

Faculté Polytechnique de Mons

Service de Génie Mécanique

Cours 0707-04

Technologie des fabrications mécaniques 2

Prof. Enrico Filippi

Table des matières

1.	<u>MATERIAUX</u>	6
	1.1. <u>Introduction</u>	6
	1.2. <u>Méthodologie de choix des matériaux</u>	9
	1.3. <u>Matériaux polymères</u>	22
	1.3.1. Introduction	22
	1.3.2. Propriétés d'usage des polymères	25
	1.3.3. Utilisation des matières plastiques	25
	1.3.4. La structure des polymères	26
	1.3.5. Principales familles de polymères	33
	1.3.5.1. Polymères thermoplastiques	35
	1.3.5.2. Polymères thermodurcissables	37
	1.3.5.3. Elastomères	37
	1.3.6. Propriétés des polymères	37
	1.3.6.1. Comportements vitreux et caoutchoutiques	41
	1.3.6.2. Comportement mécanique des polymères	41
	1.3.7. Polymères thermoplastiques	41
	1.3.8. Polymères thermodurcissables	46
	1.3.9. Les additifs	47
	1.3.9.1. Plastifiants	49
	1.3.9.2. Charges et renforts	50
	1.3.9.3. Pigments et colorants	50
	1.3.9.4. Stabilisants et antioxydants	50
	1.3.9.5. Ignifugeants ou retardateurs de combustion	50
	1.3.9.6. Lubrifiants	50
	1.3.9.7. Antistatiques	50
	1.3.10. Caractéristiques de quelques thermoplastiques	50
	1.3.11. Prix des polymères	56
	1.4. <u>Céramiques et verres</u>	56
	1.4.1. Introduction	56
	1.4.2. Céramiques	57
	1.4.2.1. Céramiques traditionnelles	59
	1.4.2.2. Céramiques techniques	59
	1.4.2.2.1. Alumine	59
	1.4.2.2.2. Zircone	60
	1.4.2.2.3. Carbures	60
	1.4.2.2.4. Nitrures	60

1.4.2.3.	Propriétés et applications des céramiques	60
1.4.3.	Carbones et graphites	60
1.5.	<u>Matériaux composites</u>	61
1.5.1.	Introduction	61
1.5.2.	Eléments de renforcement	66
1.5.2.1.	Conditionnement des renforts	68
1.5.2.1.1.	Ensembles linéaires	68
1.5.2.1.2.	Ensembles surfaciques	68
1.5.2.1.3.	Ensembles multidirectionnels	70
1.5.2.1.4.	Interface	70
1.5.2.1.5.	Semiproduit	71
1.5.2.2.	Fibres de verre	72
1.5.2.3.	Fibres aramides	73
1.5.2.4.	Fibres de carbone/graphite	74
1.5.2.5.	Autres fibres	75
1.5.2.6.	Principales propriétés physiques des fibres	76
1.5.2.7.	Prix des renforts et producteurs	77
1.5.3.	Matrices	75
1.5.3.1.	Introduction	77
1.5.3.2.	Matrices organiques	77
1.5.3.3.	Matrices métalliques	81
1.5.3.4.	Matrices céramiques	82
1.5.3.5.	Matrices carbone	82
1.5.3.6.	Prix des matrices	82
1.5.4.	Matériaux sandwiches	82
1.5.5.	Applications	85
1.5.5.1.	Composites carbone-carbone (C/C)	87
2.	<u>MISE EN FORME A L'ETAT SOLIDE ou PÂTEUX</u>	87
2.1.	<u>Métallurgie des poudres - Frittage</u>	87
2.1.1.	Introduction	87
2.1.2.	Procédé	89
2.1.3.	Applications	91
2.1.4.	Elaboration des poudres	93
2.1.5.	Mélange des poudres	95
2.1.6.	Compaction de la poudre	96
2.1.6.1.	Compaction uniaxiale	97
2.1.6.2.	Compaction isostatique	100
2.1.6.3.	Autres procédés	101
2.1.7.	Frittage	101
2.1.8.	Opérations de finition	103
2.1.8.1.	Calibrage	103
2.1.8.2.	Forgeage	103
2.1.8.3.	Infiltration	104
2.1.8.4.	Autres opérations de finition	105
2.1.9.	Quelques règles de conception des pièces frittées	105
2.1.10.	Propriétés des matériaux frittés	106
2.1.11.	Pièces mécaniques frittées	107

