

УДК 539.234

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ОСАЖДЕННЫХ ИЗ ИМПУЛЬСНОЙ КАТОДНОЙ ПЛАЗМЫ

**Ю. В. НИКИТЮК, Д. Г. ПИЛИПЦОВ,  
Н. Н. ФЕДОСЕНКО, К. А. САХОВСКИЙ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины»,  
Республика Беларусь*

**И. Ю. АУШЕВ**

*Государственное учреждение образования «Университет  
гражданской защиты Министерства по чрезвычайным  
ситуациям Республики Беларусь», г. Минск*

*В работе выполнена оптимизация режимов формирования углеродных покрытий с использованием генетического алгоритма MOGA модуля DesignXplorer программы ANSYS. Эксперимент по оптимизации проводился с использованием гранецентрированного варианта центрального композиционного плана. В качестве варьируемых факторов использовались напряжение разряда, частота следования импульсов, количество импульсов, которые определяют особенности формирования структуры углеродных покрытий. В качестве откликов использовались толщина, микротвердость, модуль Юнга и показатель преломления осажденных углеродных покрытий. Выполнена оценка влияния параметров нанесения углеродных покрытий на их свойства. Показано, что наибольшее воздействие на выходные параметры оказывает количество импульсов, при этом максимальная относительная погрешность результатов, полученных при использовании алгоритма MOGA, не превысила 13 % при определении характеристик углеродного покрытия. В результате оптимизации установлены режимы осаждения углеродных покрытий с характеристиками, обеспечивающими их эффективное применение для упрочнения рабочих поверхностей и для защиты оптических элементов.*

**Ключевые слова:** углеродные покрытия, импульсный катодно-дуговой разряд, оптимизация, MOGA, ANSYS.

## OPTIMIZATION OF CARBON COATING FORMATION PARAMETERS, DEPOSITED FROM PULSED CATHODE PLASMA

**Y. V. NIKITYUK, D. G. PILIPTSOV,  
N. N. FEDOSENKO, K. A. SAKHOVSKY**

*Educational Institution “Francisk Skorina Gomel State  
University”, the Republic of Belarus*

**I. Y. AUSHEV**

*University of Civil Protection of the Ministry for Emergency  
Situations of the Republic of Belarus, Minsk*

*Optimization of carbon coating formation modes was performed using the genetic algorithm MOGA of the DesignXplorer module of the ANSYS program. The optimization experiment was carried out using a face-centered version of the central composition plan. The discharge voltage, the pulse repetition rate, and the number*

*of pulses were used as variable factors, which determine the features of the formation of the structure of carbon coatings. The responses were thickness, microhardness, Young's modulus, and refractive index of the deposited carbon coatings. The impact of carbon coating parameters on their properties was evaluated. The article shows that the largest impact on the output parameters is the number of pulses, while the maximum relative error of the results obtained using the MOGA algorithm did not exceed 13% in determining the characteristics of the carbon coating. As a result of optimization, modes of deposition of carbon coatings with characteristics ensuring their effective use for hardening of working surfaces and for protection of optical elements are established.*

**Keywords:** carbon coatings, pulsed cathode-arc discharge, optimization, MOGA, ANSYS.

### **Введение**

Углеродные покрытия (УП), сформированные методом катодного вакуумно-дугового испарения, обладают рядом уникальных механических, физических, трибологических, химических и биологических свойств. Сформированные таким методом УП характеризуются высокими значениями твердости и модуля Юнга, высокими показателями преломления и прозрачностью в широком диапазоне длин волн оптического излучения, низкими коэффициентами трения, высокой износостойкостью, высокой химической инертностью и биосовместимостью. Свойства УП обеспечивают их широкое применение при производстве режущих инструментов, пресс-форм, пуансонов, оптических элементов и деталей машин [1–14].

