

УДК 538.951:620.3

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_4_65_7

EDN: XHSDAV

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ, ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ

Д.Г. Пилипцов^{1,2}, Цзян Сяо Хун¹, А.В. Рогачёв^{1,2}, А.С. Руденков^{1,2}, К.А. Саховский²

¹Международная китайско-белорусская лаборатория по вакуумно-плазменным технологиям,
Нанкинский университет науки и технологии

²Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

TECHNOLOGICAL METHODS FOR CONTROLLING THE STRUCTURE AND IMPROVING THE MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE CARBON COATINGS

D.G. Piliptsov^{1,2}, Jiang Xiaohong¹, A.V. Rogachev^{1,2}, A.S. Rudenkov^{1,2}, K.A. Sakhovskij²

¹International China-Belarusian Laboratory of Vacuum-Plasma Technologies,
Nanjing University of Science and Technology

²Francisk Skorina Gomel State University

Аннотация. Проведен анализ основных технологических приемов регулирования структуры и свойств композиционных углеродных покрытий. Обобщены экспериментальные данные о влиянии напряжения разряда, формы, длительности и частоты импульсов разрядов при генерации углеродной плазмы на фазовый состав и свойства углеродных покрытий. Проанализированы основные особенности формирования, фазовый состав и свойства углеродных покрытий, легированных карбидообразующими и инертными по отношению к углероду химическими элементами и соединениями, их изменения при термообработке.

Ключевые слова: углеродные покрытия, композиционные покрытия, структура, механические свойства.

Для цитирования: Технологические методы регулирования структуры, повышения механических свойств композиционных углеродных покрытий / Д.Г. Пилипцов, Цзян Сяо Хун, А.В. Рогачёв, А.С. Руденков, К.А. Саховский // Проблемы физики, математики и техники. – 2025. – № 4 (65). – С. 7–13. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_4_65_7 – EDN: XHSDAV

Abstract. An analysis of the main technological methods for controlling the structure and properties of composite carbon coatings has been carried out. The experimental data on the influence of discharge voltage, as well as the shape, duration, and frequency of discharge pulses during carbon plasma generation on the phase composition and properties of carbon coatings, have been summarized. The main features of the formation, phase composition, and properties of carbon coatings doped with carbide-forming and chemically inert elements and compounds with respect to carbon, as well as their changes during heat treatment, have been analyzed.

Keywords: carbon coatings, composite coatings, structure, mechanical properties.

For citation: Technological methods for controlling the structure and improving the mechanical properties of composite carbon coatings / D.G. Piliptsov, Jiang Xiaohong, A.V. Rogachev, A.S. Rudenkov, K.A. Sakhovskij // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2025. – № 4 (65). – P. 7–13. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2025_4_65_7 (in Russian). – EDN: XHSDAV

Введение

Среди материалов на основе углерода важное место отводят осаждаемым различными вакуумными методами углеродным покрытиям (УП), находящим широкое применение в машиностроении, электронике, медицине и других отраслях [1]. Свойства углеродных покрытий определяются, в первую очередь, их структурой, типом связи между атомами, наличием легирующих элементов, которые, в свою очередь, определяются в значительной степени методом и условиями их осаждения [2]. В числе углеродных тонкопленочных материалов, характеризующихся

высокими механическими свойствами и наиболее широким применением, выделяют углеродные алмазоподобные покрытия, структура, фазовый состав и свойства которых в зависимости от метода осаждения и последующей обработки может изменяться в широких пределах [3], [4].

В настоящее время разработаны и достаточно эффективно используются на практике ряд методов осаждения углеродных покрытий, в числе которых доминируют термические и плазмохимические методы синтеза углеродных покрытий. В основе плазмохимических методов лежат процессы диссоциации и активации,

ионизации углеродсодержащих газов в электрических разрядах различной природы и мощности [2]. К термическим относят методы, при реализации которых основным фактором является тепловое воздействие на углеродную мишень и образование в результате потока ионов углерода с энергией ~ 100 эВ. В качестве теплового воздействия наиболее эффективным является использование импульсного катодно-дугового разряда в парах углерода, приводящего к образованию потока углеродной плазмы. Данный метод характеризуется, в сравнении с другими, технологичностью, возможностью регулирования достаточно простыми приемами химического состава и конструкции осаждаемых слоев, наиболее высокой скоростью роста покрытий.

