

УДК 621.789

**Е. В. Овчинников**, д-р техн., проф.

Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Беларусь

Тел./Факс: +375 (152) 684108; E-mail: ovchin@grsu.by

**МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГИБРИДНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ НА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЯХ**

*В статье представлены результаты исследований морфологии нанокomпозиционных покрытий, полученных по аддитивным технологиям путем совмещения методов электроискрового легирования и физического осаждения в вакууме (PVD). Показано, что морфология покрытий зависит от технологических методов формирования покрытий, что оказывает существенное влияние на прочностные, триботехнические свойства. При сочетании данных технологий получения гибридного покрытия возможно формирование MAX-фаз и нанофаз в структуре электроискрового подслоя, а также образование наноструктур в получаемом алмазоподобном слое. Формирование АПП покрытий приводит к уменьшению количества дефектов в подслое, сформированном методом электроискрового легирования. Применение данного технологического подхода приводит к улучшению физико-механических характеристики модифицируемых стальных субстратов. Предполагается, что формирование на поверхности стальных субстратов гибридного покрытия должно приводить к оптимальным триботехническим характеристиками в различных трибологических системах.*

**Ключевые слова:** вакуум, электроискровое легирование, покрытия, морфология, топография.

**Y. Auchynnikaŭ****MORPHOLOGICAL FEATURES OF HYBRID MULTILAYER COATINGS FORMED ON CARBON STEEL**

*The article presents the results of studies of the morphology of nanocomposite coatings obtained by additive technologies by combining the methods of electrospark alloying and physical deposition in vacuum (PVD). It is shown that the morphology of the coatings depends on the technological methods of coating formation, which has a significant effect on the strength and tribological properties. With the combination of these technologies for obtaining a hybrid coating, the formation of MAX phases and nanophases in the structure of the electrospark sublayer, as well as the formation of nanostructures in the resulting diamond-like layer, is possible. The formation of DLC coatings leads to a decrease in the number of defects in the sublayer formed by the method of electrospark alloying. The application of this technological approach leads to an improvement in the physical and mechanical characteristics of the modified steel substrates. It is assumed that the formation of a hybrid coating on the surface of steel substrates should lead to optimal tribological characteristics in various tribological systems.*

**Keywords:** vacuum, electrospark doping, coatings, morphology, topography.

**Введение.**

Наиболее распространённым вакуумными покрытиями являются TiN и соединения карбидов и карбонитридов титана. В настоящее время, тонкие слои TiN толщиной 5 мкм применяются в подшипниках и в широком диапазоне нагрузочно-скоростных параметров. Данные покрытия применяются для модифицирования таких изделий как: сверла, редуктора, направляющие для станков различного функционального назначения, штампы, литьевые формы, хонинговальные инструменты, инструмент для обработки металлов и дерева, мелющих тел для мельниц и т.п. Нанося покрытия на данный инструмент, можно улучшить их эксплуатационный ресурс до трех раз, в ряде случаев десятикратно.

Формирование покрытий на режущих кромках обрабатываемого инструмента позволяет повысить качество поверхности и скорость обработки изделий. Тонкий, устойчивый к истиранию слой, имеющий золотой цвет, используются для обеспечения

устойчивости к царапинам в медицинских и декоративных изделиях, таких как ланцеты, скальпели, протезы и металлические корпуса для часов. Значение характерной температуры для формирования покрытий на поверхности твердой подложки находится в области  $400^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$ . Обычно при такой температуре формируются покрытия, предназначенные для трибологических приложений, но тонкие вакуумные слои для декоративных целей могут осаждаться при более низких температурах, находящихся в пределах  $150^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$  [1].

Хотя покрытия на основе TiN имеют самый широкий спектр применения в качестве тонких износостойких слоев, в последнее время они применяются в ограниченном масштабе. Это обусловлено интенсификацией исследований и разработки новых составов и технологий формирования покрытий на основе карбида титана, карбонитрида титана, нитрида титана-алюминия и гафния, хрома, карбида или нитрида циркония [2]. Данные покрытия получают вакуумным напылением, основным представителем которого является PVD. Это обусловлено технологической простотой формирования покрытия, а также тем, что PVD является одним из первых методов получения вакуумных покрытий.

Однако на данный метод существует ряд ограничений, одним из основных является формирование поверхностного слоя, содержащего радиационные дефекты и приводящие поверхность подложки к ионизации, что отрицательно сказывается на адгезионных характеристиках покрытий, скорости роста и формируемой структуры. Для уменьшения данного эффекта в ряде случаев применяют напыление промежуточных материалов, позволяющих нивелировать данный эффект, но это приводит к усложнению технологического цикла и в ряде случаев не приводит к значимому увеличению физико-механических характеристик покрытий.

Вакуумное испарение обычно может выполняться при высоком вакууме ( $10^{-2}$  Па –  $10^{-5}$  МПа), в котором длина свободного пробега атома газа (т. е. средний пробег атомом до попадания в другие атомы) соизмеримо с размерами вакуумной камеры. Поскольку это длина свободного пробега атома намного больше размеров вакуумной камеры, то испарившийся атом проходит прямой путь до подложки и формирует покрытие. Для увеличения площади нанесения покрытия необходимо физическое перемещение испаряемого катода или пространственное перемещение подложки, что и реализуется в большинстве конструкций вакуумных камер.

