

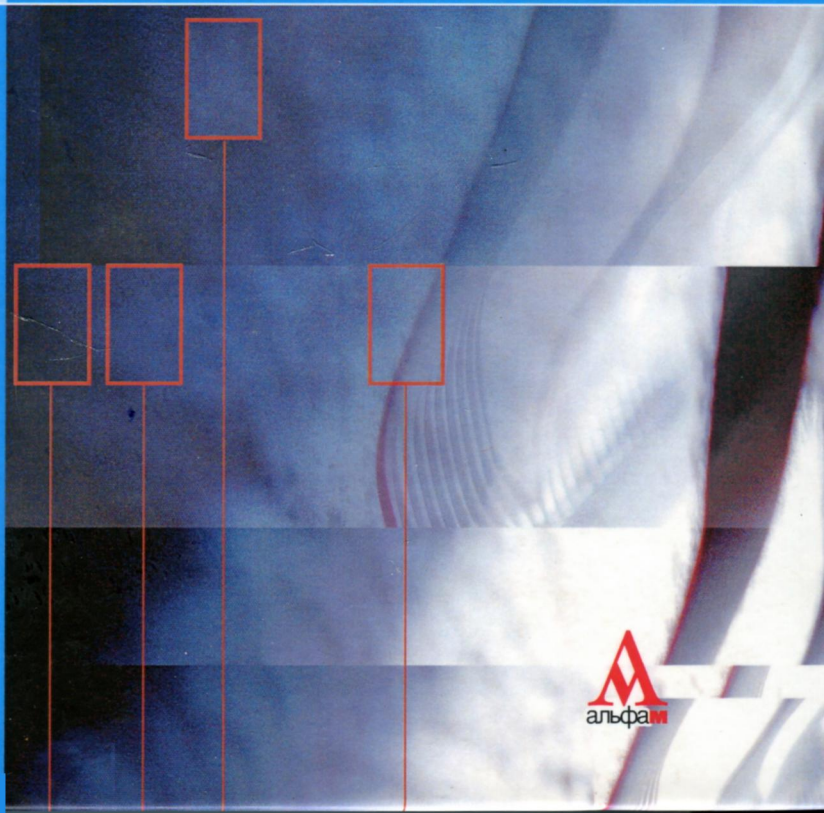
ТЕХНОЛОГИИ

Г.В. Бобров • А.А. Ильин  
В.С. Спектор

# ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Монография

СОВРЕМЕННЫЕ



 альфа

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Г.В. Бобров • А.А. Ильин  
В.С. Спектор

---

ТЕОРИЯ  
И ТЕХНОЛОГИЯ  
ФОРМИРОВАНИЯ  
НЕОРГАНИЧЕСКИХ  
ПОКРЫТИЙ

Монография

МОСКВА • АЛЬФА-М • ИНФРА-М • 2016

УДК 629.78  
ББК 34.663  
Б72

Ф3  
№ 436-Ф3

Издание не подлежит маркировке  
в соответствии с п. 1 ч. 2 ст. 1

**Бобров, Г.В.**

**Б72** Теория и технология формирования неорганических покрытий : монография / Г.В. Бобров, А.А. Ильин, В.С. Спектор. — М. : Альфа-М, 2016. — 928 с. : ил.

ISBN 978-5-98281-407-4

Изложены закономерности направленного изменения или восстановления механических и физико-химических свойств исходных поверхностей изделий в соответствии с их эксплуатационным назначением посредством нанесения покрытий. Рассмотрены две основные технологические схемы, которые позволяют получать покрытия из неорганических материалов различного эксплуатационного назначения: защитные, декоративные, технологические, конструкционные, восстановительные и др.

Для аспирантов, научных сотрудников, инженеров, конструкторов и технологов машиностроительных, приборостроительных, радиоэлектронных направлений промышленности.