Алмазоподобные покрытия проявляют высокие механические свойства, имеют микронанотвердость (10...70 ГПа), низкий коэффициент трения ($\sim 0,1$), прозрачны в видимом и ИК диапазоне, являются стойкими при действии агрессивных химических сред. К основным недостаткам таких покрытий относят высокие внутренние напряжения (5...10 ГПа), невысокую термическую стойкость в кислородсодержащих средах (до 600 К), низкую прочность адгезионного соединения при осаждении на стальные поверхности, высокую хрупкость. При нанесении покрытий из плазмы импульсного катодно-дугового разряда в потоке содержатся микро-, наночастицы графита, которые при осаждении на поверхность создают высокую структурную неоднородность, дефектность. С целью снижения данных недостатков, повышения их эксплуатационных характеристик предложен ряд технологических решений. В их числе наиболее эффективным является введение на стадии осаждения покрытий в его состав легирующих элементов, модифицирующее влияние которых заключается в направленном изменении фазового состава углеродной матрицы (соотношения sp^3 и sp^2 гибридных атомов углерода, дисперсность кластеров), возможном образовании с углеродом химических соединений или же в формировании твердых растворов и даже отдельных самостоятельных фаз. Степень и характер модифицирования углеродных покрытий определяется в значительной степени природой и механизмом протекающих физико-химических процессов, поэтому их изучение является актуальной задачей [5].

Основной целью настоящей работы является анализ технологических особенностей формирования композиционных углеродных покрытий из импульсной катодной плазмы, результатов исследований зависимости их структуры и свойств от химической природы и концентрации легирующих элементов, условий и режимов легирования, последующей обработки.

1 Влияние условий и режимов осаждения углеродного потока на фазовый состав и свойства покрытий

Наиболее эффективные варианты устройств формирования композиционных углеродсодержащих покрытий из импульсной катодной плазмы представлены на рисунке 1.1.

Представленные схемы устройств позволяют реализовать следующие основные технологические процессы нанесения композиционных углеродных покрытий:

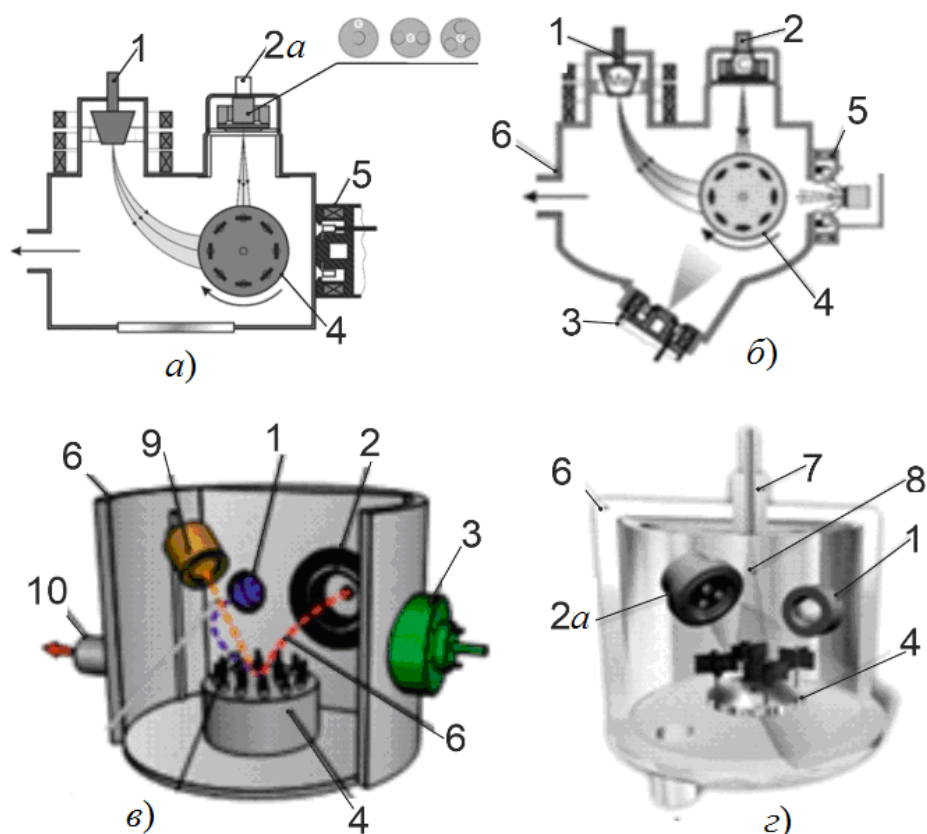
1. Формирование многослойных покрытий на основе углерода и легирующего элемента с регулируемыми толщинами слоев. Осаждение углеродного слоя осуществляется из потока углеродной импульсной плазмы, слой легирующего элемента – из потока, генерируемого электродуговым испарителем (рисунок 1.1 а, б).