При испарении как металлов, так и неметаллов формируется газовый пар, содержащий большое количество одиночных или сгруппированных атомов. В ряде случаев данные атомы сильно ионизированы. За исключением случая ионизации, энергия частиц очень мала и недостаточно велика для испарения (около  $0,1 - 1$  эВ). В процессе формирования покрытия, подложка может не только разогреваться, но и охлаждаться. Среди вакуумных процессов формирования покрытий метод PVD имеет самую высокую скорость вакуумного испарения  $75 \text{ мкм мин}^{-1}$ ; однако наиболее оптимальная скорость формирования покрытия находится в области до  $2 \text{ мкм мин}^{-1}$ . Для увеличения адгезионных свойств покрытий возможно формирование промежуточных слоев материалов, обладающих наибольшей адгезионной прочностью к модифицируемому субстрату. Однако адгезия существенно зависит от чистоты субстрата, что достигается путем ионной бомбардировки поверхности подложки. Но применение данной технологии может приводить к уменьшению значений адгезионной составляющей покрытий к подложке [1-2].

Покрытия TiN в большинстве случаев применяются в качестве тонких износостойких слоев. Однако в настоящее время наметилась тенденция замены данного по-

крытия на рынке тонкослойных покрытий на составы с другими материалами, такими как карбид титана, карбонитрид титана, нитрид титана-алюминия и гафний, хром или карбид или нитрид циркония. Это обусловлено также тем, что при температуре выше 500°C нитрид титана переходит в оксид титана, имеющий низкие адгезионные характеристики к металлическим подложкам, а также высокие значения внутренних напряжений, приводящих к растрескиванию покрытий.

Проводимые исследования по определению оптимальных составов вакуумных покрытий показывают преимущество использования многослойных покрытий, которые позволяют существенно улучшить эксплуатационные характеристики модифицируемых поверхностей твердых тел. В оптико-электронной сфере производственной деятельности методы PVD позволяют изготавливать устойчивые к царапинам и огнестойкие покрытия из металлических испаряемых компонентов и их комбинаций. Также существует подходящий рынок сбыта для тонких (<0,1 мкм), прозрачных покрытий, проводящих слоев In – Sn, которые наносятся в качестве антиобледенительных слоев на стекла автомобилей и при строительстве зданий, включающих в свою конструкцию большую долю стеклянных панелей. Сегодня упор при производстве изделий с покрытием делается на тонкие слои с высокими триботехническими свойствами, которые получают из металлов и, реже, из их сплавов. Кроме того, для защиты от коррозии применяются покрытия из Al и Cd. Еще одно применение вакуумных покрытий – это формирование контактных покрытий на концах алюминиевых и медных проводников в ряде электронных устройств.

Однако цель и область применения этих методик PVD заключается в нанесении тонких вакуумных слоев материала, в том числе металлов, сплавов и их комбинаций, осаждение которых невозможно осуществить электроосаждением. В настоящее время ряд методов PVD составляют друг другу конкуренцию, особенно это касается случаев, когда принимается решение по выбору метода подачи реакционного газа в вакуумную камеру. В 20 веке применение данных технологий вакуумного нанесения приводило к различным свойствам формируемых покрытий, несмотря на нанесение одинаковых исходных материалов. В настоящее время различия различными методами PVD, фактически нивелированы благодаря лучшему времени различия характеристик вакуумных покрытий, получаемых из материалов одинакового контролю и автоматизации процесса. Исходя из выше изложенного, можно утверждать, что применение тех или иных вакуумных покрытий обусловлено не лучшими техническими характеристиками, а в большей части определяются коммерческими аспектами.

Целью исследований являлось морфологии и свойств многофункциональных покрытий на основе металлических и углеродных матриц, получаемых путем сочетания магнитоуправляемых потоков многокомпонентной реакционной среды и плазменного нанесения.

#### **Методика эксперимента.**

Композиционные многослойные покрытия на базе алмазоподобных соединений, нитридов, карбидов титана, кобальта, вольфрама наносили методами реактивного электродугового испарения, электроискрового легирования на установках УРМЗ 279.048 и UR-121. В качестве подложек использовал различные марки стали Р6М5 и 4Х5МФС. Поверхность подложек из стали подвергали закалке до HRC 53 – 60 и шлифовке до чистоты не ниже 10 класса.

В качестве объекта исследований использовали алмазоподобное покрытие (АПП) толщиной от 0,48 мкм до 2 мкм, полученное на серийной установке вакуумного напыления УВНПА-1-001, состоящей из ионного источника, источника плазмы ста-

ционарного катодно-дугового разряда с металлическим катодом, источника плазмы импульсного катодно-дугового разряда с катодом из графита. Формирование покрытий проводили при следующих условиях: емкость основной батареи конденсаторов – 2150 мкФ, частота генерации импульсов – 2 Гц, число импульсов – 17000.

Проводилась предварительная обработка стальных субстратов методом электроискрового легирования. В качестве электродов использовали сплавы ВК6, Т15К5. Формировался сверхтвердый подслои на поверхности металлической подложки толщиной порядка 40 мкм. Подслои формировали при различных технологических режимах. Согласно технической документации на прибор UR-121 данные технологические режимы соответствовали параметрам установки Norma 1, Norma 2, Norma 3.

Анализ особенностей структуры металлических покрытий и их модификаций материалов, подвергнутых различным видам обработки, осуществляли на универсальном металлографическом комплексе ЗАО «Спектроскопические системы». Топографию защитных слоев определяли на профилометре «Surftest SJ-210».

#### **Результаты исследований.**

Повышение тепловой стойкости металлообрабатывающего инструмента напрямую связано с повышением эксплуатационных характеристик изделий, т.к. в зоне резания на микроучастках возникают области с температурой плавления намного выше температуры плавления исходного материала. Возникающие экстремальные условия соответствуют режимам эксплуатации лопаток турбин авиационного двигателя [3]. Таким образом, подходы, применяемые для увеличения эксплуатационных характеристик конструктивных элементов турбин за счет создания термостойких барьерных покрытий, можно использовать при модифицировании различного типа обрабатывающего инструмента.

