

СПОСОБ НАНЕСЕНИЯ АЛМАЗОПОДОБНОГО PVD-ПОКРЫТИЯ НА МНОГОГРАННЫЕ ПОДЛОЖКИ

Королев А.В.¹, Охлупин Д.Н.², Синева И.В.³

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов;

²ООО ТехноТерм-Саратов», Саратов;

³Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов

Ключевые слова: покрытие, вакуумная камера, многогранная подложка, поворотный стол, шпиндель, адгезионная прочность.

Аннотация. Предложена технология формирования алмазоподобного PVD-покрытия на многогранных подложках в вакуумной камере. В вакуумной камере размещают поворотный стол, на котором установлены вращающиеся синхронно с ним шпиндели. Ось симметрии многогранных подложек совмещают с осью вращения шпинделя. На шпиндели устанавливают многогранные подложки. Направление вращения шпинделей противоположно направлению вращения поворотного стола. С внешней стороны поворотного стола установлен PVD-источник. Показано, что вблизи PVD-источника каждая многогранная подложка должна располагаться одной из своих граней в направлении к источнику. После каждого поворота вокруг оси поворотного стола по направлению к источнику должна располагаться следующая грань подложки. Такая технология обеспечивает высокую адгезионную прочность, однородность покрытия на всех гранях подложек и максимальную производительность нанесения покрытия. Приведено математическое выражение, обеспечивающее требуемое для осуществления предложенной технологии соотношение между числом граней подложки и частотами вращения поворотного стола и шпинделей.

METHOD OF APPLYING DIAMOND-LIKE PVD COATING ON POLYHEDRAL SUBSTRATES

Korolev A.V.¹, Okhlupin D.N.², Sineva I.V.³

¹Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A., Saratov;

²Technotherm-Saratov LLC, Saratov;

³Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov

Keywords: coating, vacuum chamber, polyhedral substrate, turntable, spin-del, adhesive strength.

Abstract. The technology of PVD coating formation on polyhedral substrates in a vacuum chamber is proposed. A rotary table is placed in the vacuum chamber, on which rotating spindles are mounted synchronously with it. The axis of symmetry of polyhedral substrates is combined with the axis of rotation of the spindle. Polyhedral substrates are installed on the spindles. The direction of rotation of the spindles is opposite to the direction of rotation of the turntable. A PVD source is installed on the outside of the turntable. It is shown that near the PVD source, each polyhedral substrate should be located with one of its faces in the direction of the source. After each rotation around the axis of the turntable in the direction of the source, the next face of the substrate should be located. This technology provides high adhesive strength, uniformity of the coating on all edges of the substrates and maximum coating performance. A mathematical expression is given that provides the ratio required for the implementation of the proposed technology between the number of faces of the substrates and the rotation frequencies of the turntable and spindles.

Введение. В настоящее время алмазоподобные покрытия деталей находят широкое применение в электронной, оптической, автомобильной, инструментальной и других отраслях промышленности [1-6]. Среди различных методов нанесения покрытий [7-10], особое место занимает метод физического осаждения пара в вакууме (PVD) [11-17]. По сравнению с другими методами этот метод нанесения покрытия обеспечивает повышенную твердость и износостойкость поверхности, имеет высокие антифрикционные свойства, обладает хорошей адгезией к подложке. Его отличают также относительно низкие температуры нанесения покрытия, что не нарушает структуру материала подложки, большие возможности управлять структурой покрытия, экологическая безопасность. Единственным

недостатком этого метода является высокая себестоимость получения покрытия и необходимость наличия дорогостоящего высокотехнологичного оборудования. Поэтому этот метод покрытия используется в наиболее ответственных случаях, например, для производства элементов микроэлектроники, силовой оптики лазеров с высокой мощностью излучения, хирургических скальпелей, бритв, подшипников, различного инструмента, деталей топливной аппаратуры двигателей внутреннего сгорания и многих других изделий, работающих в условиях повышенного трения и износа. Одной из таких деталей является деталь топливной аппаратуры дизельных двигателей «Призма». Высокая скорость потока топлива в сочетании с неизбежным наличием абразивных частиц в нем и возникновением кавитационных явлений приводит к быстрому износу этой детали. Нанесение алмазоподобного PVD-покрытия на поверхность этой детали позволило снизить коэффициент трения, повысить микротвердость и износостойкость и тем самым реализовать очередной шаг в повышении давления впрыска и значительно улучшить экологические показатели современных дизельных двигателей.

