

УДК 519.21

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.261218.47.565

РАЗРАБОТКА ПОДХОДА К ПОВЫШЕНИЮ КОГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

ЗАГОРОДНИЙ А. Б., *ассист.*

Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-82, e-mail: zagorodniy.a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740

Аннотация. Постановка проблемы. Оптимизация технологии плазменно-дугового напыления осложняется ее многокритериальностью и многопараметричностью. Поиск путей повышения служебных характеристик уплотнительного прирабатываемого покрытия для деталей компрессора газотурбинного двигателя обусловлен тем, что эти покрытия работают при температуре, не превышающей обычно 650 °С, что ограничивает область их использования. Поэтому разработка подхода к повышению когезионной прочности прирабатываемого покрытия позволит повысить срок эксплуатации газотурбинных двигателей. **Материалы и методика.** В работе предлагается с целью повышения когезионной прочности уплотнительного прирабатываемого покрытия применить метод планирования экстремальных экспериментов. Применение этого метода предусматривает проведение активных экспериментов в некоторой рабочей области процесса, заданной численными значениями управляемых переменных $X_k \in X_i$ процесса газотермического напыления. Предполагается, что в этой части рабочей области управляемых переменных показатели функции цели имеют субоптимальные значения. Определена матрица планирования экспериментов 2⁵. **Результаты и их обсуждение.** Определен диапазон значений 11 переменных, влияющих на когезионную прочность. Для проверки на воспроизводимость экспериментов, в каждой точке факторного пространства (в каждой строке матрицы) проводилось по четыре параллельных опыта. На основании анализа коэффициентов полученного многопараметрического уравнения от 11 заданных переменных определена степень влияния каждого переменного на функцию цели. Такой подход позволил установить пару переменных X_5 (мощность) и X_7 (расход азота), которые наиболее сильно по сравнению с рассматриваемыми переменными повышают показатели когезионной прочности. Мощность X_5 определялась показателями силы тока 280...400 А и напряжения 40...75 В. Получена модель прогноза когезионной прочности в зависимости от выбранной пары переменных. **Выводы.** Предложен подход к повышению когезионной прочности покрытия для деталей компрессора газотурбинного двигателя с применением метода планирования экстремальных экспериментов. Это позволило определить для выбранного критерия наиболее весомые управляемые переменные, которые обеспечивают его экстремум в заданной рабочей области.

Ключевые слова: когезионная прочность; газотурбинный двигатель; экстремальные эксперименты; матрица планирования; экстремум; модель прогноза

РОЗРОБКА ПІДХОДУ ДО ПІДВИЩЕННЯ КОГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ КОМПРЕСОРА ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

ЗАГОРОДНИЙ О. Б., *асист.*

Кафедра металознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-82, e-mail: zagorodniy.a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740

Анотація. Постановка проблеми. Оптимізація технології плазмово-дугового напилення ускладнюється її багатокритерійністю та багатопараметричністю. Пошук шляхів підвищення службових характеристик ущільнювального припрацьованого покриття для деталей компресора газотурбінного двигуна зумовлений тим, що ці покриття працюють за температури, яка перевищує зазвичай 650 °С, що обмежує область їх використання. Тому розроблення підходу до підвищення когезійної міцності припрацьованого покриття дозволить підвищити термін експлуатації газотурбінних двигунів. **Матеріали і методика.** У статті пропонується з метою підвищення когезійної міцності ущільнювального припрацьованого покриття застосувати метод планування екстремальних експериментів. Застосування цього методу передбачає проведення активних експериментів у деякій робочій області процесу, що задана числовими значеннями керованих змінних $X_k \in X_i$ процесу газотермічного напилення. Передбачається, що в цій частині робочої області керованих змінних показники функції мети мають субоптимальні значення. Визначено матрицю планування експериментів 2⁵. **Результати та їх обговорення.** Обчислено діапазон значень одинадцяти змінних, що впливають на когезійну міцність. Для перевірки на відтворюваність експериментів у кожній точці факторного простору (в кожному рядку матриці) проводилося по чотири паралельні досліди. На підставі аналізу коефіцієнтів отриманого багатопараметричного рівняння від 11 заданих змінних визначено ступінь впливу кожної змінної на функцію мети.