2. Формирование композиционных покрытий из плазмы импульсного катодно-дугового разряда, создаваемого при использовании составного или композиционного, содержащего легирующий элемент углеродного катода. При этом возможно применение ассистирующей обработки ионами инертных газов, а также многокомпонентное легирование покрытий ионами азота, генерируемых ионным источником (рисунок 1.1 а, в). Легирование УП азотом проводят и путем его напуска в вакуумную камеру.

3. Осаждение многокомпонентно легированных углеродных покрытий при использовании дополнительно размещенных в камере электродугового (рисунок 1.1, а), ионного (рисунок 1.1, б) источника или же магнетронного распылителя (рисунок 1.1, в).

Данные технологические варианты нанесения покрытий характеризуются различной степенью активации и концентрации легирующих элементов, энергетическими параметрами углеродной плазмы, изменение которых имеет место не только при использовании различных режимов испарения углеродного катода, но и в результате взаимодействия ионов углерода с атомами легирующих элементов в газовой фазе. Данные особенности определяют в значительной степени зависимость структуры и свойств покрытий от используемой технологической схемы их нанесения.

В числе важнейших технологических параметров, влияющих на скорость осаждения углеродных слоев, их морфологию и механические, физико-химические свойства, выделяют режимы генерации углеродной плазмы: напряжение разряда, форма, длительность и частота импульсов. В [6] показано, что при использовании двухстадийного импульса с амплитудами 350 и 150 В, в сравнении с моноимпульсом такой же длительностью и амплитудой 350 В, микротвердость возрастает в 2,5...3,5 раза, уровень внутренних напряжений снижается в 4...5 раз, при этом однако



- 1 – дуговой испаритель постоянного тока с металлическим (Ti, Cu, Zr, Al, Cr) катодом;
 2 – источник плазмы импульсного катодно-дугового разряда с графитовым катодом;
 2а – источник плазмы импульсного катодно-дугового разряда с композиционным (металл, кремний)-графитовым катодом;
 3 – ассистирующий ионный источник;
 4 – вращающаяся технологическая оснастка с подложками;
 5 – распыляющий ионный источник;
 6 – вакуумная камера;
 7 – регулятор расхода газа (азот);
 8 – поток N_2 ;
 9 – магнетронная распылительная система постоянного тока;
 10 – система откачки

Рисунок 1.1 – Схемы вакуумных установок для получения композиционных покрытий на основе углерода

наблюдается снижение скорости роста в покрытии в 1,5...2 раза, что объясняется снижением интегральной энергии в импульсе.

