

Mécanique et Ingénierie des Matériaux

Traitements de surfaces en phase vapeur



sous la direction de
Alain Galerie

Hermès

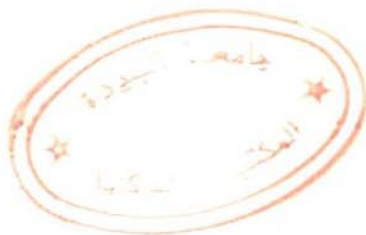
Lavoisier

2-671-15-1

2-671-15-1

Traitements de surfaces en phase vapeur

sous la direction de
Alain Galerie



hermes
Science
— publications —

Table des matières

Introduction	17
Alain GALERIE	
Chapitre 1. Evaporation sous vide	21
Aimé RICHARDT et Isabelle RICHARDT	
1.1. Définition et bases théoriques. Notions de pression de vapeur et de libre parcours moyen.	21
1.1.1. Bases thermodynamiques et cinétiques	22
1.1.2. Pression de vapeur à l'équilibre.	22
1.1.3. Notions et valeurs des pressions de vapeur	23
1.1.4. Libre parcours moyen des molécules de gaz	26
1.2. Théorie de l'évaporation thermique, mécanismes, lois d'émission. Nucléation et croissance des couches minces déposées par évaporation.	27
1.2.1. Théorie de l'évaporation thermique	27
1.2.2. Vitesse d'évaporation.	28
1.2.2.1. Equation de Hertz-Knudsen.	28
1.2.2.2. Evaporation libre et effusion	29
1.2.3. Mécanismes de l'évaporation	30
1.2.3.1. Liquides	31
1.2.3.2. Solides cristallins	33
1.2.4. Loi cosinusoïdale d'émission	33
1.2.5. Théorie de la nucléation et de la croissance des couches minces déposées par évaporation	36
1.2.5.1. Généralités	36
1.2.5.2. Nucléation tridimensionnelle et croissance.	38
1.2.6. Evolution de la microstructure des dépôts et modèles de zones structurales (diagramme M-D)	39
1.3. Procédés de dépôt	41
1.3.1. Généralités	41

10 Traitements de surfaces en phase vapeur

1.3.2. Sources d'évaporation à effet Joule	42
1.3.2.1. Sources en fils ou feuilles métalliques	42
1.3.2.2. Sources à sublimation	45
1.3.2.3. Sources à creusets et dispositifs chauffe-creusets	46
1.3.3. Réalisation et utilisation de sources d'évaporation à bombardement électronique et à plasma. Evaporation par arc ; évaporation par ablation laser	48
1.3.3.1. Sources d'évaporation à bombardement électronique	48
1.3.3.2. L'évaporation à arc	54
1.3.3.3. L'évaporation par laser	56
1.4. Quelques exemples industriels d'applications des évaporations sous vide.	59
1.4.1. Epitaxie par jet moléculaire (MBE)	59
1.4.1.1. Généralités	59
1.4.1.2. Sources à effusion thermique (cellules de Knudsen)	61
1.4.2. Les couches minces optiques	63
1.4.2.1. Adhérence sur des surfaces de polymères	63
1.4.2.2. Techniques de dépôts sous vide	64
1.4.2.3. Paramètres de dépôt	65
1.4.3. Pratique des évaporations industrielles d'aluminium	66
1.4.3.1. Localisation des pièces à recouvrir par rapport aux filaments d'évaporation.	67
1.4.3.2. Cas des pièces de forme complexe.	68
1.5. Bibliographie	70
Chapitre 2. Pulvérisation cathodique	71
Yves PAULEAU	71
2.1. Introduction.	71
2.2. Principe de la pulvérisation cathodique diode en courant continu.	72
2.3. Mécanisme de pulvérisation	74
2.4. Rendement de pulvérisation	76
2.5. Caractérisation des particules éjectées	82
2.5.1. Nature des particules éjectées de la cible	82
2.5.2. Energie des particules pulvérisées	83
2.5.3. Distribution angulaire du flux de particules pulvérisées	84
2.6. Dépôt de couches minces par pulvérisation cathodique	84
2.6.1. Objectifs	84
2.6.2. Optimisation des conditions de dépôt	85
2.6.2.1. Optimisation de la vitesse de dépôt	85
2.6.2.2. Contrôle de la contamination des couches	89
2.6.2.3. Pulvérisation sous basse pression	92
2.7. Procédés de dépôt par pulvérisation à basse pression	92
2.7.1. Système de pulvérisation en configuration triode en courant continu	92
2.7.2. Pulvérisation avec un plasma excité à haute fréquence	94
2.7.3. Pulvérisation « magnétron »	94

