному изделию создавали искусственную шероховатость поверхности с помощью наждачной бумаги P1000. Поверхности обезжиривались 30% раствором NaOH в течение 10 минут, промывались в дистиллированной воде и высушивались.

Перед металлизацией поверхности образцов из пластика на них создавали токопроводящий слой из углерода с помощью аэрозольного баллона. Магнетронным методом на образцы наносили слои меди толщиной 5 мкм, которые имел высокую адгезию к основе.

Последующая задача получения на полимерной основе слоя меди толщиной в несколько сотен микрометров решалась методом гальванического выращивания с использованием потенциостата-гальваностата AUTOLAB и электролита из  $H_2SO_4$  и  $CuSO_4$  с добавлением выравнивающих добавок. Противоелектрод выполнен из пластины из сплава M1, приблизительно эквидистантно повторяющей форму полимерной основы. Это позволило распределить ток по поверхности заготовки и создавать равномерно нанесенный слой меди. Для формирования слоя меди толщиной до 1000 мкм было необходимо решить задачу выбора такого режима гальванизации, при котором материал выращенного покрытия был достаточно мягким и не имел высоких внутренних напряжений. Для этого был подобран оптимальный режим и создана новая программа для потенциостата-гальваностата AUTOLAB.

Морфологию поверхности образца с слоем меди изучали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) MIRA 3 LM. Неразрушающий контроль структуры осажденного медного слоя проводили на рентгенотелевизионной установке XICube Seifert.

**Результаты.** С использованием перечисленных технологических операций методом 3D печати выращен образец диаметром 10 мм и длиной 90 мм (на рисунке 1 показан внешний вид и рентгенодефектоскопическое изображение). На нем сформировано медное покрытие толщиной порядка 410 мкм. Методом гальванопластики осаждается чистая медь, т.к. в ходе процесса происходит электролитическое рафинирование и все примеси, находящиеся в противоеlectроде, не соосажаются.

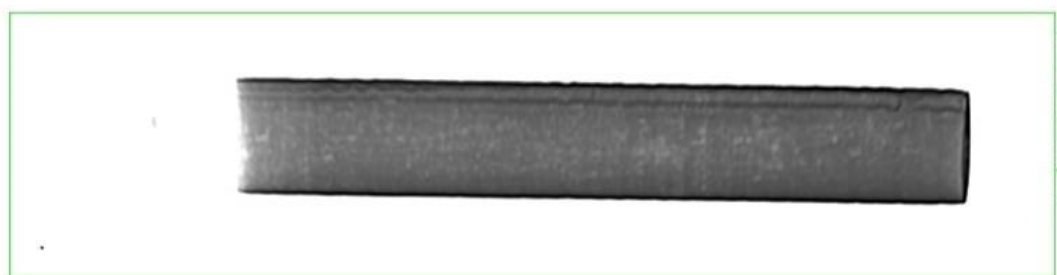


Рисунок 1. – Образец, выращенный из полимера, со слоем меди

Анализ на СЭМ MIRA 3 LM слоя меди на образце (рисунок 2) показал, что топография поверхности в значительной степени зависит от режима осаждения (плотности тока и температуры), концентрации используемых веществ электролита и примесей. Морфология данной поверхности развита ввиду попадания в электролит с поверхности образца частиц углерода. Углерод сооседался с медью, образуя на поверхности покрытия новые, энергетически более выгодные, центры кристаллизации, включения размером от 10 до 30 мкм. Наблюдаются микротрещины, образованные ввиду использования электролита на основе простых солей с низким пере-напряжением процесса осаждения. С ростом толщины слоя меди возрастают внутренние напряжения в материале, которые и приводят к образованию микротрещин.