Управление процессами конденсации и роста УП возможно за счет варьирования параметрами импульсного катодно-дугового испарения. Таким образом, изменение параметров генерации импульсной углеродной плазмы обеспечивает возможность управления процессами структурообразования и свойствами формируемых покрытий [12, 13]. Актуальной задачей является определение параметров осаждения УП методом катодного вакуумно-дугового испарения с целью формирования оптимального комплекса их свойств. Для решения данной задачи целесообразно применение генетических алгоритмов, которые являются частным случаем эволюционных методов [15, 16]. Как показано в работах [16, 17], одним из эффективных генетических алгоритмов является алгоритм MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm). В работах [16, 20–24] приведены результаты многокритериальной оптимизации параметров технологических процессов и конструкций с использованием генетического алгоритма MOGA, реализованного в модуле DesignXplorer программы ANSYS Workbench [28].

Целью данной работы является оптимизация параметров работы генератора углеродной плазмы с использованием генетического алгоритма MOGA модуля DesignXplorer для формирования углеродных покрытий с характеристиками, обеспечивающими их эффективное применение для упрочнения рабочих поверхностей инструмента, а также защиты оптических элементов.

### **Определение оптимальных параметров осаждения алмазоподобного покрытия**

Для получения углеродных покрытий была использована установка вакуумного напыления УВНИПА-1-001. Схема вакуумной установки представлена на рис. 1.

Нанесение УП осуществлялось с помощью источника плазмы импульсного катодно-дугового разряда с распыляемым графитовым электродом (МППГ-6). Покрытия формировались после откачки вакуумной камеры до остаточного давления  $5 \cdot 10^{-3}$  Па. Очистка и предварительный нагрев подложек осуществлялись с помощью ионного источника. В качестве материала подложек для покрытий использовались полированные монокристаллические подложки, изготовленные из кремния марки КДБ-100.

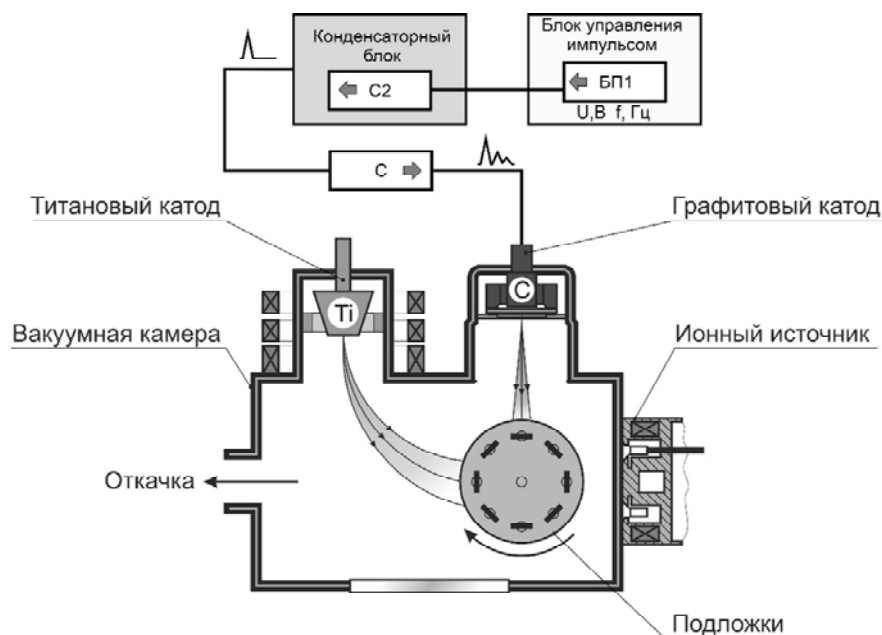


Рис. 1. Схема вакуумной установки, предназначенной для получения алмазоподобного покрытия

Исследование влияния условий синтеза на свойства УП осуществлялось с использованием гранецентрированного варианта центрального композиционного плана [29–30], сформированного в модуле Ansys DesignXplorer для трех факторов (P1–P3): P1 – напряжение разряда  $U$ ; P2 – частота следования импульсов  $\omega$ ; P3 – количество импульсов  $N$ . В соответствии с планом эксперименты были выполнены для 15 комбинаций входных параметров (табл. 1). При этом определялись следующие выходные параметры, характеризующие углеродные покрытия, осаждаемые из импульсной катодной плазмы: толщина  $S$ , микротвердость  $H$ , ГПа, модуль Юнга  $E$ , ГПа и показатель преломления  $n$ .