Такий підхід дозволив установити пару змінних X_5 (потужність) і X_7 (витрата азоту), які найсильніше порівняно з розглянутими змінними підвищують показники когезійної міцності. Потужність X_5 визначалася показниками сили струму 280...400 А і напруги 40...75 В. Отримано модель прогнозу когезійної міцності залежно від обраної пари змінних. **Висновки.** Запропоновано підхід до підвищення когезійної міцності покриття для деталей компресора газотурбінного двигуна із застосуванням методу планування екстремальних експериментів. Це дозволило визначити для обраного критерію найбільш вагомий керувані змінні, які забезпечують його екстремум у заданій робочій області.

Ключові слова: когезійна міцність; газотурбінний двигун; екстремальні експерименти; матриця планування; екстремум; модель прогнозу

DEVELOPING AN APPROACH TO INCREASING COHESIVE STRENGTH DURABILITY FOR DETAILS OF A COMPRESSOR FOR A GAS TURBINE ENGINE

ZAHORODNYI O.B., *Assist.*

Department of Materials Science and Material Processing, State Higher Education Institution "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel +38 (0562) 46-98-82, e-mail: zagorodny_a@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4158-1740

Abstract. Formulation of the problem. Optimization of plasma-arc spraying technology is complicated by its multi-criteria and multi-parameter nature. The search for ways to increase the performance characteristics of the running-in sealing coating for the compressor parts of a gas turbine engine is due to the fact that these coatings operate at a temperature not exceeding usually 650 °C, which limits the scope of their use. Therefore, the development of an approach to increase the cohesive strength of the running-in coating will increase the life of gas turbine engines. **Materials and methods.** In this paper, it is proposed to apply the method of planning extreme experiments to increase the cohesive strength of a sealing run-in coating. The application of this method involves conducting active experiments in a certain working area of the process given by the numerical values of the controlled variables $X_k \in X_i$ of the thermal spraying process. It is assumed that in this part of the workspace of controlled variables, the indicators of the goal function have suboptimal values. An experiment planning matrix 2^5 is defined. **Results and discussion.** The range of values of eleven variables that affect cohesive strength is determined. To test the reproducibility of experiments, four parallel experiments were carried out at each point of the factor space (in each row of the matrix). Based on the analysis of the coefficients of the obtained multi-parameter equation from 11 given variables, the degree of influence of each variable on the target function is determined. This approach made it possible to establish a pair of variables X_5 (power) and X_7 (nitrogen consumption), which increase the cohesion strength indicators most strongly compared with the variables under consideration. X_5 power was determined by current strength indicators of 280 – 400 A and voltage of 40 – 75 V. A model for predicting cohesive strength depending on the selected pair of variables is obtained. **Conclusions.** An approach is proposed to increase the cohesive strength of the coating for compressor parts of a gas turbine engine using the method of planning extreme experiments. This made it possible to determine for the selected criterion the most significant controlled variables that ensure its extremum in a given work area.

Keywords: cohesive strength; gas turbine engine; extreme experiments; planning matrix; extremum; forecast model

Постановка проблеми

Повышение когезионной прочности уплотнительного прирабатываемого покрытия для деталей компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) представляет собой сложную технологическую задачу. Это в первую очередь связано с многопараметричностью и многокритериальностью технологического процесса, где даже незначительное изменение параметров технологии может привести к значительному изменению свойств изготавливаемого изделия [1–3]. С технологической точки зрения для повышения работоспособности центробежного компрессора ГТД на его статор наносят мягкое прирабатываемое покрытие [4; 5].

В качестве материалов для прирабатываемого покрытия используют специальные полимеры, покрытия на основе графита, талька, асбеста, алюминиевой пудры, с добавками специальных лаков или силикатных связок. Эти покрытия работают при температуре, не превышающей обычно 650 °C, что ограничивает область их использования.

Поэтому задача повышения служебных характеристик прирабатываемых покрытий для деталей компрессора газотурбинного двигателя, включая когезионную прочность, является актуальной задачей материаловедения.

