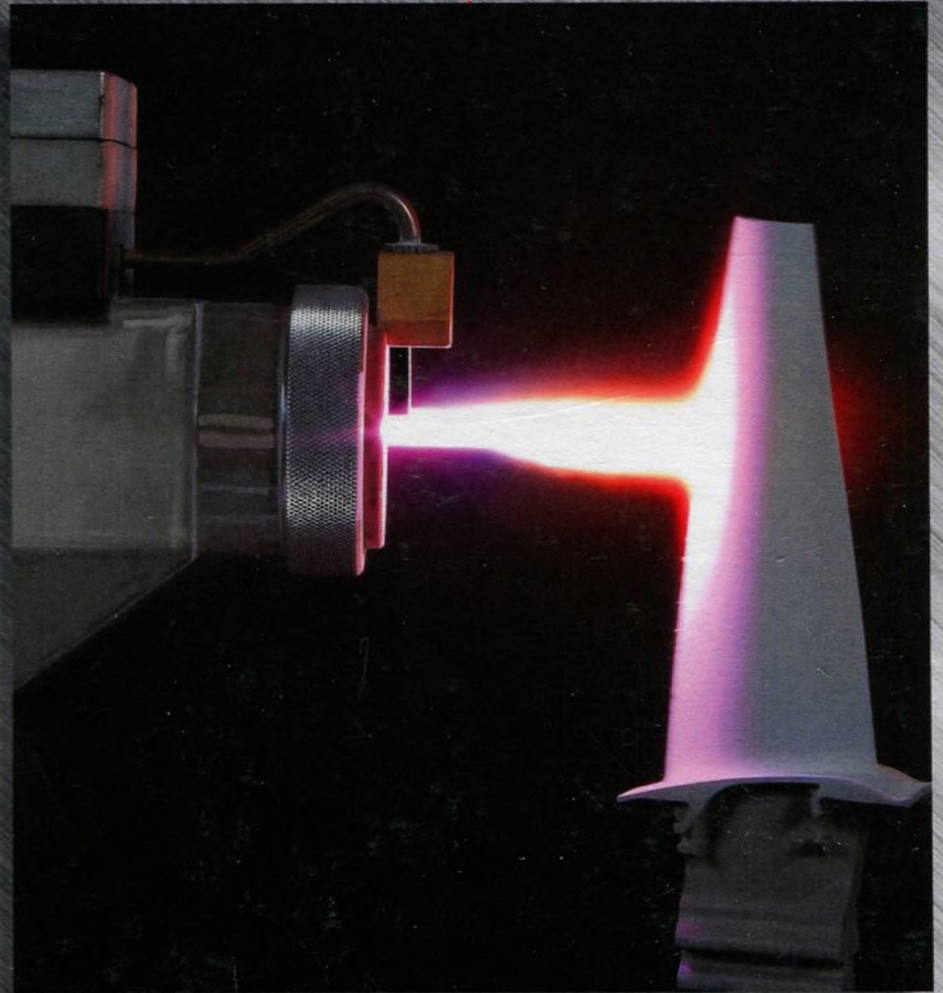


621.793
D 79

О. М. Дубовий
А. А. Карпеченко
М. М. Бобров

O. M. Dubovyi
A. A. Karpechenko
M. M. Bobrov



**ТЕХНОЛОГІЯ ГАЗОТЕРМІЧНОГО
І ВАКУУМНО-КОНДЕНСАЦІЙНОГО
НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ**



**THERMAL
AND VACUUM-CONDENSATION
SPRAY TECHNOLOGY**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ
Національний університет
кораблебудування імені адмірала Макарова

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE
Admiral Makarov National University
of Shipbuilding