Таблица 1

#### План эксперимента

P1 $U$ , В	P2 $\omega$ , Гц	P3 $N$	P4 $S$ , нм	P5 $H$ , ГПа	P6 $E$ , ГПа	P7 $n$
300	4	3000	190	19,7	299,4	2,72
200	4	3000	168	16,3	232,1	2,45
400	4	3000	202	21,8	286,3	2,64
300	1	3000	124	20,5	303,1	2,91
300	7	3000	152	18,1	290,3	2,76
300	4	1000	37	12,6	191,5	2,92
300	4	5000	223	24,6	308,1	2,62
200	1	1000	25	11,6	143,2	2,86
400	1	1000	55	12,1	156,8	2,55
200	7	1000	37	11,8	149,0	2,91
400	7	1000	49	12,3	157,7	2,98
200	1	5000	168	11,9	158,1	2,81
400	1	5000	218	21,1	262,6	2,59
200	7	5000	191	12,8	161,6	2,76
400	7	5000	275	23,8	294,8	2,54

Толщина и показатель преломления покрытий определялись методом лазерной эллипсометрии с помощью прибора LEF-752 при длине волны 632,8 нм, в режиме многоугловых измерений. Угол падения светового пучка составлял 65°. При расчете толщины и показателя преломления применялась модель «однородное покрытие – подложка» с известными оптическими постоянными подложки. Расчеты проводились методом поиска неизвестного параметра с последующей минимизацией функции ошибки методом наименьших квадратов.

Измерение механических параметров покрытий проводили с использованием наноиндентора «НаноСкан 4D» производства ФГБНУ «ТИСНУМ» (г. Троицк, Россия) методом индентирования в режиме с линейной разверткой прикладываемой силы нагружения. Индентирование проводили с однократным нагружением и разгрузением. В качестве индентора использовали алмазную трехгранную пирамидку Берковича.

Моделью объекта исследования являлись функции отклика, связывающие выходные параметры ( $S$ ,  $H$ ,  $E$ ,  $n$ ) с факторами ( $U$ ,  $\omega$ ,  $N$ ), которые принимали заданные значения при проведении экспериментов (табл. 1). При создании поверхности отклика использовался метод непараметрической регрессии [31], реализованный в модуле DesignXplorer программы ANSYS Workbench.

Была проведена оценка влияния входных параметров на выходные параметры, характеризующие УП (рис. 2, 3). На выходные параметры оказывают влияние все факторы эксперимента. Стоит отметить, что наибольшее воздействие на выходные параметры оказывает количество импульсов  $N$ . Вторым по значимости параметром, определяющим изменение механических свойств и показателя преломления осаждаемых УП, является величина напряжения разряда. При этом толщина УП находится в большей зависимости от частоты следования импульсов (рис. 3).

