

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

SCIENCE DES MATÉRIAUX

Cycle de vie des surfaces industrielles

Mode de dégradation
et traitements écorespectueux

Françoise HLAWKA

Alain CORNET

ellipses

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS



SCIENCE DES MATÉRIAUX

Cycle de vie des surfaces industrielles

Mode de dégradation et traitements écorespectueux

Françoise HLAWKA

جامعة أمحمد بوقرة - بومرداس
Maitre de conférences
Université M'hamed Bouguerra - BOUMERDES
المكتبة الجامعية
INSA Strasbourg
رقم: 669.0181COR

osep

Alain CORNET

جامعة أمحمد بوقرة - بومرداس
Professeur des universités
Université M'hamed Bougara - Boumerdes
المكتبة الجامعية
INSA Strasbourg
رقم الجرد: 0115789



Table des matières

Partie A : OUTILS POUR L'ETUDE DES SURFACES

| | |
|--|-----------|
| Chapitre I : PHYSICOCHIMIE DES SURFACES | 2 |
| 1 - Surfaces et interfaces | 2 |
| 2 - Thermodynamique des surfaces et des interfaces | 4 |
| 2.1. Rappels et compléments de thermodynamique classique | 4 |
| 2.2. Modèle de Gibbs des surfaces | 9 |
| 3 - Réactivité des surfaces | 13 |
| 3.1. Mécanismes | 13 |
| 3.2. Relaxation, reconstruction et ségrégation | 14 |
| 3.3. Adsorption | 15 |
| 4 - Structures des surfaces | 17 |
| 4.1. Quelle surface pour quel matériau ? | 17 |
| 4.2. Modèle TLK des matériaux cristallins | 18 |
| 4.3. Surfaces industrielles | 19 |
| 5 - Adhésion | 20 |
| 5.1. Introduction | 20 |
| 5.2. Forces et mécanismes d'adhésion | 21 |
| 5.3. Adhésion thermodynamique | 24 |
| 5.4. Adhésion physico-chimique | 29 |
| 6 - Mouillabilité des surfaces | 35 |
| 7 - Exercices | 38 |
| Chapitre II : TRIBOLOGIE | 39 |
| 1 - Lois du frottement sec | 40 |
| 1.1. Frottement macroscopique | 40 |
| 1.2. Les modèles du XXème siècle | 41 |
| 2 - Contacts lisses et adhésion | 44 |
| 2.1. Contact élastique - modèle de Hertz | 44 |
| 2.2. Modèle JKR | 46 |
| 2.3. Modèle DMT | 48 |
| 3 - Contacts rugueux | 49 |
| 3.1. Topographie des surfaces | 49 |
| 3.2. Contacts rugueux | 56 |
| 3.3. Adhérence des contacts | 58 |
| 4 - Dynamique des contacts | 62 |
| 4.1. Ecarts systématiques avec les lois d'Amontons-Coulomb | 62 |
| 4.2. Modélisation(s) et interprétation(s) | 66 |
| Chapitre III : ELECTROCHIMIE | 69 |
| 1 - Oxydo-réduction et thermodynamique | 69 |
| 1.1. De la chimie à l'électrochimie | 70 |
| 1.2. Couplage de deux systèmes Red-Ox | 71 |
| 1.3. Electrodes, électrolytes et potentiels d'électrodes | 72 |
| 1.4. Double couche et interprétation physique du potentiel d'électrode | 75 |
| 1.5. Représentation des équilibres dans le plan E - pH | 76 |
| 2 - Cinétique électrochimique | 78 |
| 2.1. Cinétique chimique | 78 |
| 2.2. Application à l'électrochimie | 79 |
| 2.3. De la vitesse globale à la densité de courant | 81 |
| 2.4. Densité de courant d'échange | 82 |
| 2.5. Equation générale de Butler-Volmer | 82 |
| 2.6. Equation de Butler-Volmer en l'absence de diffusion | 83 |
| 2.7. Cinétique de l'étape de transport | 85 |
| 2.8. Autres étapes | 87 |

