

SOMMAIRE

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| CHAPITRE I : LES ALLIAGES A MEMOIRE DE FORME ET LEUR POUVOIR AMORTISSANT | 17 |
| I/ DIAGRAMMES DE CONSTITUTION DES ALLIAGES A MEMOIRE UTILISES | 19 |
| I.1/ Les alliages Cuivre-Zinc-Aluminium | 19 |
| I.2/ Les alliages Cuivre-Aluminium-Nickel | 21 |
| I.3/ Les alliages Fer-Manganese-Silicium | 23 |
| I.4/ Autres alliages à mémoire | 25 |
| II/ PHENOMENOLOGIE DE L'AMORTISSEMENT INTERNE DES ALLIAGES A MEMOIRE DE FORME | 25 |
| II.1/ Quelques rappels | 25 |
| II.2 / Principaux résultats concernant l'amortissement interne des alliages à mémoire de forme | 29 |
| II.2.1/ Mesure d'amortissement interne au MHz pendant la transformation martensitique | 29 |
| II.2.2/ Mesure de l'amortissement interne entre 1 Hz et 1 KHz | 29 |
| II.3/ Principaux mécanismes métallurgiques intervenant dans les alliages | 31 |
| II.4 / Principaux modèles phénoménologiques rencontrés dans la bibliographie..... | 33 |
| II.4.1/ Modèle de BELKO | 33 |
| II.4.2/ Modèle de DELORME | 35 |
| II.4.3/ Modèle de DE JONGHE | 35 |
| II.4.4/ Modèle de MERCIER | 37 |
| II.5/ Conclusions sur les modèles | 39 |
| III/ INFLUENCE DES FACTEURS THERMOMECHANIQUES SUR LE POUVOIR AMORTISSANT | 41 |
| III.1/ Influence des traitements thermomécaniques | 41 |
| III.2/ Influence de l'état structural initial | 41 |
| III.3/ Influence de la température | 43 |
| III.4/ Influence de l'amplitude de déformation | 43 |
| III.5/ Influence de l'état de contrainte | 45 |
| IV/ CONCLUSIONS SUR L'ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE | 45 |
| CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA PHENOMENOLOGIE DE L'AMORTISSEMENT DES CHOCS ET DES VIBRATIONS ASSOCIEES | 47 |
| I/ EXTENSION DE LA NOTION D'AMORTISSEMENT | 49 |
| II/ NOTIONS SPECIFIQUES UTILISEES EN DYNAMIQUE DES MATERIAUX | 53 |
| II.1/ Notion de choc | 53 |
| II.2/ Vitesse de déformation | 55 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| II.3/ Difficultés d'expérimentation et d'interprétation liées aux fortes vitesses de déformation | 55 |
| II.4/ Vitesse particulaire et vitesse d'onde élasto-plastique | 57 |
| II.5/ Intervention d'autres grandeurs physiques | 57 |
| II.6/ Loi de comportement dynamique | 59 |
| II.7/ Dissipation mécanique et échauffement adiabatique | 61 |
| III/ PRINCIPALES HYPOTHESES ET METHODOLOGIE REGISSANT NOTRE ETUDE | 63 |
| III.1/ Hypothèses limitantes | 63 |
| III.2/ Méthodologie | 63 |
| CHAPITRE III : METHODES EXPERIMENTALES ET MATERIAUX ETUDIES | 67 |
| I/ METAUX ET ALLIAGES | 69 |
| I.1/ Alliages à mémoire de forme utilisés | 69 |
| I.2/ Autres métaux et alliages..... | 69 |
| II/ METHODE D'ETUDE DES STRUCTURES | 69 |
| II.1/ Prélèvement des échantillons..... | 69 |
| II.2/ Préparation des échantillons | 69 |
| II.3/ Caractérisation micrographique..... | 69 |
| II.4/ Diffraction des rayons X | 71 |
| III/ CARACTERISATION MECANIQUE CLASSIQUE | 71 |
| III.1/ Caractérisation par ultra-sons | 71 |
| III.2/ Compression quasi-statique | 73 |
| IV/ IMPACT A GRANDE VITESSE | 73 |
| IV.1/ Impact indirect sur barres d'Hopkinson | 73 |
| IV.2/ Impact direct à grande vitesse | 75 |
| V/ IMPACT A FAIBLE VITESSE : PENDULE DE CHOC | 77 |
| V.1/ Principe | 77 |
| V.2/ Dispositif expérimental | 79 |
| V.2.1/ Géométrie des éprouvettes | 79 |
| V.2.2/ Mesure des forces dans les corps d'épreuve | 79 |
| V.2.3/ Mesure de déplacement et de vitesse | 81 |
| V.2.4/ Acquisition rapide et stockage | 81 |
| V.2.5/ Caractéristiques du secteur | 81 |
| V.2.6/ Caractéristiques des disques d'inertie | 81 |
| V.2.7/ Energie initiale disponible | 83 |
| V.2.8/ Energie de rebond | 83 |
| V.2.9/ Vitesse initiale | 83 |
| V.2.10/ Application numérique | 83 |
| V.3/ Mesure de la température | 85 |
| V.4/ Calcul des caractéristiques mécaniques | 85 |
| V.4.1/ Calcul de la déformation moyenne de l'échantillon | 85 |
| V.4.2/ Calcul de la vitesse de déformation moyenne | 87 |
| V.4.3/ Calcul de la contrainte moyenne | 87 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CHAPITRE IV : COMPORTEMENT MECANIQUE DES METAUX ET ALLIAGES SOUS IMPACTS | 89 |
| I/ ANALYSE PHYSIQUE D'UN CHOC SUR LE PENDULE A SECTEUR | 91 |
| I.1/ Analyse cinétique | 91 |
| I.2/ Bilan des puissances instantanées..... | 91 |
| I.3/ Bilan énergétique du choc | 91 |
| I.3.1/ Bilan pendant le choc | 93 |
| I.3.3/ Bilan après le choc | 93 |
| II/ TESTS PREALABLES SUR LE CUIVRE PUR | 99 |
| II.1/ Séparation des effets purement d'origine mécanique | 99 |
| II.2/ Influence de la vitesse de déformation | 101 |
| II.3/ Influence de la vitesse de déformation à énergie d'impact constante | |
| III/ COMPORTEMENT D'UN ALLIAGE CuZnAl | 103 |
| III.1/ Comportement en compression quasi-statique | 103 |
| III.2/ Comportement aux moyennes et grandes vitesses de déformation | 107 |
| III.3/ Influence des conditions d'expérimentations | 111 |