Однако при производстве этих деталей возникает проблема обеспечения однородности покрытия на всех гранях деталей. Решить эту проблему можно только при определенных условиях нанесения покрытия. К числу таких условий относятся следующие: 1) все грани многогранной подложки должны одинаково позиционировать относительно PVD-источника; 2) вблизи PVD-источника детали должны располагаться своими ребрами в его сторону; 3) Направление вращения подложек должно быть противоположно вращению планетарного механизма, на котором они установлены. В этом и заключается сущность предлагаемой технологии.

Устройство для нанесения покрытия. На рисунке 1 приведена предложенная авторами схема устройства для нанесения PVD-покрытия на многогранные подложки.

Устройство содержит вакуумную камеру 1, PVD-источник 2 и размещенный в центре вакуумной камеры 1 напротив PVD-источника симметрично по отношению к нему поворотный стол 3. На поворотном столе 3 равномерно по окружности установлены шпиндели 4 с возможностью их синхронного вращения в подшипниках (не показаны) со столом. На шпинделях 4 размещены многогранные подложки 5.

Поворотный стол 3 закреплен на валу поворотного стола 6, установленного в подшипниках, который получает вращение от двигателя (не показан), находящегося за пределами вакуумной камеры 1. Снизу поворотного стола 3 размещен передаточный механизм, который состоит из неподвижного зубчатого колеса 7, установленного по центру вращения вала поворотного стола 6, подвижных зубчатых колес 9, закрепленных на конце каждого шпинделя 4, и блок шестерен 8, передающих вращение от неподвижного зубчатого колеса 7 подвижным зубчатым колесам 9.

На поворотном столе 3 устанавливаются шпиндели 4 в количестве, определяемом равенством:

$$c = m \cdot \lambda + 1, \quad (1)$$

где c – число шпинделей, равномерно по окружности установленных на поворотном столе; λ – число граней подложек; m – целое число, определяемое габаритами подложек.

Передаточное отношение блока шестерен 8, передающих вращение от неподвижного зубчатого колеса 7 подвижным зубчатым колесам 9, используют равным:

$$i = c / \lambda. \quad (2)$$

Если соотношения (1) и (2) не соблюдать, то каждая грань подложки будет иметь свою траекторию перемещения относительно PVD-источника и будет получать от него различное воздействие. А это приводит к неоднородности покрытия различных граней.

Принцип работы описанного выше устройства поясняется рисунком 2, где показан вид сверху данного устройства.

Из рисунка 2 видно, что в исходном положении стол 3 установлен так, чтобы один из шпинделей 4 находился напротив PVD-источника 2. На шпинделях 4 поворотного стола 3 устанавливаются многогранные подложки 5 так, чтобы одно из ребер каждой подложки

находилось с наружной стороны стола в радиальном его направлении. В таком случае смежные грани каждой подложки изначально устанавливают симметрично диаметральной плоскости планетарного механизма так, что $b_1 = b_2 = \beta/2$ (рис. 1), где β -угол между смежными гранями подложки, рад.; b_1 и b_2 – угол между каждой смежной граней подложек 5 и радиальной плоскостью стола 3. Тем самым обеспечивается одно из важных условий осуществления технологического процесса – в зоне действия PVD-источника ребро, образуемое геометрическим пересечением граней подложки, располагалась против потока его излучения.