Материалы и методика

Для решения задачи повышения когезионной прочности прирабатываемых покрытий для деталей компрессора газотурбинного двигателя предлагается использовать математическое моделирование. Это обусловлено тем, что с помощью различных видов моделирования решают многие технологические задачи: оптимизируют процессы производства материалов путем выбора оптимальных значений исследуемых параметров, к примеру [6–8]; добиваются повышения свойств целевого продукта [9; 10]; моделируют структуру объектов исследования [11–14]; проводят ранжирование параметров технологии в зависимости от степени их влияния на критерии качества [14–16] и т. д. В работе [4] показан один из возможных путей решения

многокритеріальної задачі матеріалознавства на прикладі оптимізації технології плазменно-дугового напылення, що дає можливість застосування методики планування експериментів [17] для прогнозу когезійної міцності покриття.

К основним параметрам, визначаючим придатність приробуваного покриття, можна віднести: термостійкість, когезійну і адгезійну міцність, роботу врізання, шорхуватість поверхні (після механічної обробки).

В склад покриття входили наступні компоненти:

1. Алюмофосфат. Використовується для створення пористості, а також як зв'язуюче для переносу нітрида бора в покриття (нітрид бора в чистому вигляді не напыляється, так як не має рідкої фази). Нітрид бора в чистому вигляді (без зв'язки), потрапляючи в високотемпературну плазменну струю, сублимує (испаряється).

2. Нітрид бора. Виконує в покритті роль твердої мастила. Має дуже низький коефіцієнт тертя, знижує роботу врізання. Термостабільний.

3. Алюміній. Використовується в покритті для створення необхідної когезійної міцності і шорхуватості (поліруємістості).

Результати і їх обговорення

Для рішення задачі підходу до підвищення когезійної міцності покриття для деталей компресора газотурбінного двигача найбільш переважним виявився метод планування екстремальних експериментів [17], який передбачає проведення активних експериментів в певній робочій області процесу, заданій чисельними значеннями управляємих змінних $X_k \in X_i$ – процесу газотермічного напылення (див. табл. 1).

При цьому дрібний факторний експеримент визначався як 64 частка повного факторного експерименту $2^{11} = 2048$ спроб. В матриці планування (табл. 1) змінні $X_6 \div X_{11}$ формувалися як парні взаємодії відповідно: $X_6 = X_1X_2$; $X_7 = X_1X_3$; $X_8 = X_1X_4$; $X_9 = X_1X_5$; $X_{10} = X_2X_3$; $X_{11} = X_2X_4$.

Для регулювання показників когезійної міцності вибиралися параметри, що впливають на неї (див. табл. 1). В матриці планування експериментів О.У. – загальний рівень значень параметрів, І.В. – інтервал варіювання параметрів, В.У. і Н.У. – верхній і нижній рівні значень параметрів. Всі задані параметри дослідження представлялися на двох рівнях: верхньому (+) і нижньому (-). Таким чином, кожен рядок матриці представляє окремий експеримент, результати проведення якого наведені в стовпці 13.

Таблиця 1

Матриця планування експериментів / Experiment Planning Matrix

№	Уровні змінних	Алюмофосфат Al(НРО ₄) ₃ (% в.с.)	Нітрид бора В (% в.с.)	Алюміній Al (% в.с.)	Фракція порошка (мм)	Мощність, (кВт)	Расход аргона, л/мин.	Расход азота, л/мин.	Расход транспортирующего газа аргона, л/мин.	Дистанция напыления, мм	Расход напыляемого порошка, г/мм	Диаметр сопла, мм	Когезійна міцність, кгс/мм ²
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	О.У.	25	34	34	0,15	23	17,5	12,5	3,5	100	25	7	до 3 кгс/мм ²
2	І.В.	3	4	4	0,05	5	2,5	2,5	1,5	20	15	1	
3	В.У.	26	38	38	0,20	28	20	15	5	120	40	8	
4	Н.У.	20	30	30	0,10	18	15	10	2	80	10	6	
код	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	$X_6=X_1X_2$	$X_7=X_1X_3$	$X_8=X_1X_4$	$X_9=X_1X_5$	$X_{10}=X_2X_3$	$X_{11}=X_2X_4$	$Y^{сп}$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1,950
2	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	1,560
3	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	2,670
4	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	2,280
5	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+	-	+	1,410
6	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	1,020
7	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	2,130
8	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	1,740
9	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-	2,670
10	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	2,280
11	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	2,790
12	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+	2,400

