ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/343

**ФОРМИРОВАНИЕ НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДАМИ
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКИ И ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

Зимоглядова Т.А., Корниенко Е.Е., Дробяз Е.А., Егорова А.С.

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

Изготовление деталей с использованием технологий аддитивного производства является перспективным направлением развития современного машиностроения. В качестве прекурсора для 3D печати используют порошки или проволоку. Следует отметить, что выращивание изделий из проволоки более технологично, ввиду пониженной вероятности загрязнения выращиваемого материала кислородом, а также более низкой цены прекурсора [1].

Сплавы на никелевой основе широко применяются в тех случаях, когда от изделия одновременно требуется высокая коррозионная стойкость и жаростойкость. Наиболее часто для аддитивного производства используют никелевые сплавы марок Inconel 718 и Inconel 625. В ряде сплавов дополнительно присутствуют упрочняющие фазы (например, карбиды, бориды или силициды), повышающие твердость и износостойкость материалов. Тем не менее, низкая пластичность этих материалов не позволяет получать длинномерную проволоку, которую затем можно было бы свернуть в бухту, обеспечив, тем самым, загрузку большего количества материала для выращивания по технологии аддитивного производства. Применение порошковой проволоки в качестве материала прекурсора является технологичным решением отмеченной проблемы.

Технология послойного выращивания деталей с применением электронного луча (ЕВМ – electron beam melting) отличается высокой производительностью, возможностью обработки материалов, подвергающихся окислению, минимальными остаточными напряжениями на обрабатываемой детали. Метод наплавки электронным лучом, в классической интерпретации способа, реализуется в среде вакуума. Данная особенность накладывает ряд существенных ограничений на габаритные размеры обрабатываемой детали. Повышение энергии электронов до значений МэВ диапазона ($\sim 1 - 1,5$) решает данную проблему, позволяя вывести электронный луч за пределы вакуумной среды [2].

Цель настоящей работы заключается в изучении структурных особенностей поверхностных слоёв на основе никельсодержащего сплава, сформированных с использованием технологии многопроходной наплавки электронным лучом, выведенным в воздушную атмосферу.

В качестве материала для формирования покрытий использовали промышленный самофлюсующийся порошок на основе никеля марки ПР-Н77Х15СЗР2 (осн. – Ni, 15.1 % Cr, 2 % В, 3.2 % Si, 2.1 % Fe). Выбор данного материала объясняется наличием в составе кремния и бора, являющихся флюсующими компонентами, защищающими наплавляемый слой от окисления. В качестве основного материала использовали пластины из низкоуглеродистой стали 20 (осн. – Fe; 0.21 % С; 0.3 % Si; 0.63 % Mn; 0.15 % Ni; 0.02 % S; 0.015 % P). Наплавка осуществлялась на промышленном ускорителе ЭЛВ-6 в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (г. Новосибирск). Наплавка никельсодержащего сплава осуществлялась за 1, 2 и 3 прохода, по следующим режимам: ток пучка – 25 мА, скорость перемещения образца: 15 мм/с, дистанция между выпускающим отверстием и заготовкой – 90 мм.

В качестве сравнения были выбраны образцы с покрытиями из порошка ПР-Н77Х15СЗР2, полученными атмосферным плазменным напылением (АПН). АПН производили на установке «Термоплазма 50-01», в Институте прикладной и теоретической механики СО РАН (г. Новосибирск). Для получения слоев с низкой пористостью применяли оригинальный узел кольцевого ввода порошка. Режимы плазменного напыления: ток дуги – 140 А; напряжение – 265 В, дистанция напыления – 170 мм.

Объектами для структурных исследований и дюрOMETрических испытаний являлись микрошлифы, подготовленные по стандартной методике. Для выявления микроструктуры

Секция 7. Аддитивные технологии формирования материалов, изделий и конструкций с иерархической структурой

покрытий использовали травитель на основе HCl , HNO_3 и FeCl_3 . Структурные исследования были проведены на оптическом (Axio Observer A1m) и растровом электронном микроскопе (EVO50 XVP), оснащённом микроанализатором EDS X-Act фирмы Carl Zeiss. Дифрактограммы регистрировали в режиме времени $t = 5$ с с шагом $\Delta 2\theta = 0,05^\circ$. Микротвердость структурных составляющих покрытий оценивали на микротвердомере Wolpert Group 402MVD при нагрузке 100 Н. Наличие дефектов по объёму сформированных материалов исследовали с применением метода рентгеновской компьютерной томографии на приборе GE Nanotom M совместно со специалистами Университета прикладных наук г. Ландсхут (Германия).

