

УДК 339.372.843

Н. М. Чигринова, д-р техн. наук, проф., **Д. Г. Бурдейная**, магистр техн. наук,
В. Е. Чигринов, ст. преподаватель
Белорусский национальный технический университет
Тел.+375-17-293-95-81, E-mail: chygrynova@ya.by

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ МИКРОПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье приведены некоторые сведения о возможности применения современных аддитивных микроплазменных методов для получения на металлических поверхностях различного назначения работоспособных комбинированных покрытий из материалов с резко различающимися физико-механическими свойствами. Такие покрытия на основе соединения металла и полимера предлагается создавать с использованием технологии электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием и метода 3D принтинга. Благодаря сочетанию повышенной износостойкости металлического ЭИЛ-покрытия и свойств полимерных материалов становится возможным заметное расширение областей применимости металлических объектов с такими покрытиями в тех областях, где ранее их эксплуатация была либо невозможна, либо затруднена. Преимущества – простота реализации без использования дорогостоящей и громоздкой инфраструктуры, мобильность, малая энергоемкость.

Ключевые слова: аддитивные методы, комбинированные покрытия, материалы с резко различающимися физико-механическими свойствами, технология электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием, метод 3D принтинга.

N. M. Chigrinova, D. G. Burdeynay, V. E. Chigrinov

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR OBTAINING COMPOSITIONS FROM DISSIMILAR MATERIALS

The article provides some information about the possibility of using modern microplasma additive methods to obtain workable combined coatings from materials with sharply differing physical and mechanical properties on metal surfaces for various purposes. It is proposed to create such coatings based on the combination of metal and polymer using the technology of electric spark alloying with additional ultrasonic exposure and the method of 3D printing. Due to the combination of increased wear resistance of the metal EIL layer and the properties of polymer materials, it becomes possible to noticeably expand the applicability of metal objects with such coatings in areas where their operation was previously either impossible or difficult. Advantages - ease of implementation without the use of expensive and cumbersome infrastructure, mobility, low energy intensity

Keywords: additive methods, combined coatings, materials with sharply differing physical and mechanical properties, electrospray alloying technology with additional ultrasonic exposure, 3D printing method.

1. Введение.

В настоящее время во многих отраслях народного хозяйства особую важность приобретают вопросы сбережения ресурсов, повышения эффективности производства и улучшения качества продукции. Решение этих вопросов напрямую связано с использованием новых, перспективных материалов, обладающих улучшенным комплексом рабочих свойств.

Однако получение таких материалов – процесс затратный и долговременный. Поэтому все более пристальное внимание уделяется технологиям модификации поверхностей стандартных металлов с целью совершенствования их структуры и свойств, изменяющих их поведение в условиях эксплуатации. К таким технологиям относятся методы формирования функционально-адаптированных покрытий.

Во многих отраслях промышленности обычно применяют широко растиражированные технологии получения однокомпонентных покрытий с определенным набором

характеристик: газо-термические и газо-пламенные, ионно-плазменные и методы вакуумного напыления, применяют технологии булатирования и гальванические методы и т.п. Любой из этих методов имеет свою технологическую нишу, определяющую его рациональное применение. Однако такие монопокрытия не всегда могут быть надежной защитой или гарантированно работоспособными вследствие высокой напряженности их структуры, малой толщины, высокой пористости и слабой адгезии к подложке. Кроме того, для каждого из перечисленных методов необходимы стационарные условия обработки с развитой и дорогостоящими инфраструктурой и оборудованием, малая мобильность и специальные, как правило, весьма дорогостоящие и не всегда доступные, компоненты для получения покрытий.

Сегодня, когда технологические достижения определяют конкурентоспособность любого производства, все чаще возникает необходимость в разработке инновационных технологий и материалов, среди которых изделия с комбинированными функционально-адаптированными покрытиями, в большей степени отвечающие требованиям современных производств, занимают одно из первых мест.