В работах [7]–[9] определены закономерности влияния частоты следования разрядных импульсов на структуру углеродных покрытий. Показано, что с увеличением частоты импульсов от 3 Гц до 20 Гц имеет место уменьшение размера, увеличение количества и степени упорядочения Csp^2 -кластеров, возрастание твердости и внутренних напряжений в покрытии, а также снижение ширины запрещенной зоны покрытий от 1,35 эВ до 0,9 эВ. При толщине 80–106 нм и частоте импульсов разряда 3 Гц углеродное покрытие имеет максимальное содержание Csp^3 связей, характеризуется высокими механическими и оптическими свойствами.

Данные закономерности проявляются при осаждении однокомпонентных покрытий и при их легировании. Как правило, влияние частоты следования импульсов на свойства покрытий имеет немонотонный характер. Так при нанесении покрытий в среде молекулярного азота их твердость незначительно уменьшается с повышением частоты от 3 до 10 Гц, а затем возрастает на 16% с увеличением частоты до 20 Гц. При этом ширина оптической запрещенной зоны таких покрытий снижается незначительно с 0,85 эВ (3 Гц) до 0,71 эВ (20 Гц). Установлено, что при ионном легировании углеродного слоя при частоте импульсов 10 Гц относительное содержание C-N связей максимально и значительно превышает число связей при легировании покрытия путем напуска в камеру молекулярного азота.

Значительное влияние на фазовый состав покрытий и их свойства оказывают геометрические параметры нанесения. Так, в [10] установлено, что при увеличении расстояния между источником генерации углеродной плазмы и подложкой происходит увеличение числа sp^2 гибридных атомов углерода, монотонное снижение твердости и модуля упругости покрытий, что в значительной степени определяется изменением энергии ионов и снижением плотности углеродного потока при его транспортировке от катода к подложке. При осаждении потока ионов углерода, имеющих практически одинаковую энергию и различную плотность, что достигается изменением ориентации поверхности подложки относительно осаждаемого потока, установлено немонотонное изменение твердости и модуля упругости, показателя преломления покрытий от угла падения углеродного потока (твердость и модуль упругости при угле падения 15° , а показатель преломления при 45° имеет максимальное значение) [11], [12].

2 Особенности формирования, фазовый состав и свойства композиционных углеродных покрытий

Представленные на рисунке 1.1 схемы установок позволяют осаждать композиционные углеродные покрытия практически любого химического состава с различной концентрацией ингредиентов и при заданном распределении их по толщине слоя. Изменяя при этом степень ионизации и плотность потока осаждаемых атомов, температуру поверхности подложки, проводя дополнительную ионную обработку, предоставляется возможность инициирования на стадии осаждения протекание различных химических и физических (диффузии, структурообразования, фазовые превращения и другие) процессов. Анализ основных протекающих процессов достаточно подробно рассмотрен в работах [13], [14]. При легировании УП металлами их влияние на структуру и свойства определяется, прежде всего, реакционной активностью по отношению к углероду, способностью металлов образовывать с углеродом химические соединения. При этом, в зависимости от условий и режимов осаждения, природы и концентрации, металл в объеме углеродного покрытия может находиться, кроме химического соединения, также в виде самостоятельной фазы, либо в твердом растворе [13]–[15].

В числе наиболее перспективных для практического применения УП, легированных химически активными металлами, кроме детально изученных покрытий а-С:Ti, следует отметить композиционные покрытия а-С:Si и а-С:B. При введении Si в структуру покрытия происходит образование карбида и оксида кремния (SiC и SiO_x), и с ростом концентрации кремния установлено увеличение содержания более твердой

sp^3 фазы. При осаждении таких покрытий имеет место замещение атомами кремния атомов углерода преимущественно в sp^2 кластерах [16]–[18]. Легирование а-С покрытий бором приводит к образованию в покрытии карбидов и оксида бора либо выделению его в виде отдельной фазы. При концентрации бора меньше 17 масс. % установлено высокое содержание атомов углерода с sp^3 гибридизацией связей, с ростом концентрации бора происходит уменьшение отношения фаз Csp^3 / Csp^2 . Покрытия характеризуются низкими значениями коэффициентов трения (0,12...0,15) и износа контртела [19]–[21].