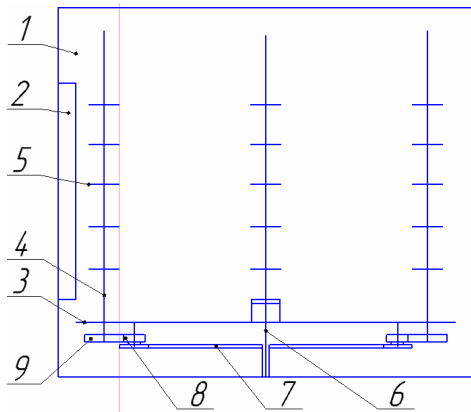


Рис. 1. Схема устройства для нанесения PVD-покрытия на многогранные подложки

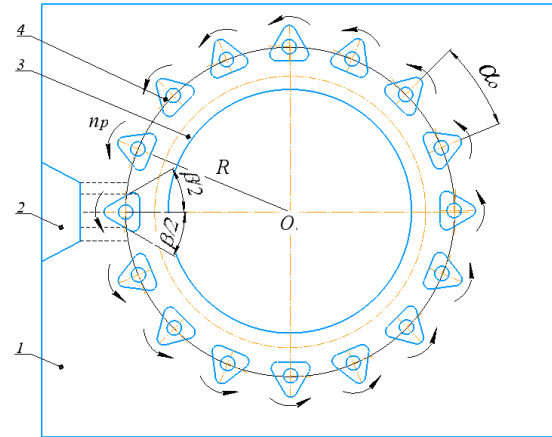


Рис. 2. Схема устройства для наесения PVD-покрытия – вид сверху

Из камеры 1 откачивают воздух и поджигают PVD-источник 2, инициируя вакуумный дуговой разряд между рабочей камерой (анодом) 1 и катодом (не показан). Одновременно включают вращение электродвигателя (не показан), который поворачивает вал поворотного стола 6 и сидящий на нем поворотный стол 3 вокруг оси O вала поворотного стола 6 с частотой n_k . При этом, блок шестерни 8 передаточного механизма начинает вращаться вокруг неподвижной шестерни 7, приводя во вращение подвижные зубчатые колеса 9, сидящие на конце шпинделей 4, в направлении, противоположном направлению вращения поворотного стола 3 с частотой

$$n_p = -n_k \cdot \left(m + \frac{1}{\lambda} \right), \quad (3)$$

где n_p – частота вращения шпинделей, об/мин; n_k – частота вращения стола планетарного механизма, об/мин.

Так как общее передаточное отношении передаточного механизма определяется равенством (2), то грани многогранных подложки 5 последовательно позиционируют относительно PVD-источника и в этот момент обращены к нему, получая от него одинаковое и максимальное воздействие. Это обеспечивает повышение стабильности качества PVD-покрытия.

Знак «минус» в равенстве (3) показывает, что вращение подложки осуществляется в направлении, противоположном вращения подложек вокруг их общего центра O . Это важно потому, что покрываемые грани более длительно позиционирует в зоне действия PVD-источника и все это время обращены под нужным углом к источнику. Это позволяет управлять формируемой структурой покрытия и потенциально сокращает потребное время осуществления покрытия и повышает производительность обработки.

При обеспечении соотношения (1) и (2) каждая подложка при повороте планетарного механизма на угол α_0 поворачивается на угол $2\pi/\lambda$, а при каждом новом повороте подложки относительно PVD-источника подложка обращается к PVD-источнику своим следующим ребром. Тем самым обеспечивается однородность условия покрытия каждой подложки и каждой грани подложки, а, следовательно, одинаковость покрытия. Тем самым решается поставленная задача повышения качества и стабильности качества покрытия.

Результаты эксперимента на неподвижных подложках. Влияние расположения подложки относительно PVD-источника 2 на качество покрытия подтвердили следующим экспериментом. Нанесение покрытия осуществляли при установке подложек на неподвижном поворотном столе при их различном положении относительно PVD-источника. Установили, что если подложка расположена своей плоской гранью в направлении PVD-источника, то PVD-покрытие не образуется, а на грани возникает толстый слой аморфного углерода. Если же подложки повернуты своим ребром к PVD-источнику, то на гранях, образующих ребро, осуществляется PVD-покрытие, а по краям третьей грани возникает небольшой слой аморфного углерода.

Объяснить указанное явление можно предположив, что движущей силой процесса PVD-покрытия является не только разность потенциалов между корпусом вакуумной камеры и катодом, но и разность давления в камере PVD-источника и вакуумной камере, где размещены подложки. Как только графит в камере PVD-источника под действием лазера переходит из твердого в газообразное состояние возникает давление газа, превышающее давление газа в вакуумной камере. Далее начинают действовать законы аэродинамики. Не встречая на своем пути почти никакие препятствия молекулы пара углерода с очень высокой скоростью устремляются в сторону вакуумной камеры, образуя аэродинамический поток. На пути этого аэродинамического потока возникают подложки.

Если подложка обращена к потоку плоской гранью, то поток пара вместе с заряженными частицами огибает ее, а непосредственно перед гранью образуется противодавление, и поэтому в эту зону могут попасть только «тяжелые» молекулы углерода под действием силы инерции. Они в результате сил межмолекулярного взаимодействия осаждаются на поверхности грани подложки. Другая часть молекул пара осаждается на стенках вакуумной камеры, тем поддерживая разность давлений в вакуумной камере.

Если подложка обращена к потоку пара ребром, то поток плавно скользит вдоль боковых граней подложки, и заряженные частицы под действием разности потенциалов осаждаются на поверхности боковых граней, образуя покрытие.