Окончание таблицы 1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
13	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	1,830
14	+	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-	1,440
15	+	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	+	1,950
16	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	1,560
17	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	2,340
18	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	1,350
19	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	2,640
20	+	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	1,650
21	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	2,700
22	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	1,710
23	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	-	-	3,000
24	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	2,010
25	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	2,760
26	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	1,770
27	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	2,460
28	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	1,470
29	+	-	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	2,820
30	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	1,830
31	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	2,520
32	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	1,530

Для проверки на воспроизводимость экспериментов в каждой точке факторного пространства (в каждой строке матрицы) проводилось по четыре параллельных опыта (см. табл. 2), поэтому численные значения когезионной прочности, представленные в столбце 13 матрицы (табл. 1), являются средним из четырех параллельных опытов.

В ходе реализации матрицы планирования получены уравнения регрессии в

стандартизированной (1) и нормализованной (2) формах.

$$Y_1^{ст.} = 2,070 - 0,090X_1 - 0,060X_2 + 0,120X_3 - 0,105X_4 + 0,345X_5 - 0,075X_6 + 0,225X_7 - 0,105X_8 - 0,150X_9 - 0,075X_{10} - 0,150X_{11} - 0,075X_2 X_3. \quad (1)$$

$$Y_1^{нор.} = -3,449 + 0,030X_1 + 0,144X_2 + 0,189X_3 - 2,100X_4 + 0,069X_5 - 0,030X_6 + 0,090X_7 - 0,070X_8 - 0,003X_9 - 0,005X_{10} - 0,150X_{11} - 0,005X_2 X_3. \quad (2)$$

Таблица 2

Экспериментальные значения когезии / Experimental Cohesion Values

Строки матрицы	Опытные значения функции Y в четырех параллельных опытах, кгс/мм ²				Среднее значение функции Y ₁ ^{сп}	Значения функции Y, вычисленные по уравнению (1)
	2	3	4	5		
1	1,9	1,7	2,2	1,8	1,950	1,875
2	1,6	1,7	1,4	1,7	1,560	1,485
3	2,7	2,6	2,8	2,7	2,670	2,595
4	2,3	2,3	2,1	2,5	2,280	2,205
5	1,4	1,6	1,3	1,3	1,410	1,485
6	1,0	1,1	0,9	1,0	1,020	1,095
7	2,1	2,3	2,0	2,0	2,130	2,205
8	1,7	1,4	1,8	1,9	1,740	1,815
9	1,7	2,8	2,5	2,8	2,670	2,745
10	2,3	2,1	2,2	2,6	2,280	2,355
11	2,8	2,9	2,8	2,7	2,790	2,865
12	2,4	2,4	2,3	2,5	2,400	2,475
13	1,8	2,0	1,7	1,7	1,830	1,755
14	1,4	1,5	1,2	1,5	1,440	1,365
15	1,9	1,7	2,0	2,0	1,950	1,875
16	1,6	1,8	1,6	1,4	1,560	1,485
17	2,3	2,2	2,4	2,3	2,340	2,265
18	1,3	1,4	1,2	1,3	1,350	1,275

Окончание таблицы 2						
1	2	3	4	5	6	7
19	2,6	2,4	2,9	2,5	2,640	2,565
20	1,6	1,9	1,4	1,5	1,650	1,575
21	2,7	2,4	2,9	2,8	2,700	2,775
22	1,7	1,8	1,5	1,8	1,710	1,785
23	3,0	2,9	2,8	3,3	3,000	3,075
24	2,0	1,9	2,1	2,0	2,010	2,085
25	2,8	2,6	3,0	2,8	2,760	2,835
26	1,8	1,9	2,0	1,5	1,770	1,845
27	2,5	2,3	2,7	2,5	2,460	2,535
28	1,5	1,5	1,7	1,3	1,470	1,545
29	2,8	2,9	2,6	2,9	2,820	2,745
30	1,8	1,4	1,8	2,0	1,830	1,755
31	2,5	2,3	2,6	2,6	2,520	2,445
32	1,5	1,7	1,4	1,4	1,530	1,455