Введение в состав УП инертных металлов сопровождается выделением его в виде самостоятельной фазы, дисперсность которой зависит от природы металла, его концентрации и условий осаждения. При этом проявляется его активное влияние на фазовый состав углеродной матрицы, заключающееся, как правило, в ее графитизации. Такие покрытия имеют достаточно низкий уровень внутренних механических напряжений. На примере УП, легированных медью и серебром, показана высокая эффективность их применения в узлах трения в качестве не только антифрикционных, но и электротехнических слоев [22]–[24].

Одним из наиболее эффективных технологических приемов повышения механических свойств УП является их многокомпонентное легирование, в частности металлами и азотом [25], [26]. Отметим, что при легировании УП молекулярным азотом снижается размер углеродных Csp^2 кластеров, уровень внутренних механических напряжений, повышается износостойкость контртела в сравнении с однокомпонентными а-С покрытиями. При их обработке в процессе осаждения ионами азота установлено преимущественное образование соединений азота с атомами углерода с sp^2 -гибридизацией связей, концентрация которых в значительной степени зависит от частоты импульсов разряда, плотности потока ионов азота [27]. При осаждении покрытий а-С:Me:N протекающие физико-химические процессы значительно усложняются. Химически активные металлы в таких слоях образуют не только карбиды, но нитриды, карбонитриды, оказывают более сложное влияние на дисперсность размеров Csp^2 кластеров [7], [27]–[29].

Перспективным является и комплексное легирование УП металлами различной природы. Так, при осаждении а-С:(Ni+Cr) покрытий установлен эффект неаддитивного влияния концентрации легирующих элементов на структуру, отношение Csp^3 / Csp^2 и механические свойства, обусловленные образованием в покрытии дисперсных фаз сложного состава на основе карбида хрома и интерметаллических соединений [30]. В целом это технологическое направление недостаточно разработано, и при оптимальном подборе ингредиентов, проявляющих комплексное

каталитическое влияние на процессы образования Csp^3 фаз, возможно существенное повышение служебных свойств УП.

3 Влияние термообработки на свойства композиционных углеродных покрытий

Нагрев легированных УП вследствие более интенсивного протекания процессов межфазной диффузии, релаксации внутренних механических напряжений, активации фазовых и структурных превращений является эффективным технологическим приемом изменения физико-химических, механических свойств [6], [7], [31]. Особенно значительное влияние нагрева проявляется при обработке слоистых композиционных УП. Характер протекающих процессов, а, следовательно, и степень изменения структуры и свойств определяются условиями термообработки, химическим составом покрытия. Так, установлено, что отжиг покрытий на воздухе практически всегда сопровождается монотонным при повышении температуры снижением доли sp^3 гибридных атомов углерода, твердости. При термообработке УП, легированных карбидообразующими металлами, температурная зависимость внутренних напряжений имеет экстремальный характер: при нагреве до $300^\circ C$ имеет место их снижение и при дальнейшем повышении температуры значение напряжений возрастет вследствие интенсификации процесса образования карбидов [32]. Следует отметить, что значительное влияние на структуру и свойства композиционных покрытий при таких условиях нагрева оказывают процессы окисления. Значительную роль эти процессы оказывают, например, при термообработке композиционных а-C:Al покрытий [26].

При термообработке покрытий в вакууме характер протекающих изменений иной. На примере (TiN:Al) / а-C, (CrN:Al) / а-C покрытий показано, что после термообработки в вакууме при $400^\circ C$ имеет место формирование более однородной структуры, повышение твердости, снижение модуля упругости в сравнении с не отожженными покрытиями [7], [30].

Главная проблема импульсного вакуумно-дугового испарения графитового катода – это образование при испарении катода «капельной фазы» (макрочастиц). При испарении графита из катодного пятна, помимо ионов углерода, вылетают микроскопические осколки горячего графита (от долей микрометра до десятков микрометров). Следовательно, необходим поиск решений. Одним из наиболее простых и технологических является использование сепаратора потока, который отклоняет поток ионов углерода, направляя их на подложку. Тяжелые нейтральные макрочастицы и осколки графита не взаимодействуют с магнитным полем, летят по прямой и оседают на стенках фильтра, не попадая на изделие.