Задача получения на металлической основе покрытий требуемой толщины с минимальной пористостью и напряженностью структуры, равномерным рельефом поверхности может быть частично решена путем последовательного применения разных видов обработки, выбор которых обусловлен физико-механическими свойствами и химическим составом наносимых на нее материалов. Для надежной эксплуатации изделий с такими многокомпонентными покрытиями их создают, сочетая близкие по физическим и химическим свойствам материалы: металлы с металлами, неметаллы с неметаллами.

Получение же работоспособного соединения таких разнородных материалов, как металл и полимер, весьма затруднительно не только из-за их полярно различных физико-механических характеристик, обуславливающих неизбежное наличие внутренних напряжений в структуре образуемого соединения. При этом, если на поверхность металлической основы будет нанесено функциональное покрытие работоспособной толщины (не менее 40-70 мкм), как правило, имеющего развитый рельеф и высокую неравномерность профиля, то эта неравномерность послужит дополнительным источником напряжений разного знака в созданном покрытии, обусловит его неравномерную толщину, наличие поверхностной пористости и шероховатости, что в совокупности окажет негативное влияние на последующее перенесение полимера на эту поверхность и его адгезию к ней.

Поэтому при разработке инновационной технологии получения комбинированного покрытия на основе сочетания металла с полимером, обладающего повышенной износостойкостью в сочетании с улучшенными антифрикционными свойствами и повышенной коррозионной стойкостью, авторы прежде всего руководствовались возможностью получения однородного профиля поверхности металлического покрытия с минимально возможными пористостью и шероховатостью и сниженным уровнем внутренних напряжений.

Для решения поставленной задачи были выбраны современные аддитивные технологии, основанные на эффекте микроплазмы: для формирования износостойкого покрытия – интегральный метод электроискровой обработки без и с дополнительным ультразвуковым воздействием – ЭИЛ и ЭИЛ с УЗВ, и 3D принтинг для нанесения на это покрытие полимерного слоя.

Выбор технологий ЭИЛ, ЭИЛ с УЗВ, основанных на эффекте микроплазмы и более интенсивного механического воздействия за счет УЗВ, обусловлен возможно-

стью обработки поверхностей металлических объектов произвольных конфигурации и размеров, обеспечивая при этом высокоадгезионное соединение покрытия с металлической основой [1] и прогнозируемый рельеф [2]. Наличие такого износостойкого покрытия в критических зонах металлических объектов расширяет ареал применимости стандартных материалов, функционирующих в условиях интенсивного износа различной природы. Дополнительное воздействие методом 3-D принтинга, осуществляемое посредством плазменного перенесения на поверхность сформированного ЭИЛ-покрытия слоя полимера, используется для уменьшения его пористости и улучшения антифрикционных и коррозионностойких свойств.

Преимуществами предлагаемой аддитивной обработки, позволяющей в одном технологическом цикле создавать покрытия с расширенным набором эксплуатационных свойств за счет комбинации разнородных материалов, являются простота реализации без использования дорогостоящей и громоздкой инфраструктуры, недорогое оборудование и материалы, мобильность, малоэнергоёмкость, быстрота подготовки специалистов – операторов.

Целью работы является изучение особенностей получения высокоадгезионной металло-полимерной композиции на разно профилированных поверхностях функционально-адаптированных покрытий.

В основе научной идеи лежит обеспечение требуемого рельефа поверхности металлического покрытия перед 3 D принтингом полимерного слоя с целью обеспечения более прочного адгезионного соединения разнородных по своей природе металла и пластика в результате комбинированной аддитивной обработки.

Новизна данного исследования заключается в поиске и разработке новых возможностей в создании нетрадиционных комбинаций аддитивных технологий, основанных на эффекте микроплазмы, для получения требуемых свойств нестандартных комбинаций материалов в конкретных условиях их эксплуатации.

Решаемые задачи:

1. Изучение возможности формирования на поверхности металлического объекта покрытия работоспособной толщины (не менее 60 мкм) с регулярным рельефом поверхности;
2. Изучение особенностей нанесения на поверхность созданного покрытия промежуточного подслоя – адгезива, способствующего надежному сцеплению металла и полимера;
3. 3D принтинг композиции «металлическое покрытие - адгезив» полимером для получения комбинированного покрытия.