**УДК 629.78**  
**ББК 34.663**



ISBN 978-5-98281-407-4

© Бобров Г.В., Ильин А.А.,  
Спектор В.С., 2014  
© «Альфа-М», 2014

## Оглавление

Список принятых сокращений . . . . .	5
Введение . . . . .	7
<b>РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАНЕСЕНИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ . . . . .</b>	<b>13</b>
<b>Глава 1. Технологические особенности нанесения неорганических покрытий и их классификация . . . . .</b>	<b>13</b>
1.1. Нанесение покрытий как средство изменения и восстановления физико-химических свойств поверхностей . . . . .	13
1.2. Классификация покрытий . . . . .	18
1.3. Показатели эффективности процесса нанесения неорганических покрытий . . . . .	20
1.4. Обобщенные параметры технологических процессов нанесения покрытий . . . . .	21
1.5. Достоинства и недостатки методов нанесения неорганических покрытий . . . . .	23
<b>Глава 2. Строение поверхности твердого тела. Физико-химические свойства поверхности . . . . .</b>	<b>25</b>
2.1. Формирование поверхности твердого тела. Роль поверхности в изделиях . . . . .	25
2.2. Строение и свойства реальных поверхностей изделий . . . . .	28
2.3. Подготовка поверхности при нанесении покрытий . . . . .	33
2.4. Контроль за состоянием подготовленной поверхности . . . . .	50
<b>Глава 3. Неорганические материалы для нанесения покрытий. Физико-химические свойства и области применения . . . . .</b>	<b>53</b>
3.1. Металлы и неметаллические элементы . . . . .	53
3.2. Металлические сплавы . . . . .	65
3.3. Металлидные (интерметаллидные) соединения . . . . .	72
3.4. Неметаллические соединения . . . . .	75
3.5. Бескислородные неметаллические соединения . . . . .	79
3.6. Оксидные соединения . . . . .	88
3.7. Аморфные и нанокристаллические материалы . . . . .	93
3.8. Виды компактированных материалов для нанесения неорганических покрытий . . . . .	97
<b>Глава 4. Контроль качества нанесенных покрытий . . . . .</b>	<b>107</b>
4.1. Элементы контроля покрытий: общие и специальные . . . . .	107
4.2. Методы оценки прочности покрытий . . . . .	109

4.3. Остаточные напряжения в покрытиях . . . . .	115
4.4. Несплошности в покрытиях (пористость) . . . . .	120
4.5. Определение толщины и равномерности покрытий . . . . .	121
4.6. Металлографические и рентгеноструктурные исследования покрытий . . . . .	125
4.7. Методы оценки функциональных свойств покрытий . . . . .	126
<b>РАЗДЕЛ II. МОДИФИЦИРОВАНИЕ ИСХОДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ – НАНЕСЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ПОКРЫТИЙ . . . . .</b>	<b>128</b>
<b>Глава 5. Модифицирование без изменения химического состава исходных поверхностей изделий . . . . .</b>	<b>128</b>
5.1. Общие закономерности . . . . .	128
5.2. Модифицирование поверхностей изделий механическим воздействием . . . . .	131
5.3. Модифицирование поверхностей изделий термическим воздействием . . . . .	140
5.4. Модифицирование поверхностей проникающими высокоэнергетическими потоками частиц . . . . .	166
5.5. Модифицирование поверхностей электролитным нагревом . . . . .	174
<b>Глава 6. Модифицирование исходной поверхности с изменением химического состава . . . . .</b>	<b>176</b>
6.1. Общие закономерности . . . . .	176
6.2. Модифицирование поверхностей термодиффузионным насыщением . . . . .	177
6.3. Диффузионное модифицирование поверхностей различными элементами . . . . .	186
6.4. Модифицирование поверхностей ионной имплантацией . . . . .	194
6.5. Модифицирование поверхностей химическим и электрохимическим воздействием . . . . .	197
<b>РАЗДЕЛ III. НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ И ЗАКРЕПЛЕНИЕМ ПОРОШКОВОГО СЛОЯ . . . . .</b>	<b>199</b>
<b>Глава 7. Методы нанесения порошковых покрытий с закреплением и упрочнением слоя . . . . .</b>	<b>199</b>
7.1. Формирование порошковых покрытий с предварительным нанесением слоя и последующим его упрочнением . . . . .	199
7.2. Термическое упрочнение . . . . .	203
7.3. Упрочнение механическим воздействием . . . . .	208
7.4. Упрочнение и уплотнение пропиткой . . . . .	212
7.5. Упрочнение электроконтактным воздействием . . . . .	216
7.6. Области применения предварительно закрепленных и упрочненных порошковых покрытий . . . . .	220