2.1.12. Bibliographie	108
<u>2.2. Prototypage rapide</u>	109
2.2.1. Introduction	109
2.2.2. Utilisation industrielle du prototypage rapide	112
2.2.3. Procédés liquide/solide de fabrication par couches	114
2.2.3.1. Stéréolithographie point par point	115
2.2.3.2. Stéréolithographie par couches entières	118
2.2.4. Procédés solide/solide de fabrication par couches	121
2.2.4.1. Extrusion et laminage d'un filament	121
2.2.4.2. Découpage et collage de strates	124
2.2.4.3. Projection de matières	128
2.2.5. Procédés poudre/solide de fabrication par couches	131
2.2.6. Matériaux pour le prototypage rapide	134
2.2.7. Méthodes de production « indirectes »	136
2.2.7.1. Fabrication indirecte de pièces plastiques	136
2.2.7.2. Fabrication indirecte de pièces métalliques	138
<u>2.3. Mise en forme des polymères</u>	140
2.3.1. Introduction	140
2.3.2. Principaux procédés de mise en oeuvre	142
2.3.3. Injection des thermoplastiques	145
2.3.3.1. Machines d'injection	147
2.3.3.2. Dispositifs de fermeture	148
2.3.3.3. Conception des moules	149
2.3.3.4. Conception des pièces injectées	156
2.3.4. Injection des thermodurcissables	161
2.3.5. Injection soufflage des thermoplastiques	161
2.3.6. Extrusion	163
2.3.7. Extrusion gonflage	164
2.3.8. Extrusion soufflage	165
2.3.9. Calandrage	166
2.3.10. Thermoformage	168
2.3.11. Rotomoulage	170
2.3.12. Techniques d'assemblages	175
2.3.12.1. Collage	175
2.3.12.2. Soudage	176
2.3.12.3. Vissage	180
2.3.12.4. Encliquetage ou clipsage	181
2.3.12.5. Rivetage	182
2.3.12.6. Charnières	183
2.3.13. Bibliographie	184
2.3.14. Logiciels de simulation	184
2.3.15. Banques de données sur les propriétés de matériaux	184
<u>2.4. Mise en forme des composites à matrice organique</u>	185
2.4.1. Introduction	185
2.4.2. Principaux procédés de mise en oeuvre	188
2.4.3. Description de quelques procédés de mise en oeuvre	192
2.4.3.1. Moulage au contact	192
2.4.3.2. Projection simultanée	194

2.4.3.3.	Enroulement filamentaire	196
2.4.3.4.	Moulage sous vide	199
2.4.3.5.	Injection de résine basse pression	200
2.4.3.6.	Compression à froid	201
2.4.3.7.	Compression à chaud	203
2.4.3.8.	Compression de SMC	205
2.4.3.9.	Compression de BMC	207
2.4.3.10.	Pultrusion	208
2.4.4.	Usinage des composites	210
2.4.5.	Maintenance et réparations	211
2.4.6.	Environnement. Sécurité - hygiène	211
2.4.7.	Choix du procédé de fabrication	212
2.4.8.	Importance relative des procédés de mise en œuvre	215
2.4.9.	Evolution prévisible	215
2.4.10.	Bibliographie	216
2.4.11.	Centres de recherche et d'expertise	216
2.4.12.	Fédérations industrielles et associations professionnelles	216

2.5. Usinage à grande vitesse

2.5.1.	Introduction	
2.5.2.	Caractéristiques de l'usinage grande vitesse	
2.5.3.	Techniques d'usinage	
2.5.3.1.	Usinage des alliages légers	
2.5.3.2.	Usinage des aciers traités	
2.5.4.	Phénomènes de coupe	
2.5.4.1.	Formation du copeau (matériaux ductiles)	
2.5.4.2.	Température de coupe	
2.5.4.3.	Usure des outils de coupe	
2.5.5.	Machines outil	
2.5.5.1.	Broche	
2.5.5.2.	Moteurs d'axes et leurs asservissements	
2.5.5.3.	Porte-outils et attachements	
2.5.5.4.	Lubrification. Evacuation des copeaux	
2.5.5.5.	Commande numérique	
2.5.5.6.	Trajectoire d'outil - CFAO	
2.5.6.	Vibrations autoexcitées	
2.5.6.1.	Origines	
2.5.6.2.	Lobes de stabilité	
2.5.6.3.	Moyens de prédiction	
2.5.7.	Optimisation de l'opération	
2.5.8.	Sécurité	
2.5.9.	Conclusions	

2.6. La commande numérique des machines-outils

2.6.0.	Introduction	
2.6.0.1.	CN: amélioration de la productivité	
2.6.0.2.	Structure d'une fraiseuse CN 3 axes	
2.6.0.3.	Avantages de la commande numérique	
2.6.1.	Principe de mise en œuvre avec la CN	
2.6.1.1.	Programmation	
2.6.1.2.	Origine	