| | |
|---|------------|
| 3 - Cinétique liée aux couplages de systèmes red-ox | 88 |
| 3.1. Piles et cellules d'électrolyse..... | 88 |
| 3.2. Couplage de deux systèmes red-ox..... | 90 |
| 3.3. Conductance d'un électrolyte | 91 |
| 4 - Electrolyse et électrodéposition..... | 93 |
| 4.1. Eléments constitutifs d'une cellule d'électrolyse | 93 |
| 4.2. Tension d'électrolyse..... | 94 |
| 4.3. Sélection des réactions d'oxydo-réduction | 95 |
| 4.4. Application aux revêtements électrolytiques | 96 |
| 4.5. Autres applications industrielles..... | 100 |
| 5 - Exercices | 102 |
| | |
| Chapitre IV : CARACTERISATION DES SURFACES | 103 |
| 1 - Méthodes de caractérisation | 103 |
| 2 - Observation et imagerie..... | 106 |
| 2.1. Microscope électronique environnemental à balayage | 106 |
| 2.2. Microscopie à force atomique | 109 |
| 3 - Mesure de la topographie..... | 112 |
| 4 - Caractérisation structurale et physico-chimique | 115 |
| 4.1. Application des rayons X à l'analyse des surfaces | 115 |
| 4.2. Mesure de la tension superficielle | 118 |
| 5 - Analyse mécanique des surfaces | 120 |
| 5.1. Essai d'indentation instrumentée (nanoindentation)..... | 120 |
| 5.2. Adhérence de dépôts..... | 123 |
| Partie B : DETERIORATION DES SURFACES EN SERVICE | |
| | |
| Chapitre V : DETERIORATION PAR USURE | 126 |
| 1 - Systèmes tribologiques..... | 126 |
| 1.1. Introduction | 126 |
| 1.2. Paramètres de conception et de service des systèmes tribologiques..... | 127 |
| 1.3. Lois expérimentales d'usure | 128 |
| 1.4. Quelques éléments sur le frottement lubrifié | 128 |
| 2 - Modèle du troisième corps | 129 |
| 2.1. Principe..... | 129 |
| 2.2. Evolution et recirculation des débris | 131 |
| 2.2. Sites et modes d'accommodation des vitesses..... | 131 |
| 3 - Endommagement des surfaces..... | 132 |
| 3.1. Détachement de particules par abrasion | 133 |
| 3.2. Détachement de particules par adhésion..... | 134 |
| 3.3. Détachement de particules par délamination | 135 |
| 3.4. Transformations des particules en lits de débris..... | 135 |
| 4 - Principaux modes d'usure..... | 136 |
| 4.1. Usure par abrasion | 136 |
| 4.2. Usure par adhésion | 137 |
| 4.3. Usure par fatigue des surfaces | 138 |
| 4.4. Usure en petits débattements | 140 |
| 4.5. Autres formes d'usure | 141 |
| 5 - Etude expérimentale de l'usure | 142 |
| | |
| Chapitre VI : DETERIORATION PAR CORROSION..... | 143 |
| 1 - Introduction..... | 143 |
| 1.1. Pourquoi s'intéresser à la corrosion ? | 143 |
| 1.2. Modes de corrosion | 144 |
| 1.3. Facteurs de la corrosion | 145 |
| 1.4. Plan du chapitre | 145 |
| 2 - Corrosion humide | 146 |
| 2.1. Mécanismes de la corrosion électrochimique en milieu humide | 146 |

| | |
|--|------------|
| 2.2. Systèmes couplés à électrodes localisées..... | 149 |
| 2.3. Couplage d'électrodes non localisées : corrosion généralisée..... | 153 |
| 2.4. Etat actif et état passif..... | 154 |
| 2.5. Corrosions localisées des électrodes mixtes..... | 159 |
| 2.6. Petit inventaire des corrosions localisées..... | 165 |
| 3 - Métrologie de la corrosion..... | 175 |
| 3.1. Objectifs de la métrologie de la corrosion..... | 175 |
| 3.2. Principes généraux des mesures électrochimiques..... | 176 |
| 4 - Notions sur les autres formes de corrosion..... | 186 |
| 4.1. Corrosion sèche ou corrosion à haute température..... | 186 |
| 4.2. Notions sur la corrosion atmosphérique..... | 191 |
| Chapitre VII : DETERIORATION PHYS. ET PHYS. CHIM. NON METAL. | 193 |
| 1 - Dégradation des polymères..... | 193 |
| 1.1. Rappels sur les classes de polymères et sur les adjuvants..... | 193 |
| 1.2. Vieillissement physique des matières plastiques..... | 195 |
| 1.3. Vieillissement chimique des matières plastiques..... | 196 |
| 1.4. Cas de la dégradation des composites..... | 201 |
| 1.5. Recyclage des plastiques..... | 202 |
| 2 - Dégradation des céramiques..... | 204 |
| 2.1. Oxydation..... | 205 |
| 2.2. Dégradation chimique..... | 205 |
| 2.3. Céramiques et stabilisation des déchets nucléaires..... | 208 |
| Chapitre VIII : CRITERES TECHN. CHOIX TRAIT. DE SURFACE..... | 211 |
| 1 - Prévention des différentes formes d'usure..... | 211 |
| 1.1. Prévention de l'usure par frottement..... | 211 |
| 1.2. Prévention de l'usure par corrosion..... | 212 |
| 1.3. Association corrosion et frottement..... | 214 |
| 2 - Principaux traitements et revêtements..... | 214 |
| 2.1. Classement par types d'interactions avec le substrat..... | 215 |
| 2.2. Classement par procédés..... | 215 |
| 2.3. Classement en fonction des objectifs recherchés..... | 215 |
| Partie C : DEVELOPPEMENT DURABLE ET ECOCONCEPTION | |
| Chapitre IX : DEVELOPPEMENT DURABLE : PRINCIPES ET MISE EN OE. | 220 |
| 1 - Principes du développement durable..... | 220 |
| 1.1. Constats et réactions..... | 220 |
| 1.2. Les pôles du développement durable..... | 222 |
| 1.3. Indicateurs de durabilité..... | 223 |
| 2 - Mise en œuvre du développement durable..... | 226 |
| 2.1. Les acteurs..... | 226 |
| 2.2. Les régulations..... | 228 |
| Chapitre X : ECOCONCEPTION..... | 233 |
| 1 - Matériaux et développement..... | 233 |
| 1.1. Matériaux et développement économique..... | 233 |
| 1.2. Matériaux et développement social..... | 234 |
| 1.3. Matériaux et pollution..... | 235 |
| 1.4. Matériaux et ressources naturelles..... | 238 |
| 2 - Ecoconception..... | 240 |
| 2.1. Enjeux..... | 240 |
| 2.2. Définition et principes..... | 240 |
| 2.3. Les outils..... | 241 |
| 2.4. Directives et écoconception..... | 243 |
| 2.5. Démarches d'écoconception..... | 244 |