Разработка инновационных комплексных решений в устранении большого количества проблемных зон в узлах и механизмах в современном машиностроении обуславливает несомненный научный интерес и практическую значимость решения поставленных задач.

2. Основное содержание и результаты работы

Комбинация предлагаемых микроплазменных аддитивных методов для решения поставленных задач требует подготовки поверхности металлического покрытия для последующего 3D принтинга. Связано это с особенностями второй технологии. Перед нанесением полимера на любую поверхность необходимо создание ее геометрической модели с развитым однородным рельефом, согласно которой и формируется качественный равнотолщинный полимерный слой. Однако, геометрия (рельеф) поверхности металлического покрытия, образованного электроискровой обработкой с высокой энерги-

ей плазмы и низкочастотным механическим ударом (600 Гц) во всем возможном диапазоне электрических режимов, близка к нерегулярной [3] вследствие нестабильности процесса. Это приводит к созданию неоднородного рельефа поверхности с неравномерной шероховатостью (рис.1), изменяющейся в зависимости от режимов ЭИЛ и состава обрабатываемого материала по параметру Ra от 20 мкм до нескольких сотен мкм [1,3].

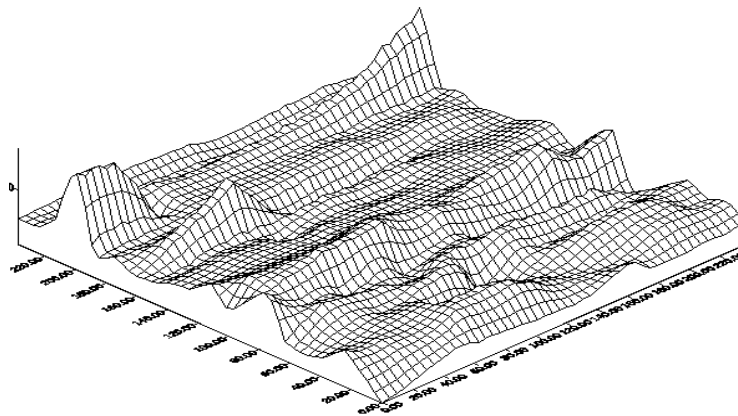


Рисунок 1. Рельеф поверхности покрытия, полученного методом ЭИЛ

При этом пористость ЭИЛ-покрытия превышает 30 %. Это делает материалы с такими покрытиями малоприспособными для изготовления множества высокотехнологичных узлов и механизмов.

Известно, что модель для осуществления 3D принтинга полимера на любую поверхность является ее зеркальным отображением [4]. В связи с этим авторы предположили, что если эта поверхность нерегулярно профилирована, как после ЭИЛ, то она не будет пригодна для построения работоспособной 3D модели, т.к. при ее обработке будут учитываться только наиболее выпуклые зоны рельефа. В остальных зонах ЭИЛ-покрытия будут оставаться незаполненные полимером пустоты, что не позволит гарантировать прочное сцепление наносимого полимера с металлическим подслоем из-за их наличия в местах его впадин. С другой стороны, более выраженный рельеф поверхности металлического покрытия может быть основой для более прочного механического сцепления с наносимым полимером [5].

Поэтому для решения первой задачи проводили исследование по оптимизации схем и интенсивности процесса формирования металлического покрытия с целью получения поверхности с минимальными отклонениями от средних значений его профиля, которые оценивали по параметру шероховатости Ra.

Поэтому для получения ЭИЛ-покрытия работоспособной толщины (обычно не менее 60 мкм) с регулируемым по высоте и геометрически регулярным рельефом поверхности была выбрана интегральная технология ЭИЛ с УЗВ [6], позволяющая за счет применения дополнительной ультразвуковой обработки снижать уровень остаточных внутренних напряжений в структуре ЭИЛ-покрытия, нивелировать неоднородности в его рельефе за счет диспергации выступов с перемещением диспергированных частиц во впадины рельефа, обеспечивая сниженную до $R_{max} < 5$ мкм неровность профиля поверхности и возрастание его сплошности до 93-97 % (пористость не более 3-7 %).