Как показано в работах [33], [34], использование сепарации импульсного потока углеродной плазмы является технологически приемом, позволяющим получить твердые, атомарно-гладкие и однородные покрытия.

Заключение

Проведен анализ основных технологических приемов регулирования структуры и свойств композиционных углеродных покрытий. Рассмотрены основные схемы установок, реализующих различные варианты нанесения композиционных углеродных покрытий. Обобщены закономерности влияния напряжения разряда, формы, длительности и частоты импульсов разряда при генерации углеродной плазмы на фазовый состав и свойства углеродных покрытий. Проанализированы основные особенности формирования, фазовый состав и свойства углеродных покрытий, легированных карбидообразующими и инертными по отношению к углероду металлами. Отмечена высокая перспективность многокомпонентного легирования углеродных покрытий с целью достижения оптимального сочетания механических свойств. Проведена оценка влияния условий и режима термообработки композиционных покрытий на их фазовый состав и свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Diamond-like Carbon Coatings in the Biomedical Field: Properties, Applications and Future Development* / Y. Peng, J. Peng, Z. Wang, Y. Xiao, X. Qiu // Coatings. – 2022. – Vol. 12. – P. 1088.
2. *Modification Methods of Diamond like Carbon Coating and the Performance in Machining Applications: A Review* / L. Wang, Y. Liu, H. Chen, M. Wang // Coatings. – 2022. – Vol. 12. – P. 224.
3. *Schultrich, B. Structure and Characterization of Vacuum Arc Deposited Carbon Films – A Critical Overview* / B. Schultrich // Coatings. – 2022. – Vol. 12. – P. 109.
4. *Vetter, J. 60 years of DLC coatings: historical highlights and technical review of cathodic arc processes to synthesize various DLC types, and their evolution for industrial applications* / J. Vetter // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 257. – P. 213–240.
5. *Doping effects on the tribological performance of diamond-like carbon coatings: A Review* / O. Sharifahmadian [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 27. – P. 7748–7765.
6. *Effect of carbon cathode plasma parameters on the structure and properties of deposited coatings* / Y.M. Liu, Z.Ch. Song, X.H. Jiang, D.G. Pilipstou, A.V. Rogachev // Proceedings of 8th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects / ed. by D. Sorokin, A. Grishkov. – Tomsk: TPU Publishing House, 2022. – P. 1041–1046.