| III.3.1/ Influence de la vitesse à énergie d'impact constante | 111 |
| III.3.2/ Influence de l'énergie d'impact à vitesse constante | 115 |
| III.4/ Comparaison avec le même alliage non traité | 115 |
| IV/ COMPARAISON AVEC CERTAINES NUANCES D'AUTRES FAMILLES D'AMF | 123 |
| IV.1/ L'alliage Fer-Manganèse-Silicium (FM30) | 123 |
| IV.2/ L'alliage Cuivre-Aluminium-Nickel (R225) | 127 |
| V/ TESTS COMPLEMENTAIRES SUR D'AUTRES METAUX ET ALLIAGES | 133 |
| V.1/ Comportement de deux nickels purs | 133 |
| V.2/ Comportement mécanique d'autres alliages | 137 |
| V.3/ Classement des matériaux étudiés | 137 |
| VI/ MESURE DE LA TEMPERATURE RESIDUELLE DES METAUX ET ALLIAGES APRES IMPACT | 141 |
| VII/ COMPORTEMENT COMPARATIF DE QUELQUES ALLIAGES A MEMOIRE DE FORME DANS LE CAS D'UN CHOC TRIAXIAL EN FLEXION-PERFORATION | 143 |
| CONCLUSIONS CONCERNANT LES COMPORTEMENTS MECANQUES DES METAUX ET ALLIAGES SOUS IMPACTS | 147 |
| CHAPITRE V : ASPECTS METALLURGIQUES DE L'ENDOMMAGEMENT PAR IMPACT DE L'ALLIAGE A MEMOIRE DE FORME CuZnAl | 151 |
| I/ CARACTERISATION METALLURGIQUE DU MATERIAU INITIAL | 153 |
| I.1/ Caractérisation métallographique | 153 |
| I.2/ Sensibilité de l'alliage traité aux traitements métallographiques | 153 |
| I.3/ Etude de la cinétique de transformation de l'état initial par calorimétrie | 155 |
| I.4/ Etude de l'évolution de la structure de l'état initial avec la température | 157 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| I.4.1/ Rappel des hypothèses | 157 |
| I.4.2/ Suivi de la transformation par diffraction des rayons X | 157 |
| II/ ETUDE MORPHOLOGIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT ENGENDRE PAR IMPACT | 159 |
| II.1/ Les microstructures martensitiques (Groupe A) | 161 |
| II.2/ Les microstructures "à défauts" (Groupe B) | 165 |
| II.3/ Observations complémentaires sur un alliage Cuivre-Aluminium-Nickel | 171 |
| III/ ETUDE STRUCTURALE DE L'ENDOMMAGEMENT | 173 |
| III.1/ Caractérisation des structures dans la plaque (L) impactée en flexion-perforation | 173 |
| III.1.1/ Etude structurale en fonction de la zone d'impact | 173 |
| III.1.2/ Influence de l'endommagement sur la cinétique de transformation en fonction de la zone d'impact | 175 |
| III.2/ Influence de l'endommagement sur l'évolution structurale en fonction de la température | 181 |
| III.2.1/ Echantillon (2) prélevé dans la plaque (L) | 181 |
| III.2.2/ Echantillon prélevé dans la plaque (G) | 181 |
| CHAPITRE VI : PROPOSITION DE MODELES ET CRITERES EXPERIMENTAUX POUR L'AMORTISSEMENT DANS LES ALLIAGES A MEMOIRE DE FORME | 187 |
| I/ RECHERCHE D'UN MODELE PHENOMENOLOGIQUE DE COMPORTEMENT | 189 |
| I.1/ Principe de base | 189 |
| I.2/ Recherche d'une loi de comportement mécanique | 191 |
| I.2.1/ Cas de l'alliage Cu-Zn-Al traité | 191 |
| I.2.2/ Cas de l'alliage Cu-Al-Ni traité | 193 |
| I.3/ Limites de validité des lois de comportement | 193 |
| I.3.1/ Extension du modèle au pouvoir amortissant | 195 |
| I.3.2/ Extension du modèle de comportement à la célérité élasto-plastique Cp | 195 |
| II/ PASSAGE DE LA THERMODYNAMIQUE A UNE APPROCHE THERMO-CINETIQUE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE | 199 |
| II.1/ Description thermodynamique des comportements mécaniques | 199 |
| II.2/ Interprétation d'un diagramme de constitution des "états intermédiaires" | 201 |
| II.3/ Etude cinétique du pouvoir amortissant | 203 |
| III/ CRITERES METALLURGIQUES POUR LE POUVOIR AMORTISSANT | 203 |
| III.1/ Distribution de la martensite dans les grains | 203 |
| III.2/ Influence de la taille de grains sur le comportement mécanique | 205 |
| III.3/ Influence de la structure métallurgique initiale | 205 |
| III.4/ Une question essentielle : les premières étapes de la transformation | 207 |
| III.4.1/ L'approche classique : germination et croissance | 207 |
| III.4.2/ Une alternative : la nucléation progressive sous l'effet de vibrations de réseau | 207 |
| III.5/ Apparition de défauts localisés | 209 |
| III.5.1/ Bandes de cisaillement localisées | 209 |
| III.5.2/ Les bandes de cisaillement adiabatique..... | 211 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| IV/ RETOUR SUR NOTRE APPROCHE GENERALE ET NOS EXPERIMENTATIONS : | |
| LEURS LIMITES | 211 |
| IV.1/ De l'importance d'avoir un bon capteur ! | 211 |
| IV.2/ Les essais dynamiques sont essentiellement source d'hétérogénéités | 213 |
| IV.2.1/ La vitesse de déformation varie | 213 |
| IV.2.2/ Les déformations sont hétérogènes | 213 |
| IV.2.3/ Que dire des contrainte d'écoulement ? | 215 |
| IV.3/ Conséquences importantes sur la validité de nos résultats | 215 |
| IV.3.1/ Que signifie "à déformation constante ?" | 215 |
| IV.3.2/ L'endommagement du matériau est-il caractéristique ? | 215 |
| IV.4/ Retour sur la définition du pouvoir amortissant | 215 |
| CONCLUSION | 221 |