2.7.4. Pulvérisation radiofréquence (RF) ou haute fréquence (HF)	97
2.8. Procédés de dépôt par pulvérisation réactive	98
2.9. Caractéristiques des couches minces déposées par pulvérisation cathodique	104
2.9.1. Germination et croissance des couches	104
2.9.2. Microstructure des couches déposées par pulvérisation	106
2.9.3. Pureté des couches déposées par pulvérisation	106
2.9.4. Adhérence des couches déposées par pulvérisation	106
2.10. Conclusion	107
2.11. Bibliographie	107

Chapitre 3. Implantation ionique et dépôts assistés par faisceaux d'ions. . . 111

Jean-Paul RIVIÈRE

3.1. Introduction	111
3.2. Aspects généraux de l'interaction ion-solide	113
3.2.1. Description des phénomènes	113
3.2.2. Avantages et limitations de l'implantation ionique	116
3.3. Mécanismes physiques et principes des différentes techniques	117
3.3.1. Implantation ionique	117
3.3.1.1. Ralentissement des ions et distribution en profondeur	117
3.3.1.2. Dommages produits dans les cascades de collisions	122
3.3.1.3. Pulvérisation de la surface.	126
3.3.1.4. Description d'un implanteur typique	127
3.3.2. Mélange ionique.	128
3.3.2.1. Mécanismes de mélange ionique indépendants de la température.	130
3.3.2.2. Mécanisme de mélange ionique dépendant de la température	131
3.3.3. Dépôts assistés par faisceaux d'ions	131
3.4. Modifications de surface par implantation ionique.	135
3.4.1. Formation de nouvelles phases	135
3.4.2. Amélioration de la résistance à l'usure	136
3.4.3. Amélioration de la résistance à l'oxydation et à la corrosion	140
3.5. Revêtements réalisés avec une assistance par faisceaux d'ions	143
3.5.1. Dépôts assistés à basse énergie	144
3.5.2. Revêtements réalisés par mélange ionique dynamique	145
3.6. Evolution des techniques d'implantation ionique	148
3.6.1. Motivations.	148
3.6.2. Implantation par immersion plasma	149
3.6.3. Implantation diffusion d'azote à basse énergie et flux élevé	150
3.7. Conclusion	151
3.8. Bibliographie	151

Chapitre 4. Dépôt chimique en phase vapeur : principes et applications . . . 155

Elisabeth BLANQUET et Frédéric SCHUSTER

4.1. Introduction	155
4.2. Procédés CVD	156
4.2.1. Réacteurs CVD	156
4.2.2. Précurseurs et méthodes d'introduction	158
4.3. Modélisation des procédés	159
4.3.1. Description des phénomènes	159
4.3.2. Description des étapes limitantes	160
4.3.3. Mise en œuvre de modèles macroscopiques	164
4.3.4. Simulation thermodynamique du dépôt CVD de la phase métastable (Ti, Al)N	166
4.4. Applications industrielles.	168
4.4.1. Introduction	168
4.4.2. Applications du procédé CVD dans le domaine nucléaire	168
4.4.3. Applications industrielles du procédé CVD assisté par plasma	169
4.5. Liste des symboles.	172
4.6. Bibliographie	172

Chapitre 5. Dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma ou laser . . . 177

Jean DESMAISON, Christelle TIXIER, Pascal TRISTANT

5.1. De la CVD thermique à la CVD assistée	177
5.2. CVD assistée par plasma	179
5.2.1. Principe	179
5.2.2. Effet de la fréquence d'excitation	181
5.2.2.1. Décharges de type diode	181
5.2.2.2. Décharges micro-ondes	184
5.2.3. Influence de la position de la décharge par rapport à la structure d'excitation	186
5.2.3.1. Décharges micro-ondes à zone active localisée	186
5.2.3.2. Décharges micro-ondes à onde propagatrice	188
5.2.4. Effet de l'utilisation d'un champ magnétique	189
5.2.4.1. Configuration ECR	191
5.2.4.2. Configuration DECR	191
5.2.5. Influence de la position du substrat par rapport à la décharge	192
5.2.5.1. PECVD directe	193
5.2.5.2. PECVD indirecte	193
5.2.6. Caractérisation et modélisation du plasma	194
5.2.6.1. Moyens de caractérisation du plasma	194
5.2.6.2. Outils de modélisation du plasma	194
5.2.7. Applications	196
5.2.7.1. Présentation	196
5.2.7.2. Cas particulier des dépôts à pression atmosphérique	198
5.2.8. Etudes de cas	199