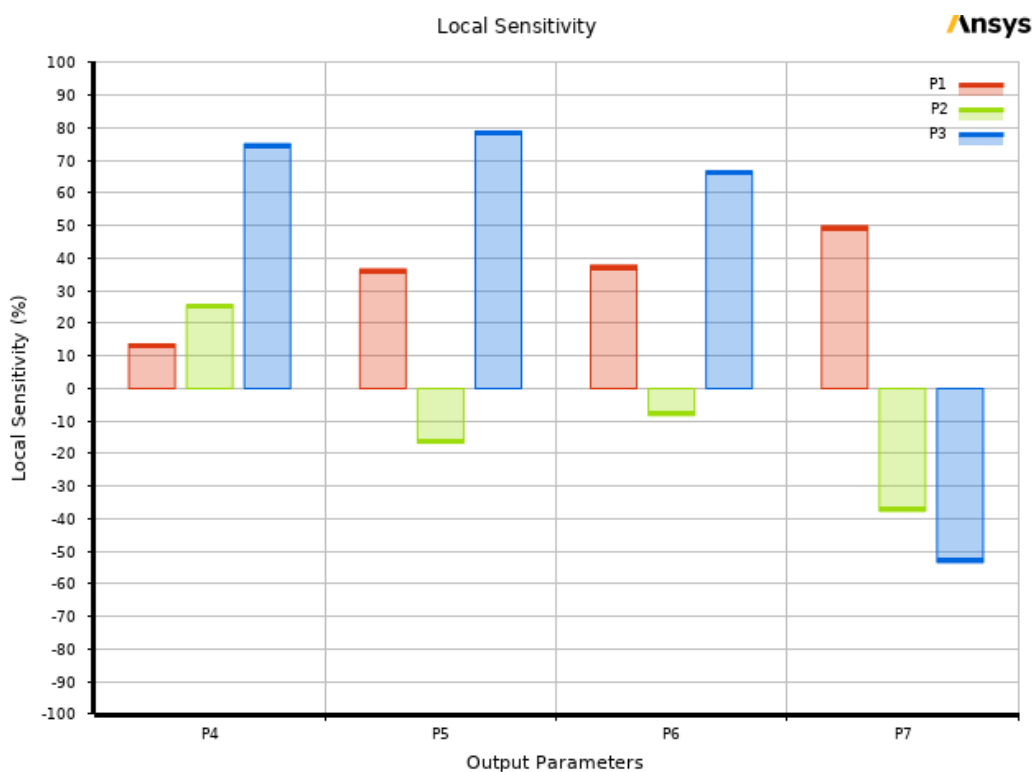


Рис. 2. Диаграмма чувствительности оптимизируемых параметров:  
P1 –  $U$ , P2 –  $\omega$ , P3 –  $N$ , P4 –  $S$ , P5 –  $H$ , P6 –  $E$ , P7 –  $n$

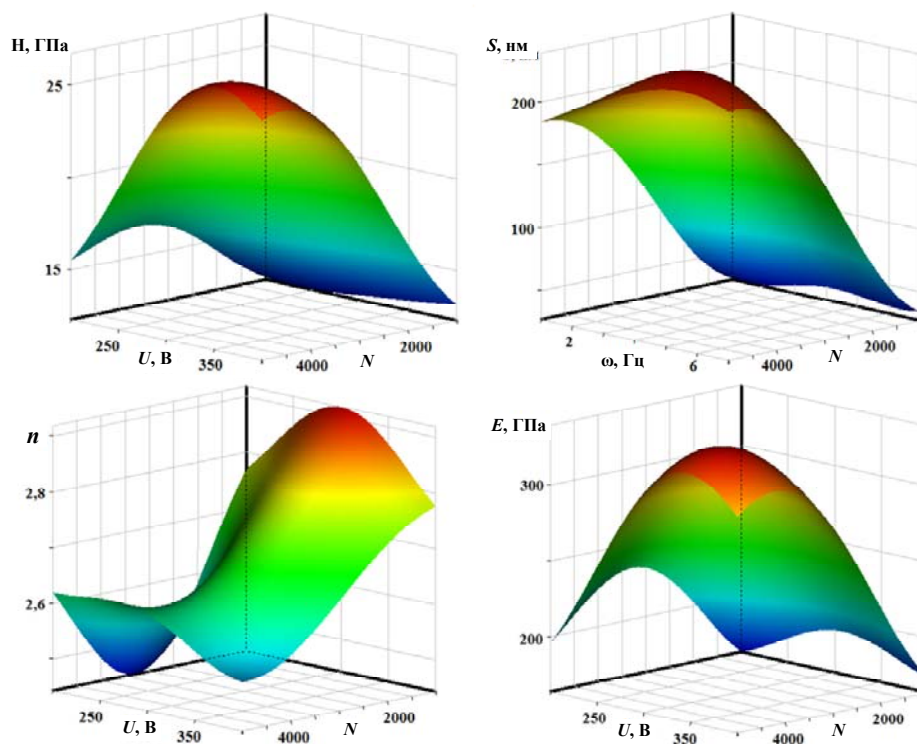


Рис. 3. Зависимость входных параметров от выходных параметров

При проведении оптимизации использовался многокритериальный генетический алгоритм MOGA модуля DesignXplorer программы ANSYS с числом индивидов начальной популяции, равным 500, и числом индивидов за итерацию, равным 500.