<b>Глава 8. Нанесение порошковых покрытий газотермическим напылением</b> . . . . .	221
8.1. Общие закономерности процесса газотермического напыления покрытий . . . . .	221
8.2. Методы газотермического напыления и их классификация . . . . .	222
8.3. Основные параметры газотермического напыления и их влияние на эффективность процесса . . . . .	225
8.4. Формирование потока напыления частиц . . . . .	232
8.5. Формирование покрытий при газотермическом напылении . . . . .	234
8.6. Температура и давление в контакте напыляемых частиц . . . . .	237
8.7. Формирование напыленных покрытий расплавленными частицами . . . . .	244
8.8. Формирование напыленных покрытий твердофазными частицами . . . . .	252
8.9. Формирование напыленных покрытий смешанными частицами . . . . .	257
8.10. Формирование однослойных и многослойных газотермических покрытий . . . . .	258
<b>Глава 9. Технологические особенности методов газотермического напыления покрытий</b> . . . . .	266
9.1. Общие закономерности и классификация методов . . . . .	266
9.2. Способы и технологические особенности плазменного напыления . . . . .	267
9.3. Способы и технологические особенности газопламенного напыления . . . . .	290
9.4. Газопламенное напыление с формированием струи за срезом сопла распылителя . . . . .	292
9.5. Газопламенное напыление с формированием потока газопорошковой смеси в камерах с повышенным давлением . . . . .	297
9.6. Газопламенное детонационное напыление покрытий . . . . .	300
9.7. Нанесение газотермических покрытий дуговой и индукционной металлизацией . . . . .	311
9.8. Способы и технологические особенности «холодного» газодинамического порошкового напыления . . . . .	324
<b>Глава 10. Оборудование для газотермического напыления покрытий</b> . . . . .	330
10.1. Установки для газотермического напыления . . . . .	330
10.2. Комплектующие блоки и модули в установках для газотермического напыления . . . . .	333
10.3. Установки для плазменного напыления . . . . .	359
10.4. Установки и аппаратура для газопламенного напыления . . . . .	373
10.5. Установки для детонационно-газового напыления . . . . .	381
10.6. Установки для напыления покрытий дуговой и высокочастотной индукционной металлизацией . . . . .	387

10.7. Установки для газодинамического напыления покрытий . . . . .	392
10.8. Технологическая оснастка для газотермического напыления покрытий . . . . .	394
<b>Глава 11. Технология газотермического напыления покрытий из материалов различных групп . . . . .</b>	<b>398</b>
11.1. Общие закономерности . . . . .	398
11.2. Металлургические процессы при газотермическом нанесении покрытий . . . . .	409
11.3. Напыление покрытий из металлических и неметаллических элементов . . . . .	415
11.4. Напыление покрытий из металлических сплавов . . . . .	418
11.5. Напыление покрытий из металлидных соединений и сплавов на их основе . . . . .	423
11.6. Напыление покрытий из бескислородных неметаллических соединений . . . . .	427
11.7. Напыление покрытий из оксидных соединений . . . . .	443
<b>РАЗДЕЛ IV. НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ВАКУУМНОЙ КОНДЕНСАЦИЕЙ И ГАЗОФАЗНЫМ ОСАЖДЕНИЕМ . . . . .</b>	<b>452</b>
<b>Глава 12. Формирование вакуумных конденсационных покрытий из паровых потоков наносимого материала . . . . .</b>	<b>452</b>
12.1. Схема процесса, формирование парового потока и классификация методов нанесения покрытий . . . . .	452
12.2. Конденсационное формирование покрытий . . . . .	457
12.3. Реакционные процессы при формировании конденсационных покрытий . . . . .	462
12.4. Параметры вакуумного конденсационного нанесения покрытий и их влияние на эффективность процесса . . . . .	465
12.5. Технологические особенности конденсационного нанесения покрытий термическим испарением . . . . .	473
12.6. Технологические особенности ВКН покрытий взрывным испарением-распылением . . . . .	487
12.7. Технологические особенности ВКН покрытий дуговым испарением-распылением . . . . .	489
12.8. Технологические особенности ВКН покрытий ионным распылением . . . . .	495
<b>Глава 13. Оборудование для вакуумного конденсационного нанесения покрытий . . . . .</b>	<b>508</b>
13.1. Общие положения . . . . .	508
13.2. Основные элементы установок для ВКН покрытий . . . . .	511
13.3. Компоновка установок . . . . .	512
13.4. Установки для вакуумного конденсационного нанесения покрытий . . . . .	526