2.6.1.3.	Géométrie de l'outil	
2.6.1.4.	Vérification	
2.6.2.	Repérage de l'outil dans la zone de travail	
2.6.2.1.	Définition des axes	
2.6.2.2.	Désignation des origines	
2.6.3.	Organisation d'un programme CN en langage ISO	
2.6.3.1.	Structure générale du programme	
2.6.3.2.	Lettres-adresses	
2.6.3.2.1.	Fonctions préparatoires G	
2.6.3.2.2.	Fonctions auxiliaires normalisées M	
2.6.3.3.	Format des données	
2.6.4.	Exercice de programmation appliqué au fraisage	
2.6.5.	Programmation assistée par ordinateur	
2.6.6.	Stratégie d'usinage en UGV	
3.	<u>PROCEDES D'USINAGE NON TRADITIONNELS</u>	246
	3.1. <u>Introduction</u>	246
	3.2. <u>Usinage par électroérosion</u>	248
3.2.1.	Principe	249
3.2.2.	Zone thermiquement affectée	252
3.2.3.	Générateur d'impulsion	253
3.2.4.	Asservissement d'avance	253
3.2.5.	Débit de matière et état de surface	255
3.2.6.	Matériaux usinables	255
3.2.7.	Matériaux pour électrodes	255
3.2.8.	Diélectriques	255
3.2.9.	Machines de défonce (machine d'enfonçage)	256
3.2.10.	Découpe par fil	257
3.2.11.	Domaines d'utilisation	258
3.2.12.	Electroérosion : synthèse	260
3.2.13.	Pour en savoir plus	261
	3.3. <u>Usinage électrochimique</u>	262
3.3.1.	Principe	262
3.3.2.	Cathode	263
3.3.3.	Procédés d'usinage électrochimique	264
3.3.3.1.	Usinage prismatique	264
3.3.3.2.	Perçage	264
3.3.3.3.	Usinage statique	264
3.3.3.4.	Polissage électrochimique	264
3.3.3.5.	Rectification électrochimique	264
3.3.4.	Machines	266
3.3.5.	Avantages et inconvénients	266
3.3.6.	Synthèse	268
3.3.7.	Bibliographie	268
	3.4. <u>Usinage chimique</u>	269
3.4.1.	Principe	269

3.4.2.	Matériaux usinés	269
3.4.3.	Modalités de mise en oeuvre	269
3.4.4.	Avantages et limites du procédé d'usinage chimique	271
3.4.5.	Applications	272
3.5.	<u>Usinage par ultrasons</u>	276
3.6.	<u>Performances comparées des divers procédés</u>	278
3.6.1.	Usinabilité des matériaux	278
3.6.2.	Débit de matière et puissance nécessaire	279
3.6.3.	Propriétés des pièces usinées	279
3.6.4.	Aspects économiques	281
4.	<u>TRAITEMENTS ET REVETEMENTS DE SURFACE</u>	282
4.1.	<u>Introduction</u>	282
4.2.	<u>Traitements par transformation structurale</u>	290
4.2.1.	Traitements thermiques de surface	290
4.2.2.	Traitements mécaniques	292
4.2.2.1.	Grenaillage	292
4.2.2.2.	Sablage	293
4.2.2.3.	Ebavurage	293
4.2.2.4.	Polissage	293
4.2.2.5.	Galetage (« roller burnishing »)	293
4.3.	<u>Traitements par diffusion</u>	295
4.4.	<u>Traitements de conversion</u>	299
4.4.1.	Anodisation de l'aluminium et de ses alliages	299
4.4.2.	Phosphatation	299
4.4.3.	Oxalation	299
4.4.4.	Chromatation	300
4.5.	<u>Revêtements</u>	301
4.5.1.	Dépôt électrolytique	301
4.5.2.	Dépôt chimique	302
4.5.3.	Revêtement par immersion dans un métal fondu (« hot dipping »)	302
4.5.4.	Revêtement par métallisation au pistolet	304
4.5.5.	Revêtement par placage, rechargement	305
4.5.5.1.	Revêtement par placage (« cladding »)	305
4.5.5.2.	Rechargement par soudage	306
4.5.6.	Dépôts physiques en phase vapeur ou PVD	306
4.5.7.	Dépôts chimiques en phase vapeur ou CVD	308
4.5.8.	Peinture	308
4.5.9.	Revêtement plastique	308
4.6.	<u>Traitement de surface de pièces plastiques</u>	311
4.7.	<u>Pré-traitements, polissages, pré-opérations</u>	311

4.8. <u>Impacts sur l'environnement</u>	311
4.9. <u>Tendances et évolutions</u>	312
4.10. <u>Bibliographie</u>	313
4.11. <u>Adresses utiles</u>	313
4.12. <u>Normes</u>	313
5. <u>LE COLLAGE STRUCTURAL</u>	
5.1. <u>Introduction</u>	
5.2. <u>Définition du collage</u>	
5.3. <u>Théorie de l'adhésion</u>	
5.4. <u>Avantages et inconvénients du collage</u>	
5.5. <u>Classification des adhésifs</u>	
5.6. <u>Principaux adhésifs structuraux</u>	
5.6.1. Epoxydes	
5.6.2. Polyuréthanes	
5.6.3. Adhésifs acryliques modifiés	
5.6.4. Adhésifs acryliques réagissant sous l'action des UV	
5.6.5. Cyanoacrylates	
5.6.6. Adhésifs anaérobies	
5.6.7. Adhésifs thermofusibles	
5.6.8. Résines thermostables	
5.7. <u>Préparation des surfaces à coller</u>	
5.8. <u>Mise en œuvre des adhésifs</u>	
5.9. <u>Forme et dimensionnement des joints collés</u>	
5.10. <u>Règles de conception</u>	
5.11. <u>Adresses utiles et références bibliographiques</u>	
5.12. <u>Annexes:</u>	
5.12.1. Caractéristiques et propriétés de mise en œuvre des adhésifs	
5.12.2. Guide de sélection des adhésifs en fonction des substrats	
5.12.3. Dimensionnement d'un joint collé	