По результатам анализа полученной модели (1) получена гистограмма, описывающая влияние выбранных параметров $X_1 - X_{11}$ на функцию цели Y (см. рис. 1)

Анализ уравнений (1) и (2) показал, что полученные закономерности адекватно описывают исследуемый процесс, так как для заданного матрицей числа степеней свободы $N = 32 - 11 = 21$ по критерию Фишера [17] проверялась гипотеза адекватности данных уравнений. Модель адекватно описывает исследуемую рабочую область:

$$F_{\text{набл.}} = 1,062 \text{ при } F_{\text{кр.}} = 2,200.$$

Для каждого из уравнений (1) и (2) остаточная дисперсия оказалась меньше ошибки опыта, что подтвердило гипотезу их адекватности.

Согласно критерию Кохрена, опыты воспроизводимые, поскольку для Y $G_{\text{расчетное}} < G_{\text{табличного}}$ при уровне значимости 0,05 [18].

$$K_{\text{набл.}} = 0,339 \text{ при } K_{\text{крит.}} = 0,475.$$

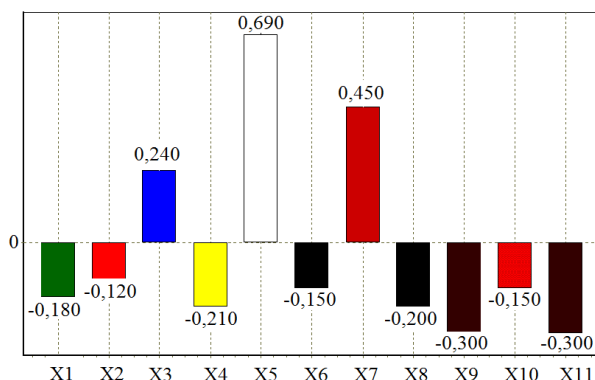


Рис. 1. Степень влияния параметров технологии на когезионную прочность /
Fig. 1. The degree of influence of technology parameters on cohesive strength

Анализ гистограммы показал, что наибольшее влияние на когезионную прочность оказывают переменные X_5 (мощность плазменной дуги) и X_7 (расход азота), которые повышают ее показатели. Это согласуется с требованиями технологического процесса и физико-химическим воздействием этих переменных на когезионную прочность [18]. Мощность X_5 регулировалась следующими показателями: сила тока 280–400 А, напряжение 40–75 В.

Исходя из преобладающей степени влияния переменных X_5 и X_7 на функцию цели Y получена поверхность (рис. 2) и математическая модель прогноза (3) ее описывающая:

$$Y = -0,642 + 0,069X_5 + 0,09X_7. \quad (3)$$

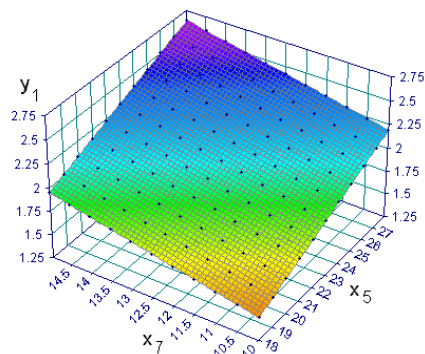


Рис. 2. Зависимость когезионной прочности от мощности (X_5) и расхода азота (X_7) /

Fig. 2. The dependence of cohesive strength on power (X_5) and nitrogen flow (X_7)

В заключении следует отметить, что применение метода планирования экстремальных экспериментов позволяет в конкретной технологической ситуации определять для выбранного приоритетного критерия наиболее весомые управляемые переменные, которые обеспечивают экстремум этого критерия. Поэтому для повышения показателей когезионной прочности выбирался данный подход.