С целью оптимизации режимов предложенных электроискровых технологий для получения равномерного рельефа поверхности ЭИЛ-покрытия обработку выполняли по трем схемам, различаемым по интенсивности ультразвукового импульса:

- схема 1 – стандартный метод ЭИЛ; величина энергетического импульса 1,83 Дж и частота 100 Гц;
- схема 2 – ЭИЛ+УЗВ; ЭИЛ: величина энергетического импульса при 4,3 Дж и частота 200 Гц; УЗВ: напряжение 125 В, фаза 8, частота 22 кГц;
- схема 3 – УЗВ₁+ЭИЛ+УЗВ₂. УЗВ₁: напряжение 100 В, фаза 4, частота 22 кГц; ЭИЛ: энергия импульса 4,3 Дж, частота 200 Гц; УЗВ₂: напряжение 125 В, фаза 2, частота 22 кГц.

Для проведения экспериментов готовили образцы из Ст.3 в виде пластин прямоугольной формы размером 30x30x3мм. После их тщательной подготовки и очистки метиловым спиртом с целью снятия всевозможных загрязнений точно выверяли геометрические параметры и плоскостность исходных поверхностей. Затем на серийном оборудовании формировали ЭИЛ-покрытие. Все перечисленные операции осуществляли с помощью твердосплавных анодов групп ТК – титано-вольфрамо-кобальтовых сплавов. Продолжительность обработки по каждой из приведенных схем должна быть достаточной для формирования покрытия толщиной не менее 60 мкм.

В результате на поверхности стальных образцов было сформировано покрытие толщиной 75–80 мкм с различным рельефом поверхности и пористостью, изменяемой от 14 до 3 % (рис. 2).

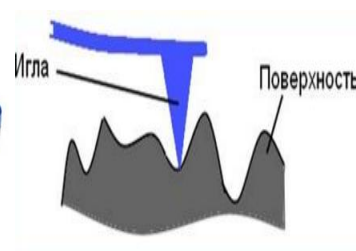
Толщину покрытий фиксировали с помощью электронного толщиномера «Констан-та К-5» (рис.2), шероховатость контролировали посредством ощупывания поверхности на профилемере «Surtronic DUO» (рис.3).



Рисунок 2. Толщиномер К-5



Рисунок 3. Профилемер «Surtronic DUO» и схема ощупывания поверхности полученного покрытия