Конечно, при вращении подложек каждая подложка своей плоской гранью может быть обращена к PVD- потоку очень короткое время, и поэтому на подложках в любом случае возникает PVD- покрытие. Но для повышения производительности и качества покрытия все же следует располагать подложки вблизи PVD- источника, где процесс покрытия осуществляется наиболее интенсивно, ребром к направлению потока пара, а вращать подложки следует в сторону, противоположную вращению поворотного стола, чтобы ребро подложки как можно дольше было направлено против потока.

Испытание предложенной технологии проводились в ООО «ТехноТерм-Саратов». Алмазоподобному углеродному наноструктурированному PVD-покрытию подвергались трехгранные ($\lambda = 3$) детали типа «Призма», имеющие центральное отверстие. Покрытие осуществляли на вакуумной установке DREVA 600. Вакуумная камера снабжена прямоугольным PVD-источником и планетарным механизмом, расположенным симметрично относительно PVD-источника. Частота вращения стола планетарного механизма составляла $n_k = 3$ об/мин. На столе планетарного механизма размещены 16 шпинделей, что соответствует равенству (1) и (2) при $m = 5$. Оси вращения шпинделей направлены вдоль оси вращения стола планетарного механизма. На шпиндели своими отверстиями нанизывались детали по высоте PVD-источника. Подложки при установке на шпиндели ориентировали так, чтобы две смежные грани, подвергающиеся покрытию, располагались симметрично диаметральной плоскости стола планетарного механизма ($\beta/2$), а образующее их ребро было направлено наружу. Один из шпинделей устанавливали напротив PVD-источника так, что плоскость симметрии PVD-источника проходила через ось вращения этого шпинделя и ось вращения стола планетарного механизма. В таком случае две пересекающиеся грани подложки располагались симметрично относительно потока PVD-источника.

Частоту вращения шпинделей с закрепленными на них подложками установили равной:

$$n_p = 3 \cdot \left(5 + \frac{1}{3} \right) = 16 \text{ об/мин.}$$

Направление вращения шпинделей было противоположным вращению стола.

Испытания показали, что при таких параметрах осуществления PVD-покрытия формируется плотная аморфная структура углеродного покрытия с высокими микротвердостью и адгезией к подложке. Разноразмерность толщины покрытия на гранях подложек не превышала 10% от толщины покрытия, что обеспечило решение задачи повышения качества покрытия.

Заключение

1. На основании выполненного эксперимента по нанесению PVD-покрытия на неподвижные подложки показано, что если подложка расположена своей плоской гранью в направлении PVD-источника, то PVD-покрытие не образуется, а на грани возникает толстый слой аморфного углерода. Если же подложки повернуты своим ребром к PVD-источнику, то на гранях, образующих ребро, осуществляется PVD-покрытие, а по краям третьей грани возникает небольшой слой аморфного углерода.

2. Дано объяснение этому явлению исходя из предположения, что движущей силой процесса PVD-покрытия является не только разность потенциалов между корпусом вакуумной камеры и катодом, но и разность давления в камере PVD-источника и вакуумной камере, где размещены подложки. Разность давления в камере PVD-источника и вакуумной камере создает аэродинамический поток, который увлекает за собой не только заряженные частицы, но и молекулы углерода. Молекулы углерода могут осаждаться на плоской грани подложки, если она установлена перпендикулярно направлению аэродинамического потока, и препятствовать образованию PVD-покрытию. Поэтому подложки вблизи PVD-источника должны располагаться к направлению потока одним из своих ребер и иметь вращение вокруг своей оси, противоположное вращению вокруг оси общего центра вращения.

3. Описана технология нанесения PVD-покрытия, позволяющая всем граням многогранной подложки одинаково позиционировать относительно PVD-источника, вблизи PVD-источника располагаться своими ребрами в его сторону и обеспечивать направление вращения подложек противоположно вращению планетарного механизма, на котором они установлены.

4. Испытание предложенной технологии PVD-покрытия показали, что при ее применении на всех гранях подложек формируется одинаковая плотная аморфная структура углеродного покрытия с высокими микротвердостью и адгезией к подложке.