7. *Influences of pulse frequency on structure and mechanical properties of DLC films synthesized by pulsed cathodic arc evaporation* / Bing Ye, Xiaohong Jiang, Bing Zhou, D.G. Piliptsou, A.V. Rogachev // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 670–671. – P. 560–564.
8. *Влияние напряжения разряда на структуру и механические свойства углеродных покрытий, осажденных из сепарированных потоков углеродной плазмы* / Д.Г. Пилипцов, Н.Н. Федосенко, К.А. Саховский, С.Ю. Чепкасов // *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. – 2023. – № 4. – С. 40–47.
9. *Саховский, К.А. Влияние параметров разряда на структуру и свойства АПП* / К.А. Саховский, Д.Г. Пилипцов, А.Н. Попов // *Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб-2022): тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 28–30 июня 2022 г. / НАН Беларуси [и др.]; редкол.: В.Н. Адериша [и др.]*. – Гомель, 2022. – С. 162.
10. *Исследование структуры и механических свойств пленок тетраэдрального аморфного углерода, осажденных при различных расстояниях* / С.Ю. Чепкасов, А.С. Золкин, Д.Г. Пилипцов, Е.В. Гладких, К.С. Кравчук // *Сибирский физический журнал*. – 2018. – Т. 13, № 3. – С. 55–60.
11. *The effect of the substrate spatial orientation on the properties of amorphous carbon coatings deposited from pulse plasma flows* / S. Chepkasov, A. Zolkin, D. Piliptsou, M. Khomyakov, E. Maksimovskii // *2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. – Piscataway: IEEE, 2020. – P. 856–862.
12. *Влияние условий осаждения на структуру и механические свойства а-С покрытий* / Ван Цзинцзе, Д.Г. Пилипцов, А.В. Рогачев, А.С. Руденков, К.А. Саховский, С.Ю. Чепкасов // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2024. – № 4 (61). – С. 7–12.
13. *Нанокмпозиционные покрытия и технологии в микроэлектронике* / В.А. Емельянов, А.В. Рогачев, Н.Н. Федосенко, Д.Г. Пилипцов. – Минск: Беларус. навука, 2014. – 410 с.
14. *Композиционные углеродные покрытия, осажденные из импульсной катодной плазмы* / Д.Г. Пилипцов, А.С. Руденков, П.А. Лучников, А.В. Рогачев, Цзян Сяо Хун, Чжоу Бин; под ред. А.В. Рогачева. – Москва: Радиотехника, 2020. – 283 с.
15. *Structure and properties of metal-carbon a-C coatings alloyed with Ti, Zr and Al with a high concentration* / J. Fang, D.G. Piliptsou, A.V. Rogachev, X.H. Jiang, N.N. Fedosenko, E.A. Kulesh // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Vol. 422. – P. 195–202.
16. *Improving the mechanical property of amorphous carbon films by silicon doping* / A.S. Chaus, X.H. Jiang, P. Pokorný, D.G. Piliptsou, A.V. Rogachev // *Diamond and Related Materials*. – 2018. – Vol. 82. – P. 137–142.
17. *Морфология и фазовый состав кремний-углеродных покрытий* / А.С. Руденков, А.В. Рогачев, Д.Г. Пилипцов, А.Н. Купо, А.С. Побяха, П.А. Лучников // *Наноматериалы и наноструктуры – XXI век*. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 35–42.
18. *Structure and optical properties of a-C coatings doped with nitrogen and silicon* / D.G. Piliptsou, A.S. Pobiyaha, A.V. Rogachev, A.S. Rudenkov // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Vol. 422. – P. 171–180.
19. *Вакуумно-плазменные бор-углеродные покрытия: структура, морфология и механические свойства* / Д.Г. Пилипцов, А.В. Рогачев, А.С. Руденков, Цзян Сяо Хун, Е.А. Кулеш, П.А. Лучников // *Наукоемкие технологии*. – 2020. – Т. 21, № 9. – С. 22–32.
20. *Boron-carbon coatings: structure, morphology and mechanical properties* / E.A. Kulesh, D.G. Piliptsou, A.V. Rogachev, J.X. Hong, N.N. Fedosenko, V. Kolesnyk // *Journal of Engineering Sciences*. – 2020. – Vol. 7, № 1. – P. C1–C9.
21. *Structural properties of carbon composites doped with boron* / D.G. Piliptsou, A.S. Rudenkov, A.V. Rogachev, Jiang Xiao Hong, E.A. Kulesh, A.P. Surzhikov, A.P. Luchnikov, O.A. Frolova // *Bulletin of the Karaganda University. "Physics Series"*. – 2020. – Vol. 3 (99). – P. 31–37.
22. *Structure, optical and mechanical performance of silver-doped diamond-like carbon composite film* / J. Fang, A.V. Rogachev, Y. Liu, D.G. Piliptsou, X. Jiang, E. A. Kulesh // *2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE)*. – Piscataway: IEEE, 2020. – P. 1338–1343.
23. *Структура, механические свойства градиентных нанокмпозиционных медь-углеродных покрытий* / А.С. Руденков, Ванг Цзинцзе, А.В. Рогачев, Лю Джубо, Д.Г. Пилипцов, Е.А. Кулеш, А.Н. Купо // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2025. – № 1 (62). – С. 43–50.
24. *Оптимизация методов формирования Си-С покрытий электротехнического назначения* / А.Н. Купо, А.С. Руденков, Ванг Цзинцзе, Д.Г. Пилипцов // *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. – 2025. – № 1. – С. 58–67.
25. *Synthesis and characterization of Ti and N binary-doped a-C films deposited by pulse cathode arc with ionic source assistant* / Bing Zhou, Zhifeng Wang, Zhubo Liu, D.G. Piliptsou, Bin Xu, Shengwang Yu, Yanxia Wu, A.V. Rogachev // *Surface and Interface Analysis*. – 2018. – Vol. 50, № 4. – P. 506–515.
26. *Структура и механические свойства легированных азотом и алюминием углеродных покрытий* / Д.Г. Пилипцов, Джоу Бин, А.В. Рогачев, Н.Н. Федосенко, Е.А. Кулеш // *Проблемы физики математики и техники*. – 2023. – № 1 (54). – С. 47–54.