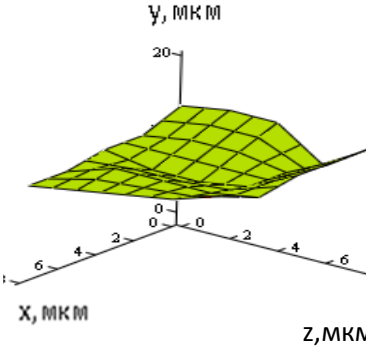
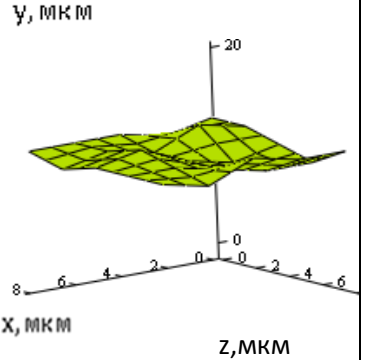
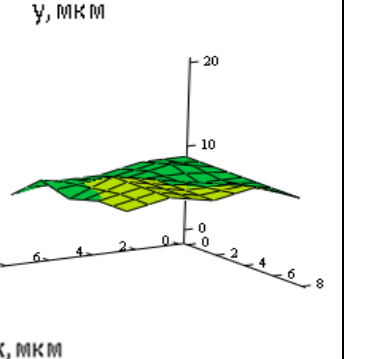
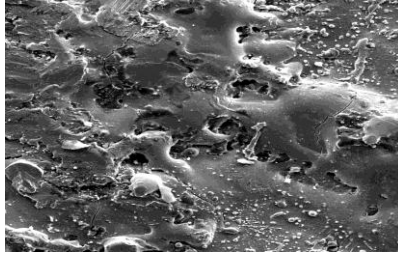
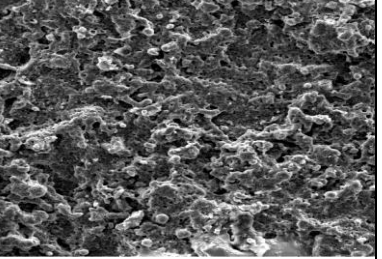
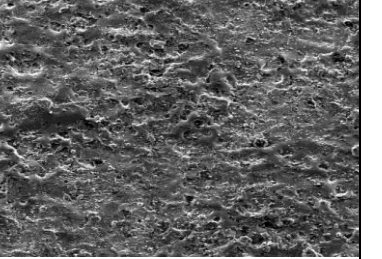
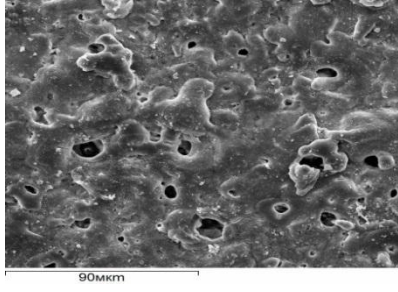
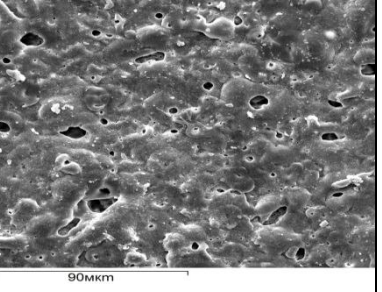
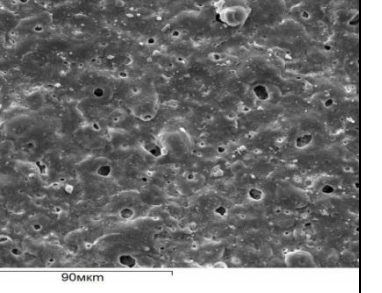
Перед измерением шероховатости на всю исследуемую поверхность маркером наносили сетку с шагом в 0,5 мм и проводили замеры в узлах сетки с контролем по критерию среднего арифметического отклонения профиля Ra. Обработку результатов в 16 точках, полученных на образцах размерами 30x30 мм (с краев образцов шероховатость не фиксировалась), проводили по программе, которая дает возможность статистического анализа результатов изображения по любому из-за данных измерений.

Топография поверхности ЭИЛ-покрытия, полученного согласно предложенным схемам, изучалась посредством фотографирования цифровым фотоаппаратом HP photosmart 715 digital camera с использованием приставок увеличения контраста микроскопа Mef-3 и компьютерной графической обработки изображений.

Измерение пористости осуществлялось методом количественного стереологического анализа на аттестованном автоматическом анализаторе изображения «Mini-Magiscan» фирмы "Jouce Loebel" по программе «Genias 26», принцип работы которого основан на выделении объектов анализа по пороговому значению интенсивности. Обработку результатов анализа изображения выполняли по программе, которая дает возможность стати-

стического анализа результатов по любому из-за данных измерений и строит гистограммы по любому из измеренных параметров с желаемым шагом. Результаты исследований приведены в табл.1.

Таблица 1. – Параметры ЭИЛ-покрытий, полученных по изучаемым схемам

Схема 1 – ЭИЛ	Схема 2 – ЭИЛ+УЗВ	Схема 3 – УЗВ ₁ +ЭИЛ+УЗВ ₂ .
Диапазон параметров шероховатости на поверхности		
Ra max =26.7 мкм, Ra min = 8,6 мкм	Ra max = 8.2 мкм, Ra min = 4.9 мкм	Ra max = 2.2 мкм, Ra min = 0.8 мкм
Рельеф поверхности		
		