Список литературы

1. Федотова А.М. Алмазоподобные покрытия: технологии и применение // Уральский научный вестник. – 2023. – Т. 5, № 9. – С. 308-313.
2. Гончаров В.К., Гусаков Г.А., Пузырев М.В. Осаждение защитных наноструктурированных алмазоподобных углеродных покрытий на алюминиевые сплавы // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 3. – С. 706-712.
3. Буяновский И.А., Левченко В.А., Самусенко В.Д., Большаков А.Н. Легирование алмазоподобных углеродных покрытий трущихся тел как метод повышения антифрикционных свойств смазочных сред // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2021. – № 6. – С. 52-60.
4. Зур И.А., Шманай Е.Е., Федотова Ю.А., Харченко А.А., Мовчан С.А. Влияние толщины на удельное электросопротивление тонких покрытий из алмазоподобного углерода на кремнии // Физика твердого тела. – 2023. – Т. 65, № 1. – С. 49-55.
5. Владимиров А.Б., Рубштейн А.П., Плотников С.А., Пушкарь С.С. Нанокompозитные покрытия с алмазоподобным углеродом- материал для дентальных и ортопедических имплантатов // Materials. Technologies. Design. – 2021. – Т. 3, № 3(5). – С. 46-48.
6. Grigoriev S.N., Volosova M.A., Fyodorov S.V., Mustafaev E.S. SI-containing diamond-like carbon coatings to improve the wear resistance of solid ceramic end mills // Journal of Physics: Conference Series. 2021, vol. 1954, p. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/1954/1/012010.
7. Николаева Д.В., Генералов Д.В., Паршин Б.А., Макеев М.О. Исследование физических свойств углеродных алмазоподобных покрытий, нанесенных методом импульсного лазерного осаждения // Вестник

Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. – 2020. – № 3. – С. 53-64.

8. Хрущов М.М., Суляндзига Д.А., Авдюхина В.М., Левин И.С., Самусенко В.Д. Покрытия вольфрама и молибдена с алмазоподобным углеродом, полученные магнетронным распылением- структурно-фазовое состояние и трибологические свойства // Полимерные композиты и трибология. Тезисы докладов международной научно-технической конференции. – Гомель, 2022. – С. 167.
9. Zia A.W., Birkett M. Deposition of diamond-like carbon coatings: conventional to non-conventional approaches for emerging markets // *Ceramics International*. 2021, vol. 47, no. 20, pp. 28075-28085.
10. Rajak D.K., Kumar A., Behera A., Menezes P.L. Diamond-like carbon (DLC) coat-ings: classification, properties, and applications // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021, vol. 11, no. 10, pp. 4445. DOI: 10.3390/app11104445.
11. Lorenz L., Chudoba T., Makowski S., Zawischa M., Schaller F., Weihnacht V. Indentation modulus extrapolation and thickness estimation of TA-C coatings from nanoindentation // *Journal of Materials Science*. 2021, vol. 56, no. 33, pp. 18740-18748.
12. Liu F., Han Y., Guo X., Wang C., Zhang K. Adhesion and machining performance of PVD alcrn coatings which an ion beam/laser textured substrate // *Surface and Coatings Technology*. 2021, vol. 423, p. 127607.
13. Krella A.K. Cavitation erosion of monolayer PVD coatings – an influence of deposition technique on the degradation process // *Wear*. 2021, vol. 478-479, pp. 203762.
14. Hartig J., Kirsch B., Wear resistant PVD coatings for CBN grinding tools // *WT. Produktion und Management*. 2021, vol. 111, no. 6, pp. 419-429.
15. Завидовский И.А., Стрелецкий О.А., Татаринцев А.А., Миннебаев К.Ф., Хайдаров А.А. Полученные плазменно-химическим осаждением А-С:ND покрытия: взаимосвязь эмиссионных свойств и фазового состава // *Физика твердого тела*. 2023. – Т. 65, № 4. – С. 656-668.
16. Тополянский П.А., Ермаков С.А., Тополянский А.П. Адгезионные характеристики тонкопленочного покрытия, осаждаемого при финишном плазменном упрочнении // *Воронежский научно-технический Вестник*. – 2021. – Т. 3, № 3(37), – С. 11-27.
17. Охлупин Д.Н., Королев А.В., Синев И.В., Авдонин К.А. Исследование покрытия деталей методом PVD // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2020. – № 3(86). – С. 78-86.