27. *Effect of discharge pulse frequency on the microstructure and field-emission performance of CNX films deposited by pulse cathode arc evaporation* / Haowei Du, Bing Zhou, D.G. Piliptsov, Hui Sun, Yong Ma, Hongjun Hei, Shengwang Yu, Zhubo Liu // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. – 2024. – Vol. 42. – Article 063410.

28. *Influence of annealing on the structure and properties of carbon coatings containing Ti and TiN layers* / D.G. Piliptsov, X.H. Jiang, A.S. Chaus, A.V. Rogachev, L. Morovic // *Diamond and Related Materials*. – 2023. – Vol. 135. – Article 109890.

29. *Effect of the alloying elements in TiN sublayer on the structure and mechanical properties of carbon coatings* / Jialin Fang, D.G. Piliptsov, R. Bekarevich, A.V. Rogachev, Xiaohong Jiang, E. Kulesh // *Thin Solid Films*. – 2022. – Vol. 755. – Article 139324.

30. *Structure and mechanical properties of Ni and Cr binary doped amorphous carbon coatings deposited by magnetron sputtering and pulse cathodic arc* / Bingbing Zhou, D.G. Piliptsov, X. Jiang, A.V. Rogachev, A.S. Rudenkov, E.A. Kulesh // *Thin Solid Films*. – 2020. – Vol. 701. – Article 137942.

31. *Влияние термообработки на структуру и механические свойства азотированных углеродных покрытий, легированных цирконием и кремнием* / А.С. Руденков, Цзян Сяохун, А.В. Рогачёв // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2025. – № 3 (64). – С. 73–83.

32. *Effects of post-deposition annealing on structure and mechanical properties of multilayer Ti / DLC films* / Zicheng Song, Yiming Liu, Shangzhe Jiang, Xiaohong Jiang, D.G. Piliptsov, A.V. Rogachev // *Diamond and Related Materials*. – 2024. – Vol. 147. – Article 111340.

33. *Структура и свойства а-С:Ti покрытий, осажденных из сепарированных потоков плазмы* / К.А. Саховский, Д.Г. Пилипцов // *ПОЛИКОМТРИБ-2025: Тезисы докладов международной научно-технической конференции, Гомель, 24-27 июня 2025 г.* – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2025. – С. 210.

34. *Features of the Structure and Properties of the ta-C Coatings Deposited from Filtered Flows of the Pulsed Cathodic-Arc Discharge* / Yang Gao, K.A. Sakhovsky, Shangzhe Jiang, S.Y. Chepkasov, Xiaohong Jiang, A.S. Rudenkov, Urol K. Makhmanov, D.G. Piliptsov, A.V. Rogachev // *Eurasian Chemico-Technological Journal*. – 2025. – Vol. 27, № 2. – P. 89–100.

Материалы статьи подготовлены в рамках выполнения задания 4.1.6 (НИР 20212076) и задания 3.1.03 (НИР 20212075)

Поступила в редакцию 01.10.2025.

Информация об авторах

Пилипцов Дмитрий Геннадьевич – д.т.н., доцент

Цзян Сяо Хун – профессор

Рогачёв Александр Владимирович – чл.-корр. НАН Беларуси, д.х.н., профессор

Руденков Александр Сергеевич – к.т.н., доцент

Саховский Кирилл Артурович – аспирант