Современный подход для создания термобарьерных покрытий заключается в получении керамического верхнего покрытия из оксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия (YSZ), металлического связующего покрытия (BC, MCrAlYX, M = Ni / Co, X = Hf, Ta, Re, Si) и подслоя жаропрочного сплава на основе Ni. В настоящее время данный тип покрытий обычно производят либо путем электронно-лучевого физического осаждения из паровой фазы (EB-PVD) или атмосферным плазменным напылением (APS) [4-6].

Однако основным недостатком покрытий YSZ является ограничение температурного рабочего интервала значением 800 С при длительном времени эксплуатации в рабочих условиях. Эксплуатация данного типа покрытий при более высоких температурах, чем вышеуказанная, приводит к перекристаллизации в структуре слоев, полученных вакуумным напылением. Структурные превращения, высокие внутренние напряжения, возникающие при разогреве до выше указанной температуры с последующим резким охлаждением, приводят к образованию трещин в объеме покрытия.

Чтобы уменьшить влияние данных недостатков в ТБП интенсифицировался поиск новых материалов, составов и технологий, в последнем десятилетии. Предлагаются материалы на основе  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ , муллит,  $CaO/MgO + ZrO_2$ ,  $CeO_2 + YSZ$ , силикаты, алюминат лантана, циркон, композит металл – стекло, гранат ( $Y_3AlxFe_5 - xO_{12}$ ) и фосфат циркония ( $(Ca/Mg) Zr_4 (PO_4)_6$ ) [7].

В настоящее время к износостойким и термостойким вакуумным покрытиям предъявляются следующие основные требования: высокая температура плавления, отсутствие процессов перекристаллизации при нагреве изделия от комнатной температуры до температуры эксплуатации, низкая теплопроводность, химическая инертность, соответствие теплового расширения покрытия металлической подложке, хорошая адге-

зия к металлической подложке, низкая скорость спекания и микропористость в структуре покрытия [8] – [9]. В связи с этим предлагаются барьерные вакуумные покрытия, состоящие из нескольких слоев, формируемых различными технологиями. В частности, предлагается сочетание электроискрового метода нанесения покрытий (ЭИЛ) и метода вакуумного формирования EB-PVD.

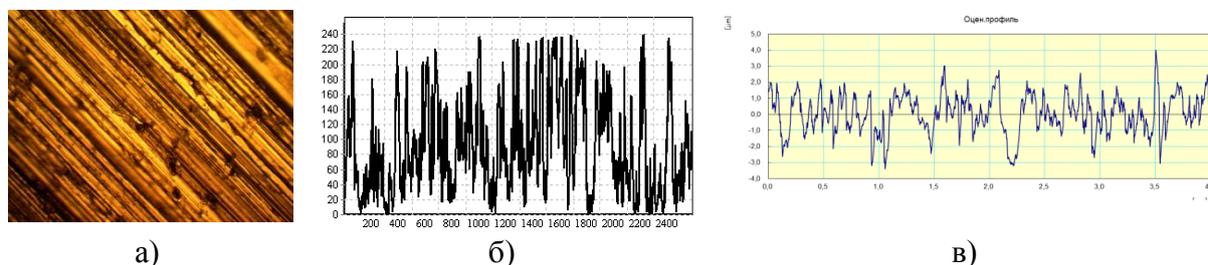


Рисунок 1. Морфология поверхности исходной стали 4X5МФС:  
а-морфология (x500), б-шероховатость (x500), в-топография.

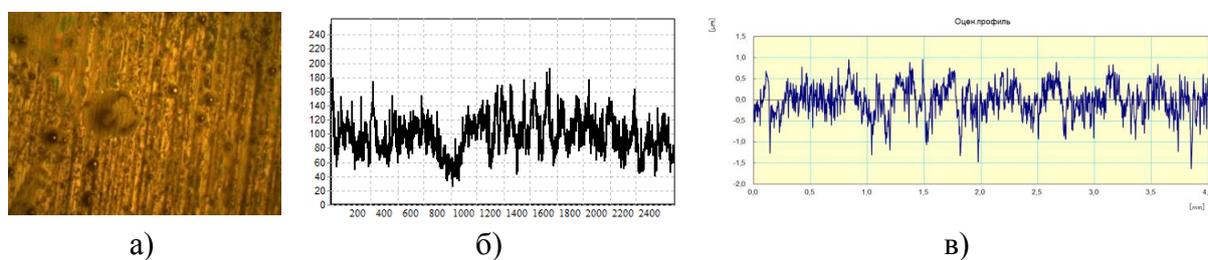


Рисунок 2. Морфология поверхности исходной стали 4X5МФС с покрытием АПТ:  
а -морфология (x500), б-шероховатость (x500), в-топография.