При использовании УП для упрочнения рабочих поверхностей наиболее важными параметрами являются максимально высокие значения твердости и модуля упругости. В случае применения УП для защиты оптических элементов целесообразно нанесение покрытий с минимальной толщиной и высокими значениями показателя преломления. Соответственно, оптимизация параметров формирования УП, осажденных из импульсной катодной плазмы, выполнялась для двух вариантов постановки задачи (табл. 2):

1) по критериям максимума микротвердости  $H \rightarrow \max$  и максимума модуля Юнга  $E \rightarrow \max$ ;

2) по критериям максимума показателя преломления  $n \rightarrow \max$  и минимума толщины покрытия  $S \rightarrow \min$ .

В скобках в табл. 2 приведены значения параметров, полученные в результате экспериментов, при этом максимальная относительная погрешность результатов, полученных при использовании генетического алгоритма модуля DesignXplorer, не превысила 13 % при определении выходных параметров.

Таблица 2

#### Результаты оптимизации

P1 U, В	P2 ω, Гц	P3 N	P4 S, нм	P5 H, ГПа	P6 E, ГПа	P7 n
326	7	1002	36 (40)	12,1 (12,5)	166,3 (183,3)	3,00 (2,89)
351	4	4584	260,7 (259,3)	26,7 (25,1)	337,7 (299,8)	2,57 (2,84)

### Заключение

Продемонстрирована возможность оптимизации параметров формирования УП, осажденных из импульсной катодной плазмы, с применением генетического алгоритма MOGA модуля DesignXplorer программы ANSYS. В результате оптимизации установлены режимы осаждения УП с характеристиками, обеспечивающими их эффективное применение для упрочнения рабочих поверхностей и для защиты оптических элементов.

### Литература

1. Robertson, J. Diamond-like amorphous carbon / J. Robertson // Mater. Sci. Eng. R-Rep. – 2002. – Vol. 37. – P. 129–281.
2. Стрельницкий, В. Е. Вакуумно-дуговой синтез алмазоподобных пленок: история, последние разработки, применение, перспективы / В. Е. Стрельницкий // Вопр. атом. науки и техники. – 2002. – № 6. – С. 125–133.
3. Рогачев, А. В. Восстановление и повышение износостойкости деталей машин / А. В. Рогачев, С. С. Сидорский. – Гомель : БелГУТ, 2005. – 343 с.
4. Hauert, R. An overview on diamond-like carbon coatings in medical applications / R. Hauert, K. Thorwarth, G. Thorwarth // Surface and Coatings Technology, 2013. – Vol. 233. – P. 119–130.
5. Нанокпозиционные покрытия и технологии в микроэлектронике / В. А. Емельянов [и др.] – Минск : Беларус. навука, 2014. – 450 с.
6. 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, Surface and Coatings Technology / J. Vetter. – 2014. – Vol. 257. – P. 213–240.
7. Properties and Classification of Diamond-Like Carbon Films / N. Ohtake [et al.] // Materials. – 2021. – Vol. 14. – P. 315.
8. Механические свойства легированных медью углеродных покрытий, осажденных из импульсной катодной плазмы / Д. Г. Пилипцов [и др.] // ПФМТ. – 2010. – № 3 (4). – С. 25–30.
9. Морфология и механические свойства углеродных покрытий, полученных из плазмы импульсного катодно-дугового разряда сложной формы / Д. Г. Пилипцов [и др.] // ПФМТ. – 2012. – № 3 (12). – С. 33–36.
10. Chekan, N. Advanced Pulsed Arc Technique of Fabrication of DLC Films and their Technical and Medical Applications / N. Chekan, I. Chapter // Diamond-like Carbon Films / ed. by Yuto S. Tanaka. – Nova Science Pub Inc., 2011. – P. 1–38.
11. Влияние условий синтеза на оптические свойства углеродных покрытий / Н. Н. Федосенко [и др.] // Чрезвычайн. ситуации: образование и наука. – 2014. – Т. 9, № 2. – С. 61–65.
12. Influences of pulse frequency on structure and mechanical properties of DLC films synthesized by pulsed cathodic arc evaporation / Bing Ye [et al.] // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 670–671. – P. 560–564.
13. Структура и оптические свойства покрытий алмазоподобного углерода / Н. М. Чекан [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 3. – С. 280–289.
14. Исследование структуры и механических свойств пленок тетраэдрального аморфного углерода, осажденных с помощью импульсного катодно-дугового источника при различных расстояниях между источником и подложкой / С. Ю. Чепкасов [и др.] // Сиб. физ. журн. – 2018. – Т. 13, № 3. – С. 55–60.