О. М. Дубовий,
А. А. Карпеченко, М. М. Бобров

O. M. Dubovyi,
A. A. Karpechenko, M. M. Bobrov

ТЕХНОЛОГІЯ ГАЗОТЕРМІЧНОГО І ВАКУУМНО-КОНДЕНСАЦІЙНОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

THERMAL AND VACUUM-CONDENSATION SPRAY TECHNOLOGY

*Рекомендовано Вченою Радою НУК
як підручник (протокол № 3 від 27.03.2018)*

*Recommended by the Academic Council of
NUS as a study guide (the protocol No. 3 dated
27.03.2018)*

Миколаїв
Видавець Торубара В. В.
2018

Mykolaiv
Publisher Torubara V. V.
2018

УДК 621.791.9 (075.8)
ББК 30.61 я7
Д79

Рецензенти:

В. Ф. Квасницький, д-р техн. наук, проф., Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова;
О. М. Сизоненко, д-р техн. наук, проф., Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України;
Л. І. Коростильов, д-р техн. наук, проф., Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Дубовий О. М.

Д79 Технологія газотермічного і вакуумно-конденсаційного нанесення покриттів : Підручник / О. М. Дубовий, А. А. Карпеченко, М. М. Бобров. — Миколаїв : видавець Торубара В. В., 2018. — 202 р.
ISBN 978-617-7472-16-1

У підручнику розглянуто процеси газотермічного та вакуумно-конденсаційного напилення покриттів. Висвітлено загальні питання технології та основні організаційно-технологічні завдання проектування виробництва напилених покриттів. Детально розглянуто матеріали для напилювання покриттів, технологічні параметри та їх вплив на якість покриттів. Наведено приклади математичного моделювання та комп'ютерної оптимізації процесів напилення покриттів. Подано описи схем, принципів побудови основних типів технологічного обладнання. Розглянуто наукові аспекти та подані приклади розвитку процесів напилення і підвищення фізико-механічних властивостей покриттів.

Підручник призначений для студентів спеціальності «Матеріалознавство» і може бути корисним інженерно-технічним працівникам, які займаються розробленням і застосуванням напилених покриттів.

УДК 621.791.9 (075.8)
ББК 30.61 я7

Dubovoy A. N.

D79 Thermal And Vacuum-Condensation Spray Technology : Study Guide / O.M. Dubovyi, A. A. Karpechenko, M. M. Bobrov. — Mykolaiv : publisher Torubara V. V., 2018. — 202 p.
ISBN 978-617-7472-16-1

The scientific aspects and examples of development of spraying processes and increase of physical and mechanical properties of coatings are presented.

The material outlined in the textbook covers the characteristics of primary materials and their properties, the processes of forming the coatings by thermal and vacuum-condensation methods, the structure and principles of the work of the installations for coating, the influence of technological parameters of application and additional processing on the properties of coatings.

The material of the textbook contains the results of new scientific and technical developments, aimed at improving equipment and improving the properties of the coatings, laid out in the problem style and focused on the independent work of students.