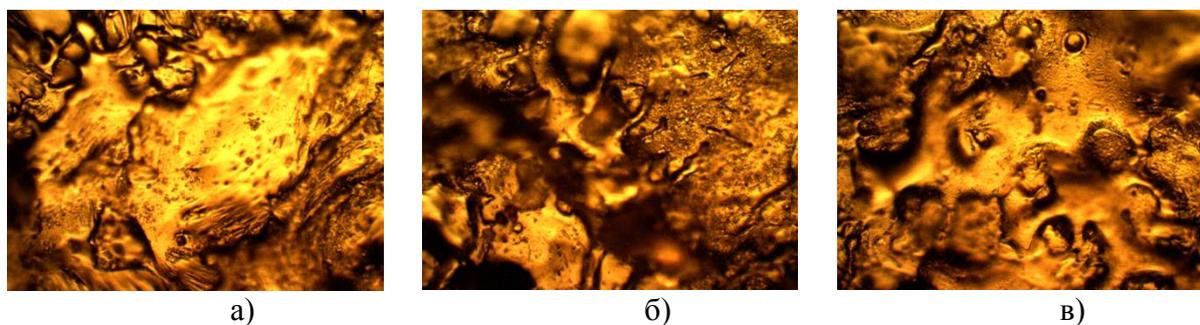
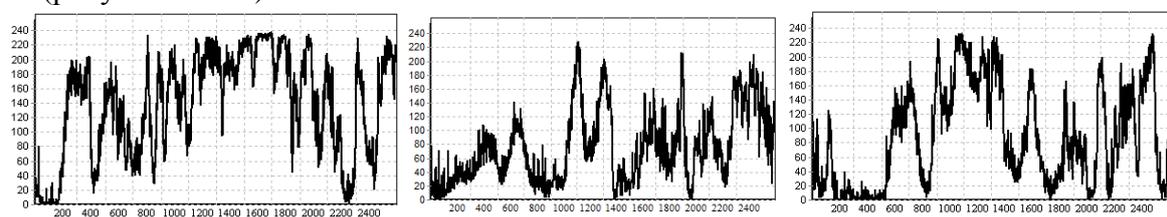


Рисунок 3. Морфология поверхностных слоев сплава Т15К6, сформированного на стали 4X5МФС методом электроискрового легирования: а – режим Norma 1, установка UR-121; б - режим Norma 2, UR-121; в - режим Norma 3, UR-121; (x500)

Метод электроискрового легирования заключается в явлении электрической эрозии и переноса материала анода на поверхность катода-детали при протекании импульсных (искровых) разрядов в газовой среде (воздухе, аргоне, азоте и др.) [10]. В результате образуется высокотвердый слой на поверхности субстрата с геометрическими размерами по толщине порядка 40 – 60 мкм. Формирование на данном подслое сверхтвердых вакуумных покрытий, например алмазоподобных (DLC) методом EB-PVD, должно приводить к образованию защитных покрытий, превосходящих по своим физико-механическим характеристикам образующих их твердые и сверхтвердые покрытия, т.е. при совмещении данных технологий и используемых материалов должен наблюдаться

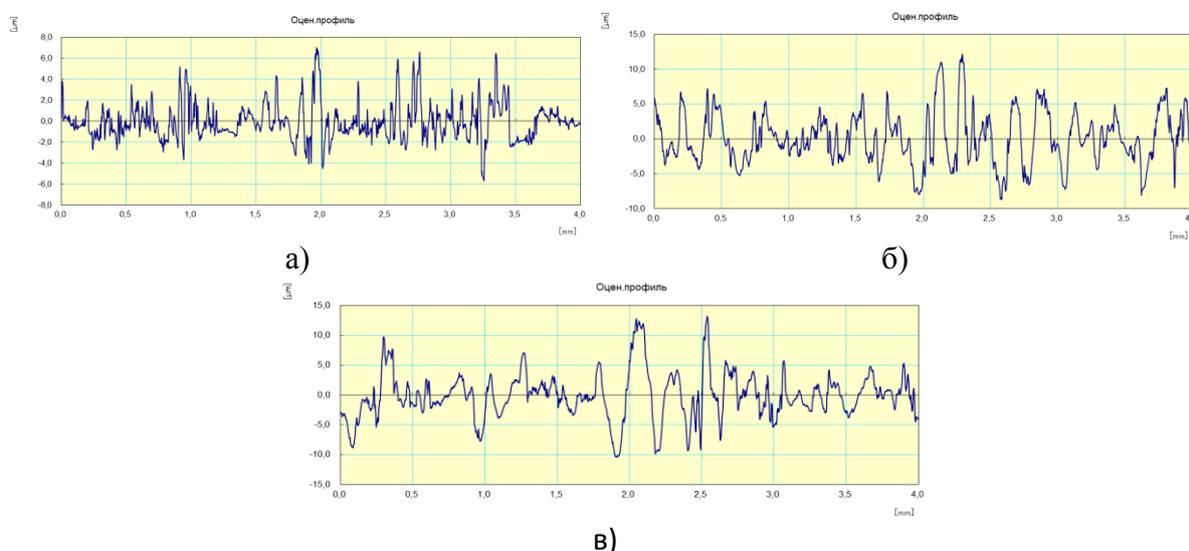
синергический эффект увеличения прочностных, антикоррозионных, антифрикционных, термостойких характеристик. В процессе исследований проведено изучение морфологии поверхностных слоев исследуемых подслоев и многофункциональных покрытий (рисунки 1 – 14).



а, б – режим Norma 1, установка UR-121; в, г – режим Norma 2, UR-121; д, е- режим Norma 3, UR-121 (данные получены с применением программного комплекса AutoScan)

Рисунок 4. Шероховатость поверхностных слоев сплава Т15К6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования

Согласно проведенных исследований, формирование алмазоподобных покрытий на стальных подложках 4Х5МФС и Р6М5 приводит к сглаживанию исходного рельефа. Значения шероховатости исходной поверхности стали 4Х5МФС составляют  $R_z \sim 5,9$  мкм, после формирования покрытия АПП значения  $R_z$  уменьшаются до значений  $\sim 2,7$  мкм. Аналогичный процесс наблюдается при формировании покрытия на стали Р6М5. Так, значения  $R_z$  для исходного субстрата составляют  $R_z \sim 3,9$  мкм, после формирования покрытия  $\sim 2,1$  мкм.