Покрытия, сформированные методом АПН, состоят из расплавленных в плазменной струе и пластически деформированных частиц. Наплавленный слой, сформированный методом ВЭЛН, характеризуется литым строением. Интенсивный отвод тепла вглубь подложки в процессе наплавки способствует формированию около наплавленного металла зоны термического влияния, толщина которой не превышает 300 мкм. Микроструктура слоёв, сформированных по технологии ВЭЛН за 2 и 3 прохода идентична материалу, сформированному за 1 проход, и отличается лишь толщиной наплавленного слоя.

Метод рентгеновской компьютерной томографии позволяет отследить расположение и протяженность дефектов по всему объёму исследуемого материала. Результаты исследований не противоречат металлографическим исследованиям – в покрытиях, сформированных методом АПН, в стыках между «сплэтами» присутствуют поры сложной формы. В многослойных материалах, сформированных методом ВЭЛН выявлено наличие трещин. Методом рентгенофазового анализа было установлено, что основными фазами покрытий, полученных при помощи АПН, являются: $\gamma\text{-Ni}$, Ni_3B , CrB и Cr_7C_3 . Анализ рентгенограммы материала, полученного по технологии ВЭЛН, позволил установить наличие $\gamma\text{-Ni,Fe}$, $\alpha\text{-Fe}$, а также фазы Fe_2B . Присутствие железа в наплавленных слоях объясняется его переходом из материала основы и является негативным фактором, сказывающимся на эксплуатационных характеристиках полученных материалов.

Более глубокие структурные исследования материалов, сформированных с использованием технологий АПН и ВЭЛН были проведены при помощи растровой электронной микроскопии. В плазменных покрытиях установлено наличие твёрдого раствора $\gamma\text{-Ni}(\text{Cr, Si, Fe})$. Также зафиксирована эвтектика $\text{Ni-Ni}_3\text{B}$. Материал, сформированный методом ВЭЛН за 1 – 3 прохода, состоит из дендритов $\gamma\text{-Ni}$, Fe , вытянутых в вертикальном направлении. Определён состав эвтектики, кристаллизующейся в форме розеток: $\gamma\text{-(Ni, Fe)-CrB}$. Установлено, что уровень микротвердости слоёв, наплавленных методом ВЭЛН, находится в диапазоне 400...450 HV. Микротвердость покрытий, сформированных по технологии АПН, составляет 650...700 HV.

Таким образом установлено, что покрытия, полученные ВЭЛН, имеют литое строение, тогда как плазменные покрытия состоят из оплавленных в плазменной струе, а также пластически деформированных частиц. Рентгенофазовым анализом показано, что фазовый состав плазменных покрытий и покрытий, полученных при помощи ВЭЛН, отличается. Основными фазами плазменных покрытий являются: $\gamma\text{-Ni}$, Ni_3B , CrB и Cr_7C_3 , покрытий, полученных ВЭЛН: $\gamma\text{-Ni,Fe}$, $\alpha\text{-Fe}$ и Fe_2B . Микротвердость плазменных покрытий выше, чем покрытий, полученных ВЭЛН (400...450 и 650...700 HV, соответственно).

"Работы выполнены при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.610.21.0013, идентификатор проекта RFMEFI61017X0013)".

1. М.А. Зленко, А.А. Попович, И.Н. Мутылина. Аддитивные технологии в машиностроении: // СПбГТУ, Санкт-Петербург, 2013: Изд-во СПбГТУ, 2013. С. 210
2. Голковский М.Г., Закалка и наплавка релятивистским электронным пучком вне вакуума. - LAP LAMBERT Academic Publishing, Германия, 2007. – 325 с.