Топография поверхности		
		
Поверхностная пористость		
		
29-36 %	12-14%	3 – 3-5 %

При анализе полученных результатов становится очевидным, что получить прочное прилегание полимера к поверхности покрытия, полученного методом ЭИЛ, весьма проблематично. На поверхности покрытия, созданного по схеме 2, рельеф покрытия более равномерен, но также весьма неоднороден. Наиболее равномерный рельеф и близкий к регулярному реализуется после обработки металлической основы согласно схеме 3, отличающейся от двух предыдущих большей интенсивностью механического воздействия с ультразвуковой частотой, обусловив гомогенизацию структуры, снижение уровня напряжений в ней [2] и снижение неоднородности рельефа полученной поверхности.

Для гарантированного удержания полимерного слоя на разнотипной профилированной поверхности металлического покрытия необходимо предусмотреть меры, способные обеспечить необходимую адгезию полимерного слоя.

Решение этой задачи в данном исследовании авторы связывают с использованием промежуточных подслоев – адгезивов (праймеров), имеющих химическое сродство как к металлу, так и к полимеру [7]. Выбор данного решения обусловлен тем, что в процессе формирования адгезионного контакта системы металл–полимер с течением времени происходит увеличение истинной поверхности контакта и числа связей, соединяющих контактируемые поверхности. В соответствии с концепцией, развитой в работах В.Е. Гуля [8], величина истинной поверхности контакта может изменяться в результате микрореологических процессов затекания полимерного адгезива в микронеровности поверхности субстрата. При этом толщина слоя адгезива должна быть не менее максимальной величины выпуклостей рельефа R_a на поверхности металлического покрытия.

Авторами были проанализированы возможные варианты составов и способов нанесения адгезивов на поверхность ЭИЛ-покрытия перед 3D-принтингом полимера. Их анализ позволил заключить, что в каждом конкретном случае выбор состава адгезива должен определяться свойствами соединяемых в композицию материалов – металла и полимера. Среди множества изученных составов и методов нанесения адгезива на металлическое покрытие [9–11] авторы выбрали простой и недорогой способ нанесения полимерной композиции на основе олигомера с размером частиц не более половины толщины наносимого покрытия [12]. Данный метод привлекателен своей простотой и дешевизной, нанесение адгезива на поверхность металлического покрытия наносят кистью или обычным окунанием, процесс высыхания адгезивного подслоя не требует длительного времени и его возможно осуществить практически в любых условиях.

Выбор состава полимера определяется последующей эксплуатацией изделия с комбинированным покрытием. Для осуществления 3D-печати температура плавления полимера не должна превышать 170–180°C. При этом для успешной эксплуатации композиций, работающих в условиях механического и коррозионного износа, а также трения целесообразно выбирать полимер, имеющий температуру плавления не менее 180–200° С. Поэтому в качестве полимерного материала, переносимого на износостойкое твердосплавное покрытие, в данной работе использовали кондуктивный ABS. При этом ABS-пластик обладает отличными механическими свойствами, долговечностью и низкой стоимостью, влагоустойчивостью и коррозионной стойкостью в среде кислот и масел. Кроме того, ABS-пластик уже получил широкое применение в производстве деталей автомобилей, корпусов различных устройств, контейнеров, сувениров, различных бытовых аксессуаров и пр.

Для решения 3 задачи создавали объемную модель поверхности полученных по

предложенным схемам металлических покрытий с учетом их геометрических и структурных параметров. С этой целью использовали компьютерную программу SolidWorks, позволяющую осуществлять автоматизированное проектирование, подготовку получения изделий различной конфигурации и детальный инженерный анализ полученного изображения. Данная программа функционирует на платформе Microsoft Windows [13], что делает ее удобной для использования в обычных условиях.

При изготовлении образцов композиции «металл-износостойкий слой-полимер» использовали 3D-принтер Flashforge Guider II, пригодный для печати объектов средних габаритов из пластика по технологии горячего послойного наплавления. 3D-печать включает три этапа: 1. Создание или загрузка 3D-модели; 2. Нарезка и экспорт 3D - модели; 3. Построение 3D-модели.