5.2.8.1. Dépôts d'oxydes isolants sur des substrats métalliques	199
5.2.8.2. Dépôts de carbone amorphe hydrogéné sur TA6V4	200
5.3. CVD assistée par laser	201
5.3.1. Principe	201
5.3.2. Différentes configurations	202
5.3.3. Applications	202
5.3.4. Ablation laser réactive	204
5.4. Conclusion	204
5.5. Bibliographie	205

Chapitre 6. Modélisation des phénomènes couplés en CVD 211

Michel PONS et Francis BAILLET

6.1. Introduction	211
6.2. Voies de modélisation et de simulation du procédé CVD.	212
6.2.1. Principe	212
6.2.2. Approche thermodynamique	214
6.2.3. Approche cinétique	215
6.2.4. Approche transferts simultanés	215
6.2.5. Conclusion	218
6.3. Modélisation macroscopique des phénomènes de transport réactif	219
6.3.1. Hypothèses générales	219
6.3.2. Equations générales	219
6.3.3. Réactions	223
6.3.3.1. Réactions homogènes	223
6.3.3.2. Réactions hétérogènes	225
6.3.3.3. Conditions aux limites	226
6.3.4. Conclusion – Codes commerciaux	229
6.4. Bases de données, calculs préliminaires	230
6.4.1. Données thermodynamiques	230
6.4.2. Données cinétiques	233
6.4.3. Conclusion	237
6.5. Simulation des réacteurs	237
6.5.1. Réacteurs verticaux	238
6.5.1.1. Influence de la pression et du gaz porteur	240
6.5.1.2. Influence du chauffage du substrat.	240
6.5.1.3. Influence de la réactivité.	241
6.5.1.4. Le chauffage rapide du substrat	242
6.5.1.5. Approche des phénomènes radiatifs	243
6.5.1.6. Réactivités homogène et hétérogène.	245
6.5.2. Réacteurs horizontaux	247
6.6. Conclusion	250
6.7. Symboles utilisés	252
6.8. Bibliographie	253

Chapitre 7. Carburation et carbonituration des aciers en phase gazeuse . . . 261

Jacky DULCY et Michel GANTOIS

7.1. Introduction	261
7.2. Principes de base d'une réaction hétérogène gaz-solide.	263
7.2.1. Mécanismes physicochimiques du transfert du carbone par une réaction hétérogène gaz-solide	263
7.2.2. Définition du coefficient de transfert de masse.	265
7.2.3. Transfert de matière en phase austénitique	267
7.2.4. Conclusion	268
7.3. Cémentation par l'oxyde de carbone (procédés traditionnels)	269
7.3.1. Génération des atmosphères	269
7.3.2. Définition du potentiel carbone	271
7.3.3. Influence des éléments d'alliage sur le potentiel carbone	274
7.3.4. Mécanismes physicochimiques d'interface	275
7.3.5. Transfert du carbone dans l'état solide	277
7.4. Cémentation par un hydrocarbure (procédés récents)	279
7.4.1. Mécanismes physicochimiques	279
7.4.2. Transfert du carbone dans l'état solide	281
7.5. Mise en œuvre industrielle des réactions gaz-solide de cémentation des aciers	285
7.5.1. Caractéristiques thermiques et hydrodynamiques des réacteurs	285
7.5.1.1. Aspect thermique	285
7.5.1.2. Aspect hydrodynamique	285
7.5.2. Cémentation à la pression atmosphérique.	288
7.5.2.1. Cémentation traditionnelle : gaz endothermique, azote-méthanol	288
7.5.2.2. Cémentation par un hydrocarbure	291
7.5.3. Cémentation par un hydrocarbure sous une pression inférieure à la pression atmosphérique	293
7.6. Traitements thermiques après cémentation ou carbonituration	293
7.6.1. Aciers de cémentation et carbonituration.	294
7.6.1.1. Profil de concentration en interstitiels.	294
7.6.1.2. Cycle thermique après la phase d'enrichissement superficiel en interstitiels (carbone et/ou azote)	296
7.6.1.3. Trempabilité de l'acier	297
7.6.2. Traitements thermiques complémentaires.	297
7.6.3. Défauts de structure dans la couche superficielle	298
7.6.4. Procédés industriels de trempe-déformations.	300
7.6.4.1. Procédés industriels de trempe	300
7.6.4.2. Déformations	303
7.7. Procédés industriels	304
7.7.1. Fours « à charges »	306
7.7.2. Fours continus	306
7.7.3. Fours fonctionnant sous pression réduite	307
7.7.4. Exemple d'application	307