а – режим Norma 1, установка UR-121; б – режим Norma 2, установка UR-121; в – режим Norma 3, UR-121

Рисунок 5. Топография поверхностных слоев сплава Т15К6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования.

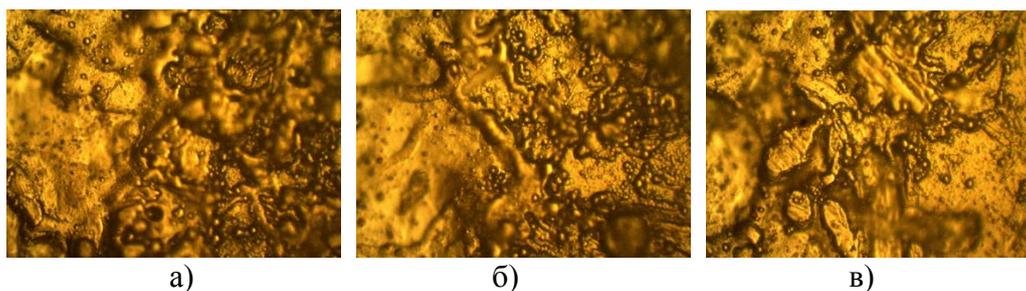


Рисунок 6. Морфология поверхностных слоев многофункционального покрытия АПП-Т15К6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования: а – режим Norma 1, установка UR-121; б - режим Norma 2, UR-121; в - режим Norma 3, UR-121; ( $\times 500$ )

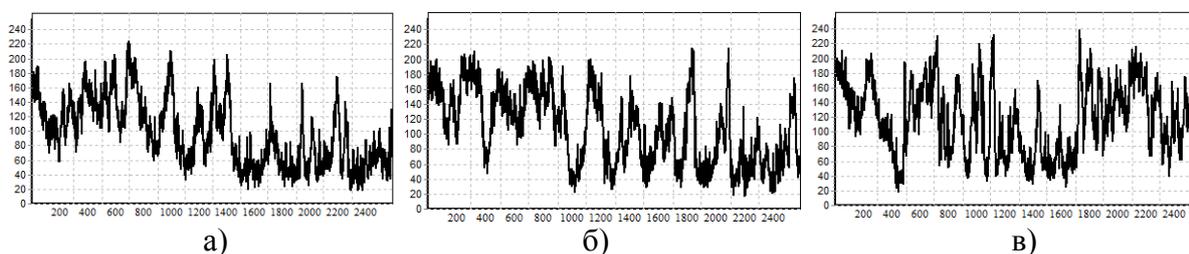


Рисунок 7. Шероховатость поверхностных слоев многофункционального покрытия АПП-Т15К6, сформированного на стали 4Х5МФС методом ЭИЛ: а – режим Norma 1, установка UR-121; б - режим Norma 2, UR-121; в - режим Norma 3, UR-121; (данные получены с применением программного комплекса AutoScan) ( $\times 500$ )

Нанесение подслоя из сверхтвердых сплавов ВК6 и Т15К6 на стальные субстраты 4Х5МФС и Р6М5 приводит к увеличению параметров шероховатости формируемого покрытия. Причем данное изменение параметров топографии увеличивается с возрастанием значений энергии импульса в электрическом разряде при проведении ЭИЛ процесса. Так, значение  $R_z$  для покрытий сплава Т15К6, сформированного на стальной подложке 4Х5МФС, для режима Norma 1 установки UR-121 составило  $\sim 9,7$  мкм, для режима Norma 2 –  $\sim 14,8$  мкм, для режима Norma 3 –  $\sim 17,8$  мкм.

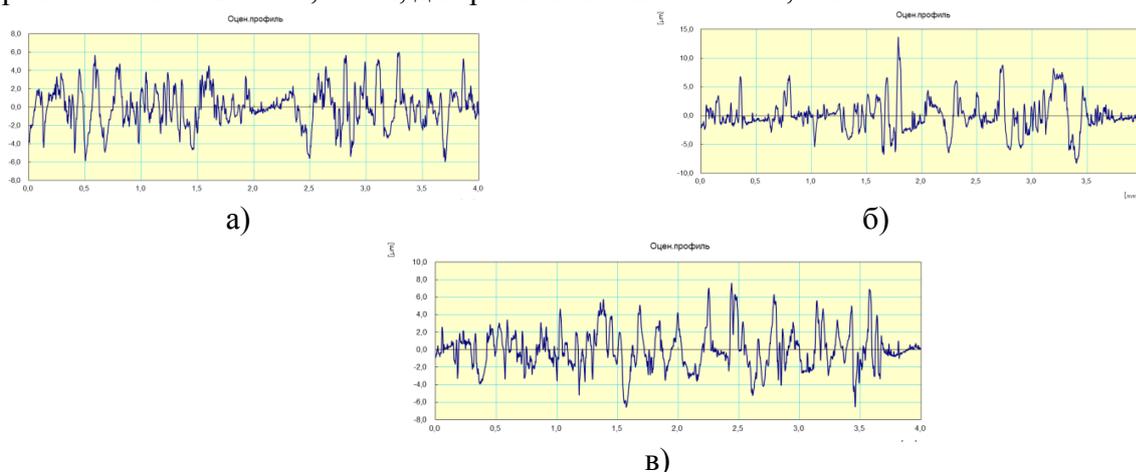


Рисунок 8. Топография поверхностных слоев многофункционального покрытия АПП-Т15К6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования а – режим Norma 1, установка UR-121; б – режим Norma 2, UR-121; в – режим Norma 3, UR-121