References

1. Fedotova A.M. Amazon-like coatings: technolias and application // *Ural Scientific Bulletin*. 2023, vol. 5, no. 9, pp. 308-313.
2. Goncharov V.K., Gusakov G.A., Puzyrev M.V. Deposition of protective nanostructured diamond-like carbon coatings on aluminum alloys // *Engineering and Physics Journal*. 2022, vol. 95, no. 3, pp. 706-712.
3. Buyanovsky I.A., Levchenko V.A., Samusenko V.D., Bolshakov A.N. Legirrvanie diamond-like carbon coatings of rubbing bodies as a method of improving the antifriction properties of lubricants // *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2021, no. 6, pp. 52-60.
4. Zur I.A., Shmanai E.E., Fedotova Yu.A., Kharchenko A.A., Movchan S.A. The effect of thickness on the resistivity of thin coatings of diamond-like carbon on silicon // *Solid state physics*. 2023, vol. 65, no. 1, pp. 49-55.
5. Vladimirov A.B., Rubstein A.P., Plotnikov S.A., Pushkar S.S. Nanocomposite coatings with diamond-like carbon - a material for dental and orthopedic implants // *Materials. Technologies. Design*. 2021, vol. 3, no. 3(5), pp. 46-48.
6. Grigoriev S.N., Volosova M.A., Fyodorov S.V., Mustafaev E.S. SI-containing diamond-like carbon coatings to improve the wear resistance of solid ceramic end mills // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 1954, p. 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/1954/1/012010.
7. Nikolaeva D.V., Generalov D.V., Parshin B.A., Makeev M.O. Investigation of the physical properties of carbon diamond-like coatings deposited by pulsed laser deposition // *Bulletin of the Moscow State Regional University. Series: Physics-Mathematics*. 2020, no. 3, pp. 53-64.
8. Khrushchev M.M., Sulyandziga D.A., Avdyukhina V.M., Levin I.S., Samusenko V.D. Coatings of tungsten and molybdenum with diamond-like carbon obtained by magnetron scattering - structural-phase state and tribological properties // *Poly-dimensional composites and tribology. Abstracts of reports of the international scientific and technical conference*. – Gomel, 2022. – P. 167.
9. Zia A.W., Birkett M. Deposition of diamond-like carbon coatings: conventional to non-conventional approaches for emerging markets // *Ceramics International*. 2021, vol. 47, no. 20, pp. 28075-28085.
10. Rajak D.K., Kumar A., Behera A., Menezes P.L. Diamond-like carbon (DLC) coat-ings: classification, properties, and applications // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021, vol. 11, no. 10, pp. 4445. DOI: 10.3390/app11104445.
11. Lorenz L., Chudoba T., Makowski S., Zawischa M., Schaller F., Weihnacht V. Indentation modulus extrapolation and thickness estimation of TA-C coatings from nanoindentation // *Journal of Materials Science*. 2021, vol. 56, no. 33, pp. 18740-18748.
12. Liu F., Han Y., Guo X., Wang C., Zhang K. Adhesion and machining performance of PVD alcrn coatings which an ion beam/laser textured substrate // *Surface and Coatings Technology*. 2021, vol. 423, p. 127607.
13. Krella A.K. Cavitation erosion of monolayer PVD coatings – an influence of deposition technique on the degradation process // *Wear*. 2021, vol. 478-479, pp. 203762.

14. Hartig J., Kirsch B., Wear resistant PVD coatings for CBN grinding tools // WT. Produktion und Management. 2021, vol. 111, no. 6, pp. 419-429.
15. Zavidovsky I.A., Streletsky O.A., Tatarintsev A.A., Minnebaev K.F., Haidarov A.A. Coatings obtained by plasma-chemical deposition of A-C:ND coatings: the relationship of emission properties and phase composition // Solid state physics. 2023, vol. 65, no. 4, pp. 656-668.
16. Topolyansky P.A., Ermakov S.A., Topolyansky A.P. Adhesive characteristics of a thin-film coating deposited during finishing plasma hardening // Voronezhsky Scientific and Technical Bulletin. 2021, vol. 3, no. 3(37), pp. 11-27.
17. Okhlupin D.N., Korolev A.V., Sinev I.V., Avdonin K.A. Investigation of the coating of parts by PVD method // Bulletin of the Saratov State Technical University. 2020, no. 3(86), pp. 78-86.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Королев Альберт Викторович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения»	Korolev Albert Viktorovich – doctor of technical sciences, professor, professor of the Department "Technology of mechanical engineering"
Охлупин Дмитрий Николаевич – директор	Okhlupin Dmitry Nikolaevich – director
Синев Илья Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент science7@bk.ru	Sinev Ilya Vladimirovich – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor

Получена 14.11.2023