На первом этапе для точной установки металлического образца с металлическим покрытием и его надежного закрепления на предметном столике принтера проектировали уголки (фиг. 4).



Рисунок 4. Уголки для закрепления образца с ЭИЛ-покрытием на предметном столике 3 принтера

На втором этапе печать ставили на паузу и в уголки устанавливали образец с износостойким слоем с нанесенным на его поверхность слоем адгезива. Большое влияние на свойства полимера «приклеиваться» к поверхности металла имеет температурно-временной режим. С увеличением температуры уменьшается время, в течение которого достигается максимальное значение адгезии. Поэтому на 3 этапе столик принтера прогревали до температуры 55оС, после чего начинали 3D печать полимера на поверхность металлического покрытия.

Продолжительность печати в соответствии с площадью обрабатываемой поверхности, составом пластика, микронеровностями рельефа и температурой нагрева определяли расчетным путем. Время обработки составило 12 минут. На рис.5 представлены образцы с нанесенным полимером на поверхности износостойкого слоя с различным рельефом поверхности.

Заметные отличия в качестве созданных полимерных слоев определяются, как и предполагалось, параметрами рельефа металлического покрытия и особенностями работы принтера.

Неудовлетворительное качество полученного комбинированного покрытия, созданного согласно схеме 1–ЭИЛ (рис. 5а), обусловлено выраженным нерегулярным рельефом поверхности металлического покрытия, несмотря на необходимую для пол-

ного покрытия выступов рельефа слоя адгезива, превышающего величину Ra_{max} . Тем не менее слой адгезива в процессе 3 печати был, вероятно, продавлен слоем полимера и не позволил полностью покрыть максимальные острые выступы полученного рельефа, что затруднило равномерное прилегание пластика к металлической основе.

Более качественно полимер нанесен на образец, подвергнутый первоначальному ЭИЛ по схеме 2 – ЭИЛ+УЗВ, что объясняется более гомогенной структурой поверхности полученного ЭИЛ-покрытия (табл.1) вследствие УЗ-обработки (рис. 5б). Самое качественное покрытие создано на образце, в котором ЭИЛ-покрытие формировали по схеме 3 – УЗВ+ЭИЛ+УЗВ, что позволило получить более равномерный и сглаженный рельеф его поверхности без острых выступов и глубоких впадин, обеспечив полное отсутствие выступов, нарушающих сплошность полимерного слоя после нанесения на ЭИЛ-покрытие слоя адгезива, толщина которого не превышала толщину в первых двух случаях (рис. 5в).

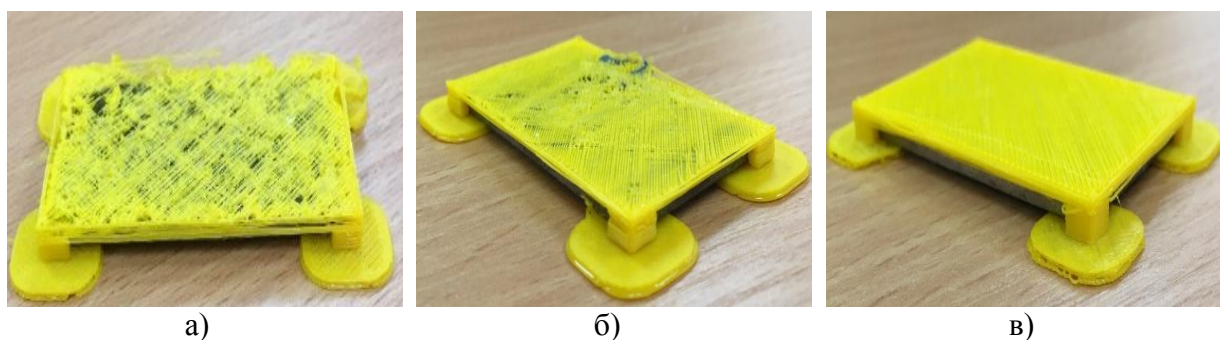


Рисунок 5. Внешний вид комбинированного покрытия металл – адгезив-полимер, полученного, согласно предложенному алгоритму:

- а) ЭИЛ-покрытие получено по схеме 1 – ЭИЛ;
- б) ЭИЛ-покрытие получено по схеме 2 – ЭИЛ+УЗВ;
- в) ЭИЛ-покрытие получено по схеме 3 – УЗВ+ЭИЛ+УЗВ.