<b>Глава 14. Нанесение вакуумных конденсационных покрытий из различных групп материалов . . . . .</b>	<b>540</b>
14.1. Общие закономерности технологического процесса . . . . .	540
14.2. Нанесение конденсационных покрытий из металлических и неметаллических элементов . . . . .	544
14.3. Нанесение конденсационных покрытий из сплавов на металлической и неметаллической основе . . . . .	548
14.4. Нанесение конденсационных покрытий из металлидных (интерметаллидных) соединений . . . . .	554
14.5. Нанесение конденсационных покрытий из неметаллических соединений . . . . .	555
14.6. Технологическая схема конденсационного нанесения покрытий . . . . .	561
<b>Глава 15. Технологические особенности газофазного осаждения материала в покрытие . . . . .</b>	<b>566</b>
15.1. Физико-химические процессы осаждения продуктов газофазных реакций . . . . .	566
15.2. Основные реакции осаждения газофазных покрытий . . . . .	568
15.3. Технологические особенности газофазного нанесения покрытий . . . . .	571
15.4. Внекамерные способы газофазного осаждения покрытий . . . . .	576
<b>РАЗДЕЛ V. НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ХИМИЧЕСКИМ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ . . . . .</b>	<b>580</b>
<b>Глава 16. Формирование покрытий при электрохимическом и химическом осаждении . . . . .</b>	<b>580</b>
16.1. Схема и технологические особенности процесса электрохимического нанесения покрытий . . . . .	580
16.2. Электрохимические процессы в электролите и на электродах . . . . .	582
16.3. Физико-химические процессы при осаждении металлов . . . . .	584
16.4. Формирование электрохимических покрытий . . . . .	588
16.5. Параметры электрохимического нанесения покрытий и их влияние на эффективность процесса . . . . .	600
16.6. Электролитические процессы при нанесении композиционных, электрофорезных и анодных покрытий . . . . .	607
16.7. Свойства электрохимических покрытий и области их применения . . . . .	609
16.8. Технологические особенности процесса химического нанесения покрытий . . . . .	610
<b>Глава 17. Оснастка цехов и участков для химического и электрохимического нанесения покрытий . . . . .</b>	<b>613</b>
17.1. Оборудование для механизированной обработки поверхностей изделий . . . . .	613