7.8. Conclusion	308
7.9. Bibliographie	309
Chapitre 8. Nitruration ionique et traitements en postdécharge	311
Thierry BELMONTE, Thierry CZERWIEC, Henri MICHEL	
8.1. Nitruration ionique et applications	311
8.1.1. Introduction	311
8.1.2. Principes métallurgiques de la nitruration du fer pur et des alliages à base de fer	312
8.1.2.1. Nitruration et nitrocarburation du fer	312
8.1.2.2. Nitruration des alliages à base de fer	316
8.1.3. Principe et production du plasma	319
8.1.4. Mécanismes fondamentaux en décharge diode	321
8.1.4.1. Architecture de la décharge diode	322
8.1.4.2. Rôle des électrons et importance des différentes zones de la décharge diode	323
8.1.4.3. Contribution des espèces neutres et ioniques	324
8.1.4.4. Modèles de nitruration et rôle de l'hydrogène	326
8.1.5. Aspects pratiques et industriels	329
8.1.5.1. Phénomène de cathode creuse	329
8.1.5.2. Générateurs de plasma	330
8.1.5.3. Réacteurs de nitruration ionique	331
8.1.6. Développements technologiques de la nitruration ionique	333
8.1.6.1. Concepts de traitements plurifonctionnels, de procédés hybrides et de nitruration assistée par un plasma transféré	333
8.1.6.2. Nouvelles techniques de nitruration assistée par plasma transféré	334
8.1.7. Nouvelles applications métallurgiques de la nitruration ionique	338
8.1.7.1. Nitruration des aciers inoxydables austénitiques	338
8.1.7.2. Nitruration de l'aluminium et de ses alliages	338
8.2. Traitements en postdécharge	339
8.2.1. Introduction	339
8.2.2. Mise en œuvre des postdécharges spatiales	340
8.2.3. Lointaines et proches postdécharges	341
8.2.4. Lointaines postdécharges comme source d'espèce actives	343
8.2.4.1. Notion d'espèces actives	343
8.2.4.2. Principales espèces présentes en postdécharges $A_r^-N_2^-H_2$	343
8.2.4.3. Les atomes	347
8.2.5. Traitements en postdécharge	350
8.2.5.1. Traitements de modification de la mouillabilité des polymères	350
8.2.5.2. Traitements de nettoyage	351
8.2.5.3. Traitements de stérilisation	352
8.2.5.4. Traitements thermo-chimiques	353
8.2.5.5. Traitements de dépôt chimique en phase vapeur	354
8.3. Bibliographie	355

Chapitre 9. Cémentation activée en caisse (*pack cementation*) 367

Alain GALERIE et Yves WOUTERS

9.1. Principe	367
9.2. Aspects fondamentaux	368
9.2.1. Chimie du ciment	369
9.2.2. Réaction gaz-substrat	372
9.2.3. Transport de matière	373
9.2.3.1. Dans le ciment	373
9.2.3.2. Dans les substrat	374
9.2.3.3. Cinétique de cémentation	375
9.3. Composition et morphologie de la couche cimentée	376
9.4. Applications industrielles.	377
9.4.1. Aluminisation des superalliages base nickel	378
9.4.1.1. Aluminisation simple.	378
9.4.1.2. Revêtements d'aluminiures modifiés	378
9.4.1.3. Ajout d'éléments réactifs	380
9.4.2. Chromisation et chromaluminisation du fer et des aciers.	380
9.4.3. Autres applications	381
9.5. Evolutions du procédé	383
9.5.1. Cémentations « hors pack »	383
9.5.2. Cémentations « gazeuses »	384
9.5.2.1. Procédé à donneur solide	385
9.5.2.2. Procédé à donneur gazeux.	385
9.6. Bibliographie	385

Index	391
------------------------	-----

ALLIAGES MÉTALLIQUES

Le traité Mécanique et Ingénierie des Matériaux répond au besoin de disposer d'un ensemble complet des connaissances et méthodes nécessaires à la maîtrise de ce domaine.

Conçu volontairement dans un esprit d'échange disciplinaire, le traité MIM est l'état de l'art dans les domaines suivants retenus par le comité scientifique :

- Alliages métalliques
- Géomatériaux
- Matériaux de construction
- Méthodes numériques
- Mise en forme des matériaux
- Polymères

Chaque ouvrage présente aussi bien les aspects fondamentaux qu'expérimentaux. Une classification des différents articles contenus dans chacun, une bibliographie et un index détaillé orientent le lecteur vers ses points d'intérêt immédiats : celui-ci dispose ainsi d'un guide pour ses réflexions ou pour ses choix.

Les savoirs, théories et méthodes rassemblés dans chaque ouvrage ont été choisis pour leur pertinence dans l'avancée des connaissances ou pour la qualité des résultats obtenus.