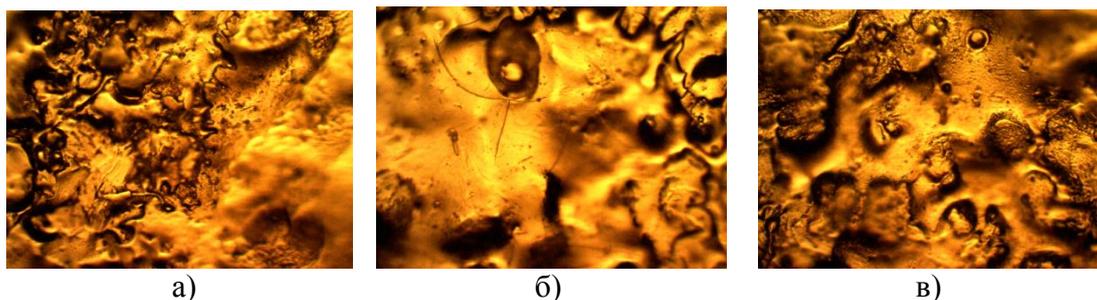
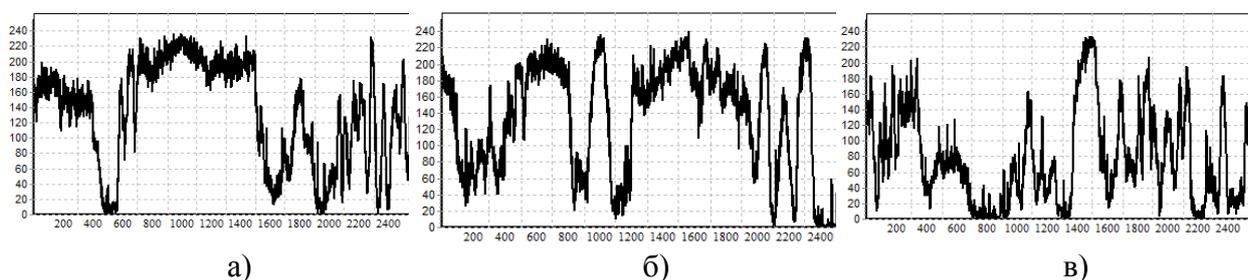
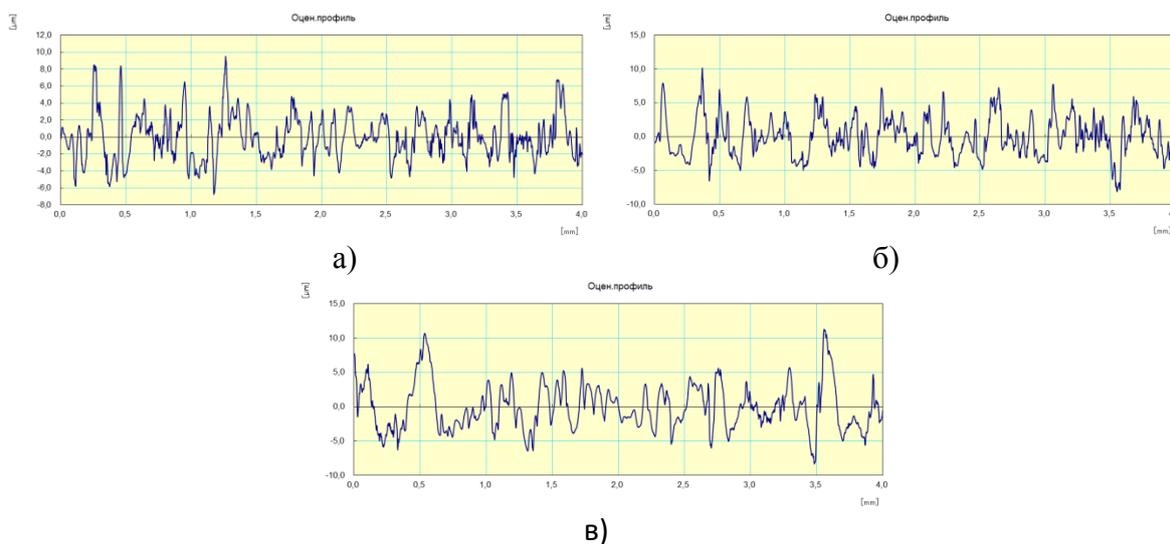


Рисунок 9. Морфология поверхностных слоев сплава BK6, сформированного на стали 4X5MFC методом электроискрового легирования: а – режим Norma 1, установка UR-121; б - режим Norma 2, UR-121; в - режим Norma 3, UR-121; ( $\times 500$ ).



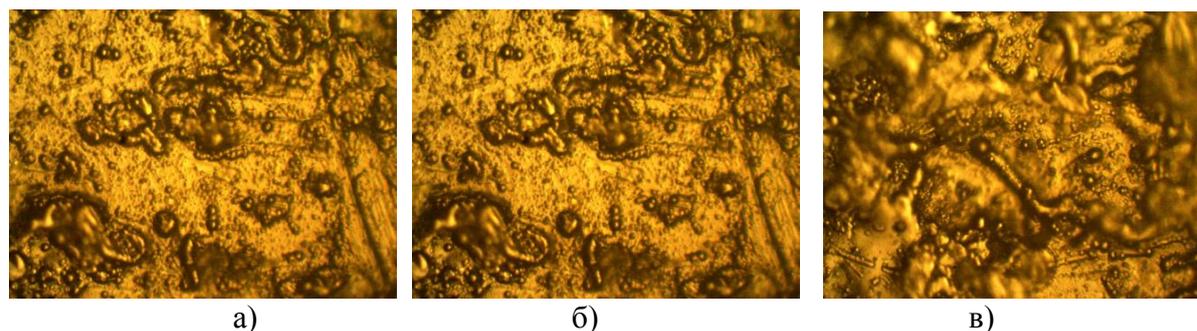
а – режим Norma 1, установка UR-121; б - режим Norma 2, UR-121; в - режим Norma 3, UR-121; (данные получены с применением программного комплекса AutoScan) ( $\times 500$ )

Рисунок 10. Шероховатость поверхностных слоев сплава BK6, сформированного на стали 4X5MFC методом электроискрового легирования.