Выводы

Рассмотрена задача повышения когезионной прочности прирабатываемых покрытий для деталей компрессора газотурбинного двигателя, которая решена путем применения метода планирования экстремальных экспериментов. Применение такого подхода позволило провести ранжирование 11 параметров технологии в зависимости от степени их влияния на когезионную прочность, что обеспечивает определение экстремума функции цели. Определена пара переменных, наиболее сильно влияющих на когезионную прочность, – мощность плазменной дуги и расход азота.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Большаков В. И. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2014. – № 11. – С. 77–81. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.11.0771>
2. Дубров Ю. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография / [Ю. Дубров, В. Большаков, В. Волчук]. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2015. – 236 с. – Режим доступу: <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
3. Большаков В. И. Этапы ідентифікації багатопараметричних технологій та шляхи їх реалізації / В. И. Большаков, В. М. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник НАН України. – 2013. – № 8. – С. 66–72. – Режим доступу : <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/67873>
4. Большаков В. И. Один из возможных путей решения многокритериальной задачи материаловедения на примере оптимизации технологии плазменно-дугового напыления / В. И. Большаков, А. Б. Загородний, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2008. – № 1. – С. 87–95.
5. Большаков В. И. Исследование теплозащитных прирабатываемых покрытий для проставок турбовинтовых авиационных двигателей / В. И. Большаков, В. И. Харченко, В. И. Журавель, А. Б. Загородний, В. И. Любушкин, В. Е. Замковой, А. Б. Милосердов // Строительство, материаловедение, машиностроение. – Вып. 45. – 2008. – С. 87–91.
6. Большаков В. И. Идентификация многопараметрических, многокритериальных технологий и пути их практической реализации / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2013. – № 4. – С. 5–11.
7. Bolshakov V. Fractals and properties of materials : monograph / [V. Bol'shakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov] – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016. – 140 p. – Режим доступу: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
8. Основы организации фрактального моделирования : монография / [В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров]. – Киев: Академперіодика НАН України, 2017. – 170 с.
9. Bolshakov V. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy / V. I. Bolshakov, V. M. Volchuk, Yu. I. Dubrov // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2018. – Vol. 40, no 9. – Pp. 1165–1171. – Режим доступу : DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165
10. Большаков В. И. Применение теоретико-информационного подхода для идентификации структуры металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2014. – № 8. – С. 4–9. – Режим доступу : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/4134>
11. Большаков В. И. О применении имитационного моделирования в материаловедении / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2015. – № 4. – С. 26–31. – Режим доступу : <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/26-31>
12. Большаков В. И. Разработка и исследование метода определения механических свойств металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2004. – № 1. – С. 43–54.
13. Volchuk V. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism / V. Volchuk, I. Klymenko, S. Kroviakov, M. Orešković // Tehnički glasnik – Technical Journal. – 2018. – Vol. 12. – № 2. – Pp. 93–97. – Режим доступу : <https://hrcak.srce.hr/202359>
14. Большаков В. И. Формирование модели прогноза качества материала, основанной на экспертной оценке и активном эксперименте / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Л. Н. Дейнеко, Ю. И. Дубров // Компьютерное материаловедение и обеспечение качества : матер. к 45-му междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов. – Одесса : АстроПринт, 2006. – С. 146–150.
15. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий / В. Н. Волчук // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2017. – Т. 39. – № 3. – С. 949–957. – Режим доступу: <http://mfint.imp.kiev.ua/ru/abstract/v39/i07/0949.html>
16. Большаков В. И. Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді НАН України. – 2017. – № 4. – С. 42–48. – Режим доступу : <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.04.00>

17. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / [В. В. Налимов, Н. А. Чернова]. – Москва : Наука, 1965. – 340 с.
18. Круг Г. К. Планирование эксперимента в условиях временного дрейфа / Г. К. Круг, А. Н. Лысенков // Труды Московского энергетического института. – 1966. – Вып. 67. – С. 127–173.