Partie D : MEILLEURES TECHNIQUES DISPONIBLES ET ECOCONCEPTION DE TECHNOLOGIES PROPRES

| | |
|---|------------|
| Chapitre XI : PRESELECTION DE TRDS, ANALYSE DU CYCLE DE VIE..... | 246 |
| 1 - Enjeux des traitements de surface du XXI^{ème} siècle..... | 246 |
| 1.1. Enjeux des TRDS | 246 |
| 1.2. Meilleures technologies disponibles et technologies propres | 247 |
| 2 - Arbitrage des choix : écoconception et ACV | 248 |
| 3 - Orientations pour une présélection de TRDS..... | 252 |
| | |
| Chapitre XII : CHROME ET CHROMAGE | 253 |
| 1 - Le chrome et ses applications industrielles..... | 253 |
| 1.1. Principales caractéristiques du chrome | 253 |
| 1.2. Mise en œuvre dans les traitements de surface | 253 |
| 1.3. Propriétés et emplois des dépôts électrolytiques de chrome | 255 |
| 1.4. Restrictions d'emploi du Chrome VI..... | 258 |
| 2 - Contraintes environnementales | 259 |
| 2.1. Directives sectorielles..... | 259 |
| 2.2. Solutions de remplacement du chrome VI..... | 260 |
| 2.3. Cas du chrome métal | 261 |
| | |
| Chapitre XIII : TRAITEMENTS ET REVETEMENTS EPAIS | 263 |
| 1 - Techniques en présence | 263 |
| 1.1. Techniques laser | 263 |
| 1.2. Projection thermique..... | 264 |
| 2 - Techniques laser | 265 |
| 2.1. Principes fondamentaux des lasers | 265 |
| 2.2. Interactions faisceaux laser-matière..... | 269 |
| 2.3. Familles de lasers de puissance | 270 |
| 2.4. Techniques d'apport de matière..... | 272 |
| 2.5. Rechargement laser..... | 273 |
| 3 - Dépôts réalisés par projection plasma | 277 |
| 3.1. Principe..... | 277 |
| 3.2. Torches à plasma | 277 |
| 3.3. Caractéristiques des dépôts..... | 278 |
| 4 - Dépôts hybrides..... | 280 |
| | |
| Chapitre XIV : DEPOTS EN PHASE VAPEUR..... | 281 |
| 1 - Techniques PVD..... | 281 |
| 1.1. Evaporation thermique sous vide..... | 282 |
| 1.2. Ablation laser..... | 285 |
| 1.3. Pulvérisation cathodique (sputtering) | 286 |
| 2 - Dépôts CVD..... | 288 |
| 2.1. Principe et types de réactions | 288 |
| 2.2. Couche limite..... | 289 |
| 2.3. Paramètres thermodynamiques des dépôts CVD | 290 |
| 2.4. Techniques CVD | 291 |
| | |
| Solutions des exercices..... | 293 |
| Notes et références..... | 294 |