а – режим Norma 1, установка UR-121; б – режим Norma 2, UR-121; в – режим Norma 3, UR-121

Рисунок 11. Топография поверхностных слоев сплава BK6, сформированного на стали 4X5MFC методом электроискрового легирования.



а – режим Norma 1, установка UR-121; б - режим Norma 2, UR-121;  
в - режим Norma 3, UR-121; ( $\times 500$ )

Рисунок 12. Морфология поверхностных слоев многофункционального покрытия АПП-ВК6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования

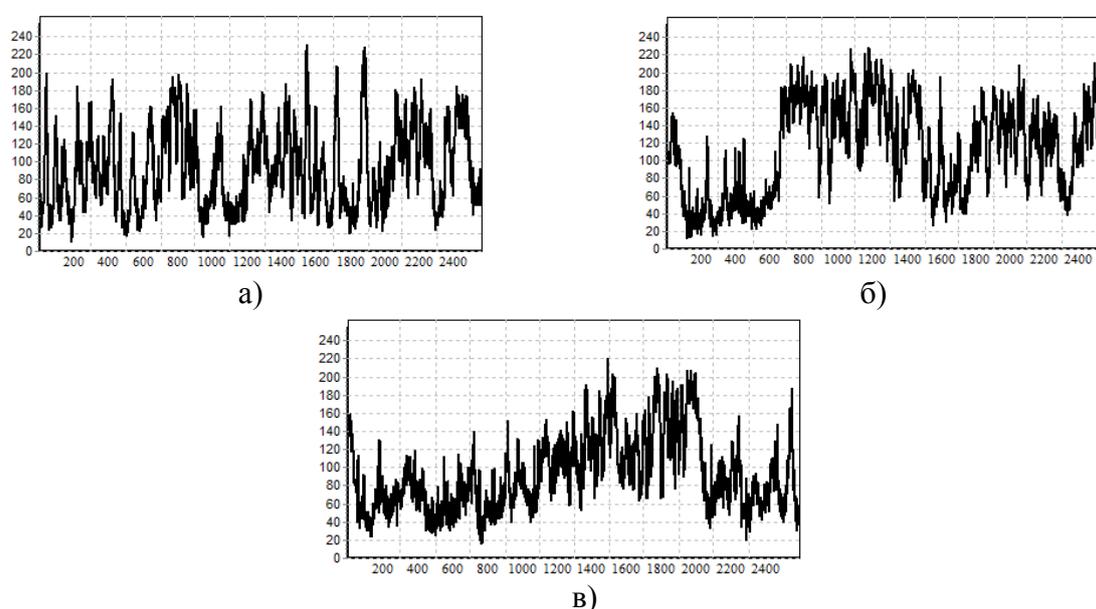


Рисунок 13. Шероховатость поверхностных слоев многофункционального покрытия АПП-ВК6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования: а, б – режим Norma 1, установка UR-121; в, г – режим Norma 2, UR-121; д, е – режим Norma 3, UR-121 (данные получены с применением программного комплекса AutoScan)

Значения  $R_z$  для покрытий сплава ВК6, сформированных на стальной подложке 4Х5МФС для режима Norma 1 установки UR-121 составило  $\sim 12,3$  мкм, для режима Norma 2 –  $\sim 13,3$  мкм, для режима Norma 3 –  $\sim 14,2$  мкм. При формировании покрытий Т15К6 на стальных субстратах Р6М5 для режима Norma 1 установки UR-121  $R_z$  составило  $\sim 8,1$  мкм, для режима Norma 2 –  $\sim 14,3$  мкм, для режима Norma 3 –  $\sim 16,8$  мкм. Значения  $R_z$  для покрытий сплава ВК6, сформированного на стальной подложке Р6М5, для режима Norma 1 установки UR-121 составило  $\sim 11,1$  мкм, для режима Norma 2 –  $\sim 12,3$  мкм, для режима Norma 3 –  $\sim 14,3$  мкм.

Формирование покрытий АПП на стальных субстратах с покрытиями из сверхтвёрдых материалов, в общем случае приводит к снижению параметров шероховатости

в 1,7 – 2,3 раза. Осаждение алмазоподобного покрытия на стальной субстрат 4Х5МФС, модифицированный электроискровым методом (ЭИЛ) электродами Т15К6 и ВК6, приводит к снижению значений шероховатости для всех режимов формирования многофункционального композиционного покрытия: покрытие ЭИЛ Т15К6 -АПП (режим Norma 1) –  $R_z \sim 8,7$  мкм; покрытие ЭИЛ Т15К6 -АПП (режим Norma 2) –  $R_z \sim 11,3$  мкм; покрытие ЭИЛ Т15К6 -АПП (режим Norma 3) –  $R_z \sim 14,1$  мкм; покрытие ЭИЛ ВК6 -АПП (режим Norma 1) –  $R_z \sim 10,7$  мкм; покрытие ЭИЛ Т15К6 -АПП (режим Norma 2) –  $R_z \sim 11,9$  мкм; покрытие ЭИЛ Т15К6-АПП (режим Norma 3) –  $R_z \sim 13,4$  мкм. Аналогичное явление наблюдается для покрытий АПП, сформированных на стальных субстратах, модифицированных методом ЭИЛ электродами Т15К6 и ВК6.