15. Емельянов, В. В. Теория и практика эволюционного моделирования / В. В. Емельянов, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 432 с.
16. Красновская, С. В. Обзор возможностей оптимизационных алгоритмов при моделировании конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов методом конечных элементов / С. В. Красновская, В. В. Напрасников // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физика-техн. наук. – 2016. – № 2. – С. 92–98.
17. Fonseca, C. Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation discussion and generalization / C. Fonseca, P. Flemingz // In Proceedings of The 5th International Conference on Genetic Algorithms. CA, USA. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc. – 1993. – P. 416–423.
18. Odu, G. O. Review of multi-criteria optimization methods theory and applications / G. O. Odu, O. E. Charles-Owaba // IOSR Journal of Engineering. – 2013. – Vol. 3, N 10. – P. 1–14.
19. Бессмельцев, В. П. Оптимизация режимов лазерной микрообработки / В. П. Бессмельцев, Е. Д. Булушев // Автометрия. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 3–21.
20. Multi-Objective Optimization of Microstructure of Gravure Cell Based on Response Surface Method / S. Wu [at al.] // Processes. – 2021. – Vol. 9, N 2. – P. 1–15.
21. Multi-objective optimization of microstructure of gravure cell based on response surface method / S. Wu [et al.] // Processes. 2021. – Vol. 9, N 403. – P. 1–15.
22. Griffiths, J. Optimization of process parameters in laser transmission welding for food packaging applications / J. Griffiths, C. Dowding // Procedia CIRP.74. – 2018. – P. 528–532.
23. Grebenişan, G. The multi-objective genetic algorithm optimization, of a superplastic forming process, using ANSYS® / G. Grebenişan, N. Salem // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 126. – P. 03003.
24. Никитюк, Ю. В. Оптимизация параметров лазерного раскалывания кварцевого стекла / Ю. В. Никитюк, А. Н. Сердюков, И. Ю. Аушев // Проблемы физики, математики и техники. – 2021. – № 4 (49). – С. 21–28.
25. Nikityuk, Y. V. Optimization of two-beam laser cleavage of silicate glass / Y. V. Nikityuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // J. Opt. Technol. – 2022. – Vol. 89. – P. 121–125.
26. Оптимизация параметров поглощающих метаматериалов на основе П-образных элементов / С. А. Хахомов [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3 (52). – С. 56–60.
27. Оптимизация параметров обработки стали 12Х18Н9Т круглыми лазерными пучками / Ю. В. Никитюк [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2022. – № 2. – С. 17–24.
28. Ansys.com – Официальный сайт компании ANSYS.
29. Моргунов, А. П. Планирование и анализ результатов эксперимента : учеб. пособие / А. П. Моргунов, И. В. Ревина ; М-во образования России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2014. – 343 с.
30. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 278 с.
31. Santner, T. J. The Design and Analysis of Computer Experiments / T. J. Santner, B. J. Williams, W. I. Notz // Springer Series in Statistics, 2003. – 285 p.