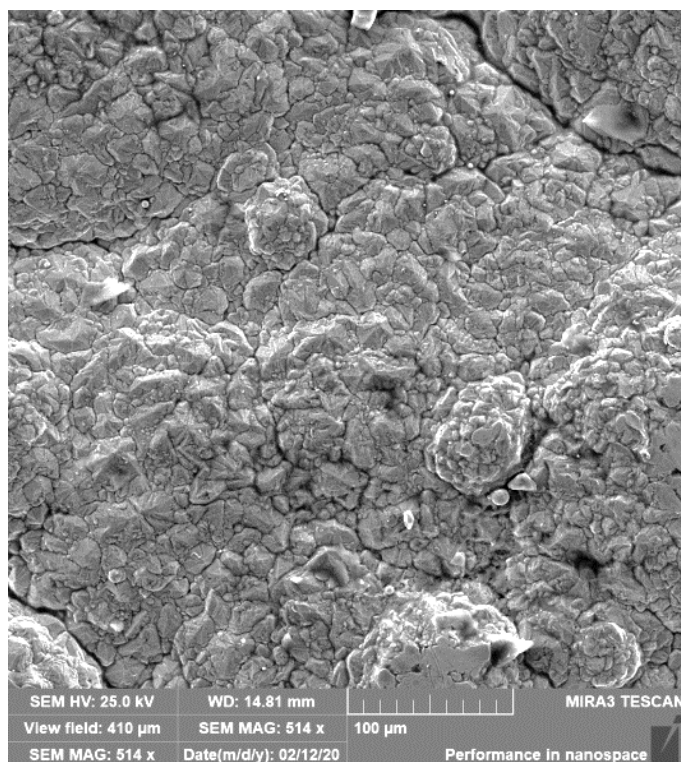


Рисунок 2. – Изображение поверхности меди

Структура выращенного слоя меди однородная и плотная (рисунок 3). Справочное значение микротвердости меди марки М1 - HV 100. В выращенном слое меди её микротвердость от значений HV 100-105 вблизи полимерной подложки (места начала роста покрытия) несколько снижается (до HV 90) к поверхности слое из-за увеличения фактической площади образца и уменьшения плотности тока процесса, что приводит к осаждению менее плотного покрытия.

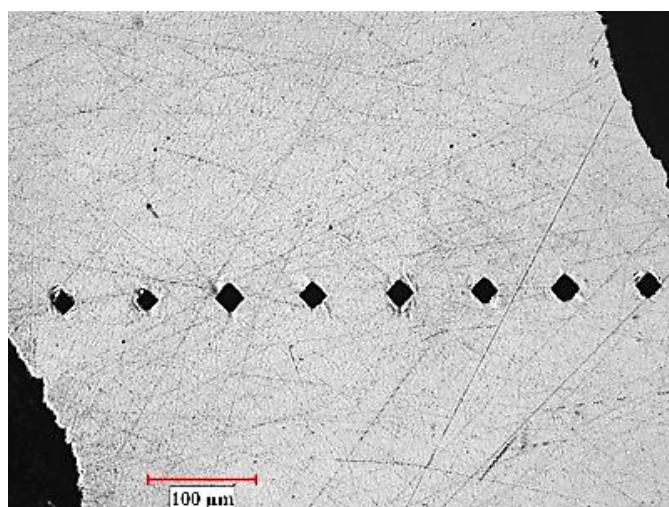


Рисунок 3. – Поперечное сечение слоя меди, выращенного на заготовке из PLA полимера

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ  
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ОАО «НПО «ЦЕНТР  
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПАРК  
ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

## **Инновационные технологии в машиностроении**

Электронный сборник материалов международной  
научно-технической конференции,  
посвященной 50-летию машиностроительных специальностей  
и 15-летию научно-технологического парка  
Полоцкого государственного университета  
(Новополоцк, 21-22 апреля 2020 г.)



**ИннТехМаш**

Под редакцией  
чл.-корр. НАН Беларуси, д-ра техн. наук, проф. В. К. Шелега;  
д-ра техн. наук, проф. Н. Н. Попок

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2020

УДК 621(082)

*Редакционная коллегия:*

Н. Н. Попок (председатель), В. П. Иванов (зам. председателя),  
Р. С. Хмельницкий (отв. Секретарь), А.В. Дудан, В. А. Данилов, Е.В. Бритик

***Инновационные технологии в машиностроении*** [Электронный ресурс] : электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 21-22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т ; под. ред. В. К. Шелега; Н. Н. Попок. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-691-7.

Отражены современное состояние и направления развития технологии и оборудования механической и физико-технической обработки; рассмотрены вопросы создания современных материалов, изготовления, восстановления и упрочнения деталей машин, автоматизации производства, эксплуатации и модернизации автомобилей и других машин.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов технических специальностей учреждений образования.

Прилагаются [титulyные листы презентаций докладов](#) участников конференции.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3141815008 от 28.03.2018.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь  
тел. 8 (0214) 59-95-53, e-mail: n.popok@psu.by

**№ госрегистрации 3141815008****ISBN 978-985-531-691-7**

© Полоцкий государственный университет, 2020

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Инновационный технологии в машиностроении» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Компьютерный дизайн *Е. А. Балабуровой*  
Техническое редактирование и верстка *И. Н. Чапкевич*

---

Подписано к использованию 23.04.2020.  
Объем издания: 10,9 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 264.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,  
г. Новополоцк,  
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44  
<http://www.psu.by>