UDC 621.791.9 (075.8)
BBK 30.61 я7

ЗМІСТ ■ CONTENTS

ПЕРЕДМОВА.....	6	Preface.....	6
1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГАЗОТЕРМІЧНОГО І ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАЦІЙНОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ... 8		1. GENERAL ISSUES IN TECHNOLOGY OF THERMAL AND VACUUM CONDENSATION SPRAYING OF COATINGS.....	8
1.1. Призначення покриттів і їх значення для сучасної техніки 8		1.1. Designation of coatings and their relevance in modern technology.....	8
1.2. Огляд історії розвитку напилених покриттів..... 9		1.2. History of sprayed coatings development.....	9
1.3. Покриття. Поняття, визначення та класифікація..... 10		1.3. Coating. Concept, definition and classification.....	10
1.4. Призначення та класифікація обладнання для газотермічних процесів напилення..... 16		1.4. Purpose and classification of equipment for gas-thermal spraying.....	16
1.5. Схема процесу, основні параметри напилення..... 18		1.5. Process flow and basic parameters of spraying.....	18
1.6. Вплив параметрів газотермічного напилення на ефективність процесу..... 20		1.6. Influence of gas-thermal spraying parameters on the process efficiency.....	20
1.7. Вибір типу, складу покриття і його товщини. Конструювання покриттів..... 24		1.7. Selecting the type, composition and thickness of the coating. Constructing the coating.....	24
1.8. Застосування підшарів..... 27		1.8. Application of sublayers.....	27
1.9. Вибір методів і способів напилювання покриттів..... 28		1.9. Selection of methods and techniques of spraying.....	28
1.10. Основні деталі і вузли обладнання, для яких ефективне застосування методів напилення покриттів 29		1.10. Main parts and components of equipment for which spraying of coatings is effective.....	29
1.11. Основні організаційно-технологічні завдання проекування виробництва напилених покриттів..... 30		1.11. Main organizational and technological objectives of the sprayed coatings production.....	30
2. ПОРОШКИ І ДРОТИ ДЛЯ НАПИЛЮВАННЯ..... 32		2. POWDERS AND WIRES FOR SPRAYING.....	32
2.1. Загальна характеристика видів матеріалів для напилювання..... 32		2.1. General characteristic of the types of spraying materials..	32
2.2. Основні вимоги до порошоків для газотермічного напилювання та їх підготовка..... 35		2.2. Basic requirements for powders for thermal spraying and their preparation.....	35
2.3. Дроти та прутки для газотермічного напилювання..... 37		2.3. Wires and rods for thermal spraying.....	37
2.4. Характеристики порошоків для газотермічного напилювання покриттів..... 37		2.4. Characteristics of powders for thermal sprayed coatings.....	37
2.5. Основні вітчизняні і закордонні матеріали, які застосовуються для напилення покриттів різноманітного призначення..... 39		2.5. The main domestic and foreign materials that are used for coating deposition of various purposes.....	39
3. ПІДГОТОВКА ПОВЕРХНІ ПІД НАПИЛЕННЯ..... 41		3. SURFACE PREPARATION TO SPRAYING.....	41
3.1. Очищення і миття виробів..... 41		3.1. Cleaning and washing of products.....	41
3.2. Механічний, струминно-абразивний та інші способи підготовки..... 43		3.2. Mechanical, jet-abrasive and other methods of preparation	43
3.3. Методи оцінки підготовки поверхні деталей під газотермічне напилення..... 46		3.3. Methods for evaluation of the parts surface preparation to thermal spraying.....	46

4. ОБЛАДНАННЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ГАЗОПОЛУМЕНЕВОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ.....	51	4. EQUIPMENT AND TECHNOLOGY OF THE FLAME SPRAYING OF COATINGS.....	51
4.1. Газополуменеві установки та пальники для напилення.....	51	4.1. Flame spraying installations and spraying burners.....	51
4.2. Особливості експлуатації обладнання і вимоги з техніки безпеки.....	53	4.2. Special features of equipment operation and safety requirements.....	53
4.3. Матеріали для газополуменевого напилення.....	55	4.3. Materials for flame spraying.....	55
4.4. Технологічні особливості газополуменевого напилення. Технологічна схема напилення.....	55	4.4. Technological features of flame spraying. Process flow diagram of spraying.....	55
4.5. Вибір технологічних параметрів газополуменевого напилення та їх вплив на ефективність процесу.....	56	4.5. Selection of technological parameters of flame spraying and their impact on the process efficiency.....	56
4.6. Перспективи розвитку газополуменевого напилення покриттів.....	59	4.6. Prospects of development of flame spraying of coatings.....	59
5. ОБЛАДНАННЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ.....	61	5. EQUIPMENT AND TECHNOLOGY OF ELECTRIC-ARC SPRAYING OF COATINGS.....	61
5.1. Апаратура і обладнання для електродугового напилення покриттів.....	61	5.1. Devices and equipment for electric-arc spraying of coatings	61
5.2. Способи і технологічні особливості електродугового напилення покриттів.....	62	5.2. Techniques and technological features of electric-arc spraying of coatings.....	62
5.3. Електродугове напилення композиційних покриттів із застосуванням порошкових матеріалів.....	69	5.3. Electric-arc spraying of composite coatings with the use of powder materials.....	69
6. ОБЛАДНАННЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ.....	77	6. EQUIPMENT AND TECHNOLOGY OF PLASMA SPRAYING OF COATINGS.....	77
6.1. Обладнання для плазмового напилення покриттів.....	77	6.1. Equipment for plasma spraying of coatings.....	77
6.2. Матеріали для плазмового напилення.....	83	6.2. Materials for plasma spraying.....	83
6.3. Способи і технологічні особливості плазмового напилення	86	6.3. Techniques and technological features of plasma spraying.	86
6.4. Технологічна схема плазмового нанесення покриттів.....	88	6.4. Process flow diagram of plasma spraying of coatings.....	88
6.5. Вибір оптимального режиму плазмового напилювання	88	6.5. Selection of the optimal mode of plasma spraying.....	88
6.5.1. Математичне моделювання процесу плазмового напилення.....	89	6.5.1. Mathematical modeling of the process of plasma spraying.....	89
6.5.2. Експериментальна перевірка адекватності узагальненої математичної моделі.....	93	6.5.2. Experimental verification of adequacy of the generalized mathematical model.....	93
6.5.3. Комп'ютерна оптимізація параметрів режиму плазмового напилення покриттів.....	97	6.5.3. Computerized optimization of parameters of the plasma spraying mode.....	97
6.6. Вплив технологічних параметрів плазмового напилювання на структуру і властивості покриттів.....	98	6.6. Impact of technological parameters of plasma spraying on the structure and properties of coatings.....	98
6.7. Області застосування і перспективи розвитку плазмового напилення. Переваги і недоліки методу.....	101	6.7. Fields of application and prospects of development of plasma spraying. Advantages and disadvantages of the method.....	101
7. ОБЛАДНАННЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ДЕТОНАЦІЙНОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ.....	103	7. EQUIPMENT AND TECHNOLOGY OF DETONATION SPRAYING OF COATINGS.....	103
7.1. Установки для детонаційного напилення.....	103	7.1. Installations for detonation spraying.....	103
7.2. Технологічні особливості способів детонаційного напилення.....	111	7.2. Technological features of the detonation spraying techniques.....	111
7.3. Параметри детонаційно-газового напилювання та їх вплив на ефективність процесу.....	112	7.3. Parameters of detonation spraying and their impact on the process efficiency.....	112
7.4. Області застосування, переваги, недоліки та перспективи розвитку детонаційного напилювання покриттів.....	113	7.4. Fields of application, advantages, disadvantages and prospects of development of detonation spraying of coatings.....	113
8. ГАЗОДИНАМІЧНЕ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ.....	116	8. GAS DYNAMIC SPRAYING OF COATINGS.....	116
9. ОБЛАДНАННЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ВАКУУМНОГО КОНДЕНСАЦІЙНОГО НАПИЛЕННЯ (ОСАДЖЕННЯ) ПОКРИТТІВ.....	122	9. EQUIPMENT AND TECHNOLOGY OF VACUUM CONDENSATION DEPOSITION OF COATINGS.....	122
9.1. Технологічні особливості вакуумних конденсаційних методів нанесення покриттів.....	122	9.1. Technological features of the vacuum vapor methods of coating deposition.....	122