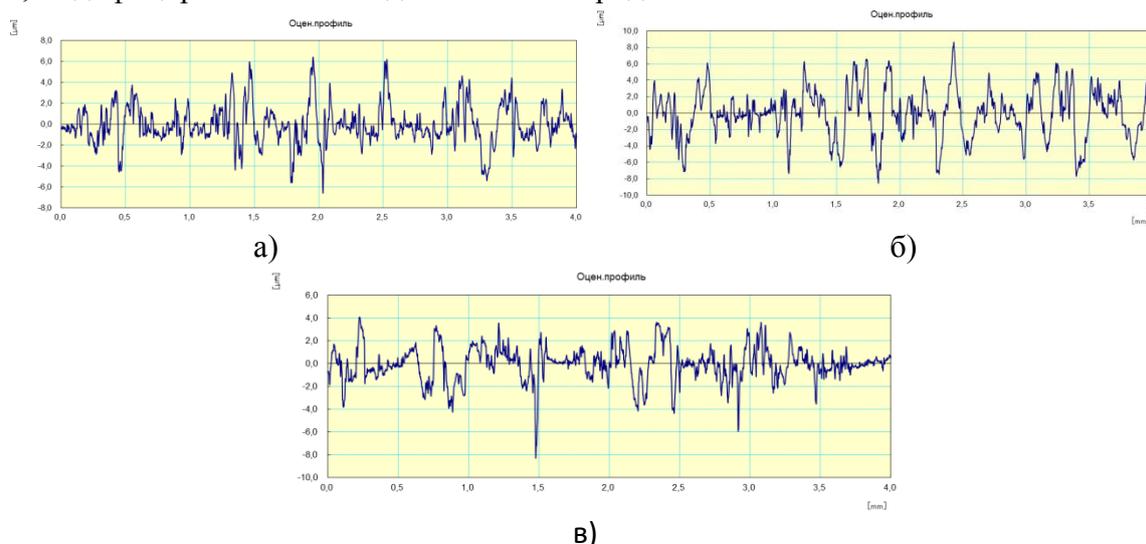


Рисунок 14. Топография поверхностных слоев многофункционального покрытия АПП-ВК6, сформированного на стали 4Х5МФС методом электроискрового легирования: а – режим Norma 1, установка UR-121; б – режим Norma 2, UR-121; в – режим Norma 3, UR-121.

Таким образом формируется многофункциональное покрытие, состоящее из стальной основы повышенной твердости, за счет модифицирования сверхтвердым материалом на основе соединений ВК6 и Т15К6, которое хорошо воспринимает большие внешние нагрузки различного типа: динамические, статические. Слои АПП, получаемые по вакуумным технологиям, плакируют поверхностные дефекты, которые характерны для ЭИЛ покрытий на стальных субстратах, одновременно выполняют роль триботехнического покрытия, имеющего низкий коэффициент трения и высокую износостойкость, что должно приводить к увеличению антифрикционных характеристик многофункциональных композиционных покрытий.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Olay, J. J., Piratoba U., Rodil S. E. Corrosion Resistance of CrN Coatings Deposited by Physical Vapor Deposition (PVD) with Unbalanced Magnetron Sputtering (UBM): Efficient and Environmentally Clean Technology. // Rev. Latin Am. Metal. Mat. – 2011. – Vol. 31. – P. 44 – 51.
2. Purandare Y. P., Ehiasarian A. P., Hovsepien P. E. Deposition of Nanoscale Multi-layer CrN/NbN Physical Vapor Deposition Coatings by High Power Impulse Magnetron Sputtering. // J. Vac. Sci. Technol., A. – 2008. – Vol. 26. – P. 288 – 296.

3. Cremer R. [et al.] Thermal stability of Al-O-N PVD diffusion barriers // Surf. Coat. Technol. – 1998. – Vol. 108 – 109. – P. 48 – 58.
4. Cao X. Q., Vassen R., Stöver D. Ceramic materials for thermal barrier coatings// J. Eur. Ceram. Soc. – 2004. – Vol. 24. – P. 1 – 10.
5. He L. M. Effects of EB-PVD Process TGO Formation and Growth within Thermal Barrier Coatings // Mater. Sci. Forum. – 2007. – Vol. 546 – 549. – P. 1781 – 1788.
6. Saruhan B. EB-PVD processing of pyrochlorestructured, La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-based TBCs // Surf. Coat. Technol. – 2004. – Vol. 182. – P. 175 – 183.
7. Cao X. Q., Vassen R., Stöver D. Ceramic materials for thermal barrier coatings// J. Eur. Ceram. Soc. – 2004. – Vol. 24. – P. 1 – 10.
8. Vaßen R. [et al.] New materials for advanced thermal barrier coatings // Proceedings of the 6th Liège Conference on Materials for Advanced Power Engineering, Université de Liège, Belgium, November 1998. – 1998. – P. 1627 – 1635.
9. Cemuschi F. [et al.] Thermal diffusivity/microstructure relationship in Y-PSZ thermal barrier coatings// J. Therm. Spray Technol. – 1999. – Vol. 8 (1). – P. 102 – 109.
10. Овчинников, Е. В. Структурные особенности нанокomпозиционных покрытий, получаемых методом электроискрового легирования / Овчинников Е. В. [и др.] // Горная механика и машиностроение. - 2020. - № 1. - С. 93-100.

Поступила в редакцию 15.03.22г.