Заключение.

Формирование работоспособного в условиях интенсивных механических и коррозионных воздействий композиционного покрытия на основе комбинации металла и полимера возможно осуществлять с применением аддитивных технологий: интегральным методом электроискрового легирования с дополнительным ультразвуковым воздействием для образования металлического покрытия толщиной не менее 60 мкм, регулярным рельефом и пористостью не более 3-5 %, с последующим нанесением на его поверхность слоя адгезива, имеющего высокое сродство к металлу и полимеру, толщина которого превышает высоту микронеровностей на поверхности металлического покрытия, и 3 D принтинга полимерного слоя на поверхность композиции металл-адгезив по разработанной объемной модели данной композиции с учетом ее геометрических параметров.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лазаренко, Н. И. Электроискровое легирование металлических поверхностей, / Н.И. Лазаренко, Б.Р. Лазаренко // Электронная обработка материалов.– 1977. – № 3. – С. 12-16.
2. Чигринова, Н. М. Инновации в электроискровых технологиях: теория и практика / Н. М.Чигринова // Монография. – Минск: «Бестпринт», 2018. – 262 с.

3. Верхотуров, А. Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании / А. Д.Верхотуров. – Владивосток: Дальнаука, 1995.–323 с.
4. Моделирование изделий из полимерных материалов методом 3D-печати [Электронный ресурс]. – 2015.– <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-izdeliy-iz-polimernyh-materialov-metodom-3d-pechati/viewer>: – Дата доступа 20.06.2020.
5. Макушин, А. П. Влияние шероховатости металлической поверхности на сцепляемость пластиковых покрытий / А.П.Макушин // Вестник машиностроения. – 1966. №7. – С. 32-34.
6. Чигринова, Н. М. Роль ультразвука в механизмах анодно-катодных взаимодействий при электроискровом легировании / Н. М. Чигринова, С. И. Ловыгин, В.Е. Чигринов // Наука и техника. – 2016. – №15(5). – С. 380-390.
7. Шандров, Б. В. Экспериментальные исследования влияния технологических факторов на прочность адгезионных соединений / Б.В.Шандров, М.В.Вартанов, И.Н. Зинина // Сборка в машиностроении и приборостроении. – Брянск, 2001. – С.77-80.
8. Гуль, В. Е. Взаимосвязь структуры и свойств полимеров / В.Е. Гуль // Новое в жизни, науке, технике. Серия "Химия". – Москва: Знание, 1975. – 62 с.
9. Николаева, Н. Д. Исследование, разработка и освоение технологии подготовки поверхности стальной полосы перед нанесением антикоррозионного полимерного покрытия: дис. ... канд. техн. наук / Н.Д. Николаева: М., 1978. – 132 с.
10. Пат. 2216412 РФ. Бауэр Н.И. – 20.11.2003.
11. Пат. 2305120 РФ, МПК8 C09J123/08, C09J131/04, C08L23/08. Адгезионная композиция / Губайдулин Ф. Р., Мазлова Т. В., Хузеева Н. Г., Чернова Н. В., Яхина О.А.. заявитель и патентообладатель ОАО "Татнефть" им. В.Д. Шашина; заявл. 18.05.06; опубл. 27.08.2007, Бюл. №24.
12. Расходные материалы для моделирования методом послойного наплавления (FDM/FFF) [Электронный ресурс]. – 2020.– Режим доступа <http://3dsfera.by/articles/materialy-dlya-3d-pechati/>: – Дата доступа 20.06.2020.
13. SolidWorks. Знакомимся с программой // Черчение [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.cherchenie.by/information/solidworks-znakomimsya-s-programmoj>. – Дата доступа: 07.03.2020.

Поступила в редколлегию 12.02.2022 г.