9.2. Обладнання для вакуумного конденсаційного напilenня покриттів.....	126	9.2. Equipment for vacuum condensation deposition of coatings.....	126
9.3. Матеріали для вакуумного конденсаційного напilenня покриттів.....	130	9.3. Materials for vacuum condensation deposition of coatings	130
10. ПРОЦЕСИ ДОДАТКОВОЇ ОБРОБКИ ПОКРИТТІВ.....	131	10. PROCESSES OF ADDITIONAL TREATMENT OF COATINGS..	131
10.1. Зміцнююча обробка напилених покриттів. Зняття залишкових напружень.....	131	10.1. Strengthening treatment of sprayed coatings. Residual stress relief.....	131
10.2. Формування здрібненої і нанорозмірної полігонізаційної субструктури у напилених покриттях	134	10.2. Pre-recrystallization heat treatment of sprayed coatings....	134
10.3. Підвищення фізико-механічних властивостей електродугових та плазмових покриттів електроімпульсною дією на гетерофазний високотемпературний струмінь.....	140	10.3. Improving physical and mechanical properties of electric-arc and plasma coatings by means of electropulse treatment of the heterophase high-temperature jet.....	140
11. ВЛАСТИВОСТІ НАПИЛЕНИХ ПОКРИТТІВ, МЕТОДИ ЇХ ВИПРОБУВАННЯ ТА КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ.....	152	11. PROPERTIES OF SPRAYED COATINGS, METHODS OF THEIR TESTING AND QUALITY CONTROL.....	152
11.1. Визначення міцності зчеплення покриттів.....	152	11.1. Determining bond strength of coatings.....	152
11.2. Визначення пористості та інших властивостей покриттів.....	154	11.2. Determining porosity and other properties of coatings.....	154
11.3. Властивості газотермічних покриттів як показники якості.....	155	11.3. Properties of gas-thermal coatings as quality indicators....	155
11.4. Спеціальні властивості напилених покриттів.....	159	11.4. Special properties of sprayed coatings.....	159
11.5. Механічна обробка напилених покриттів.....	164	11.5. Mechanical treatment of sprayed coatings.....	164
12. ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....	165	12. OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES.....	165
12.1. Поняття про оптимізацію.....	165	12.1. The concept of optimization.....	165
12.2. Моделювання технологічних процесів.....	167	12.2. Modeling of technological processes.....	167
12.3. Методи оптимізації технологічних процесів.....	169	12.3. Methods of optimization of technological processes.....	169
13. ТИПОВІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ. ПРОЕКТУВАННЯ ДІЛЬНИЦЬ ДЛЯ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ.....	174	13. TYPICAL TECHNOLOGICAL PROCESSES OF COATING APPLICATION. DESIGNING STATIONS FOR SPRAYING OF COATINGS.....	174
13.1. Типові технологічні процеси.....	174	13.1. Typical technological processes.....	174
13.2. Проектування ділень для напилування покриттів..	176	13.2. Design of stations for spraying coatings.....	176
14. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСУ НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ.....	182	14. PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF SPRAYING OF COATINGS.....	182
14.1. Проблеми розвитку процесу.....	182	14.1. Challenges for development of process.....	182
14.2. Перспективні розробки.....	186	14.2. Promising items and techniques under development.....	186
14.2.1. Наноструктурні покриття на основі оксидної кераміки.....	186	14.2.1. Nanostructured coatings based on oxide ceramics	186
14.2.2. Наноккомпозитні покриття на основі металокераміки.....	188	14.2.2. Nanocomposite coatings based on cermets.....	188
14.2.3. Вплив структурного стану FeB-покриттів на їх властивості.....	189	14.2.3. Influence of the structural state of FeB-coatings on their properties.....	189
14.2.4. Властивості газотермічних Al-Cu-Fe покриттів, які мають квазікристалічну фазу.....	191	14.2.4. Properties of gas-thermal Al-Cu-Fe coatings containing a quasicrystalline phase.....	191
14.2.5. Підвищення ефективності теплозахисних характеристик покриття при введенні в його склад квазікристалічного сплаву.....	193	14.2.5. Increase in the efficiency of heat-shielding characteristics of a coating when a quasicrystalline alloy is introduced into its composition.....	193
14.2.6. Мікроплазмове напilenня біокерамічних покриттів.....	194	14.2.6. Microplasma deposition of bioceramic coatings....	194
14.2.7. Гібридний лазерно-дуговий процес нанесення покриттів.....	197	14.2.7. Hybrid laser-arc spraying.....	197
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	200	REFERENCES.....	201