17.2. Электролитические и вспомогательные ванны . . . . .	615
17.3. Источники питания электрохимических процессов . . . . .	618
17.4. Технологическая оснастка . . . . .	622
17.5. Механизированные и автоматизированные гальванические линии . . . . .	623
17.6. Охрана труда при химическом и электрохимическом нанесении покрытий . . . . .	625
<b>Глава 18. Технологические особенности нанесения химических и электрохимических покрытий . . . . .</b>	<b>627</b>
18.1. Исходные материалы для нанесения покрытий . . . . .	627
18.2. Подготовка поверхности . . . . .	629
18.3. Классификация электролитов . . . . .	631
18.4. Нанесение химических и электрохимических покрытий из металлов и их сплавов . . . . .	636
18.5. Нанесение электрохимических покрытий из неводных растворов . . . . .	652
<b>Глава 19. Химическое и электрохимическое модифицирование поверхностей в водных растворах . . . . .</b>	<b>657</b>
19.1. Оксидирование поверхностей изделий . . . . .	657
19.2. Оксидирование металлов и сплавов . . . . .	665
19.3. Фосфатирование металлов и сплавов . . . . .	668
19.4. Особенности технологического процесса . . . . .	672
<b>РАЗДЕЛ VI. НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ РАСПЛАВЛЕННОГО И ТВЕРДОФАЗНОГО МАТЕРИАЛА . . . . .</b>	<b>674</b>
<b>Глава 20. Нанесение покрытий из расплава . . . . .</b>	<b>674</b>
20.1. Обобщенная схема процесса формирования покрытий. Смачивание и растекание расплава . . . . .	674
20.2. Взаимодействие расплавленного материала покрытия с поверхностью изделия . . . . .	680
20.3. Нанесение покрытий погружением в расплавленные среды . . . . .	686
20.4. Нанесение покрытий оплавлением слоев из порошковых композиций . . . . .	694
<b>Глава 21. Нанесение покрытий наплавкой концентрированными источниками теплоты и из твердофазного компактированного материала . . . . .</b>	<b>707</b>
21.1. Схемы нанесения покрытий . . . . .	707
21.2. Технологические особенности нанесения покрытий наплавкой . . . . .	710
21.3. Механизм и кинетика формирования твердофазных покрытий и их свойства . . . . .	722
21.4. Технологические особенности нанесения твердофазных покрытий . . . . .	732

<b>РАЗДЕЛ VII. НАНЕСЕНИЕ ПОКРЫТИЙ РАЗЛИЧНОГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ</b> . . . . .	742
<b>Глава 22. Общие закономерности в технологии нанесения неорганических покрытий</b> . . . . .	742
22.1. Конструктивные особенности изделия и требования к материалу покрытия . . . . .	742
22.2. Выбор метода нанесения покрытия . . . . .	744
22.3. Разработка оптимальных параметров технологического процесса . . . . .	751
22.4. Последующая обработка покрытий . . . . .	754
22.5. Контрольные операции в технологическом процессе нанесения покрытий . . . . .	758
22.6. Автоматизированное проектирование технологического процесса нанесения покрытий . . . . .	760
<b>Глава 23. Нанесение защитных покрытий</b> . . . . .	766
23.1. Нанесение износостойких покрытий . . . . .	766
23.2. Нанесение коррозионно-стойких покрытий . . . . .	786
23.3. Нанесение жаростойких покрытий . . . . .	805
23.4. Нанесение теплозащитных покрытий . . . . .	819
23.5. Нанесение радиационно-защитных покрытий . . . . .	828
<b>Глава 24. Нанесение декоративных покрытий</b> . . . . .	833
24.1. Требования к декоративным покрытиям . . . . .	833
24.2. Декоративные покрытия из металлических материалов . . . . .	834
24.3. Декоративные покрытия из неметаллических материалов . . . . .	837
24.4. Декоративные неорганические пленки . . . . .	841
<b>Глава 25. Нанесение конструкционных и технологических покрытий</b> . . . . .	844
25.1. Нанесение технологических покрытий . . . . .	844
25.2. Нанесение конструкционных покрытий . . . . .	848
25.3. Нанесение уплотняющих покрытий . . . . .	853
25.4. Нанесение диэлектрических, токопроводящих и полупроводниковых покрытий . . . . .	861
25.5. Нанесение оптических покрытий . . . . .	869
<b>Глава 26. Послеэксплуатационное восстановление поверхностей изделий нанесением покрытий</b> . . . . .	876
26.1. Значимость восстановительных покрытий и технологические особенности их нанесения . . . . .	876
26.2. Твердофазные восстановительные покрытия . . . . .	882
26.3. Жидкофазные восстановительные покрытия . . . . .	890
26.4. Нанесение восстановительных покрытий по порошковой схеме формирования . . . . .	901
26.5. Атомарные восстановительные покрытия . . . . .	902
<b>Библиографический список</b> . . . . .	910