REFERENCES

1. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O prognozirovani kachestva tselevogo produkta v periodicheskikh tekhnologiyakh* [Predicting the quality of a desired product in periodic technologies]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 11, pp. 77–81. (in Russian).
2. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p. (in Russian).
3. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Etapy identyfikatsiyi bahatoparametrychnykh tekhnolohiy ta shlyakhy yikh realizatsiyi* [Stages multiparameter identification technologies and ways of their implementation]. *Visnyk Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2013, no. 8, pp. 66–72. (in Ukrainian).
4. Bolshakov V.I., Zagorodnyy O.B. and Dubrov Yu.I. *Odin iz vozmozhnykh putej resheniya mnogokriterial'noj zadachi materialovedeniya na primere optimizatsii tekhnologii plazmenno–dugovogo napyleniya* [One of the possible ways to solve the multicriteria material science problem by the example of optimization of plasma-arc spraying technology]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2008, no. 1, pp. 87–95. (in Russian).
5. Bolshakov V.I., Kharchenko V.I., Zhuravel V.I., Zahorodnyi O.B., Lyubushkin V.I., Zamkova V.Ye. and Mylosierdov A.B. *Issledovaniye teplozashchitnykh prirabatyvayemykh pokrytiy dlya prostavok turbo-vintovykh aviatsionnykh dvigateley* [Research of heat-protective running-in coatings for spacers of turbo-prop aircraft engines]. *Stroytelstvo, materiyalovedeniye, mashynostroeniye* [Construction, materials science, engineering]. Vol. 45, 2008, pp. 87–91. (in Russian).
6. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Identifikatsiya mnogoparametricheskikh, mnogokriterial'nykh tekhnologiy i puti ikh prakticheskoy realizatsii* [Multiparameter identification, multicriteria techniques and ways of their implementation]. *Metaloznnavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2013, no. 4, pp. 5–11. (in Russian).
7. Bolshakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
8. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Fundamentals of fractal modeling*. Kyiv, Ukraine : PH "Akademperiodyka" National Academy of Sciences of Ukraine, 2017, 170 p. (in Russian).
9. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Regularization of One Conditionally Ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy*. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018, vol. 40, no. 9, pp. 1165–1171.
10. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Primeneniye teoretiko-informatsionnogo podkhoda dlya identifikatsii struktury metalla* [The use of information–theoretic approach to identify the structure of the metal]. *Visnyk Prydniprovsk'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2014, no. 8, pp. 4–9. (in Russian).
11. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *O primenenii imitatsionnogo modelirovaniya v materialovedenii* [The application simulated modelling in materials science]. *Metaloznnavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 4, pp. 26–31. (in Russian).
12. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Razrabotka i issledovaniye metoda opredeleniya mekhanicheskikh svoystv metalla na osnove analiza fraktal'noy razmernosti yego mikrostruktury* [Development and study of the method for determining the mechanical properties of a metal based on an analysis of the fractal dimension of its microstructure]. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2004, no. 1, pp. 43–54. (in Russian).
13. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S., Orešković M. *Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism*. *Tehnički glasnik – Technical Journal*. 2018, vol. 12, no. 2, pp. 93–97.
14. Bolshakov V.I., Volchuk V.M., Dubrov Yu.I. and Deineko L.M. *Formirovaniye modeli prognoza kachestva materiala, osnovannoy na `ekspertnoj ocenke i aktivnom `eksperimente* [Formation of a model for predicting the quality of a material based on expert judgment and an active experiment]. *Komp'yuternoe materialovedeniye i obespecheniye kachestva : mater. k 45-mu mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizatsii kompozitov* [Computer Science and Quality Assurance : mater. to the 45th Intern. Sem. on modeling and optimization of composites]. Odessa : AstroPrint, 2006, pp. 146–150. (in Russian).
15. Volchuk V.M. *K primeneniyu fraktal'nogo formalizma pri ranzhirovani kriteriyev kachestva mnogoparametricheskikh tekhnologiy* [On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies]. *Metallofizika i noveyshiye tekhnologii* [Metal Physics and Advanced Technologies]. 2017, vol. 39, no 3, pp. 949–957. (in Russian).
16. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Topologicheskiye i fraktal'nyye invarianty struktury dlya otsenki kachestva metalla* [Topological and fractal invariants of a structure to assess the quality of a metal]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2017, no. 4, pp. 42–48. (in Russian).
17. Nalimov V.V. and Chernova N.A. *Statisticheskiye metody planirovaniya ekstremal'nykh eksperimentov* [Statistical methods for planning extreme experiments]. Moscow : Nauka, 1965, 340 p. (in Russian).
18. Krug G.K. and Lysenkov A.N. *Planirovaniye eksperimenta v usloviyakh vremennogo dreyfa* [Planning an experiment under conditions of temporary drift]. *Trudy Moskovskogo energeticheskogo instituta* [Proceedings of the Moscow Energy Institute]. 1966, vol. 67, pp. 127–173. (in Russian).

Надійшла до редакції: 11.12.2018