LISTE DES ILLUSTRATIONS

BIBLIOGRAPHIE GENERALE

REFERENCES

ANNEXES

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <u>ANNEXE I</u> : CARACTERISATION DES TEMPERATURES DE TRANSFORMATION | A.3 |
| I.1/ Résistivité électrique | A.5 |
| I.2/ Calorimétrie différentielle | A.5 |
| <u>ANNEXE II</u> : DOSAGE DE LA MARTENSITE DES CuZnAl PAR DIFFRACTION X | A.7 |
| II.1/ Détermination des spectres X théoriques | A.9 |
| II.1.1/ Expression de l'intensité théorique | A.9 |
| II.1.2/ Calcul des intensités théoriques | A.11 |
| II.1.2.1/ Facteur de diffusion atomique | A.11 |
| II.1.2.2/ Facteur de multiplicité | A.11 |
| II.1.2.3/ Facteur de structure | A.11 |
| II.1.2.4/ Facteur de température | A.13 |
| II.1.3/ Résultats des spectres théoriques | A.15 |
| II.2/ Traitement numériques des spectres expérimentaux | A.21 |
| II.2.1/ Déconvolution des spectres | A.21 |
| II.2.2/ Choix de la forme des pics standard | A.21 |
| II.2.3/ Précision numérique des calculs | A.21 |
| II.2.4/ Cas des pics "saturés" | A.23 |
| II.3/ Identification des structures et de leurs pics respectifs | A.23 |
| II.4/ Méthodes de dosage de phase | A.23 |
| II.4.1/ Méthode des pics résolus | A.23 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| II.4.2/ Méthode des pics couplés | A.23 |
| II.4.3/ Méthode de la "référence interne" | A.25 |
| II.5/ Détermination des points de transformation | A.25 |
| II.5.1/ But de la modélisation | A.25 |
| II.5.2/ Modélisation par une tangente hyperbolique | A.25 |
| <u>ANNEXE III</u> : CALCULS DES CAPACITES CALORIFIQUES DES METAUX ET ALLIAGES UTILISES | A.27 |
| <u>ANNEXE IV</u> : TABLEAUX RECAPITULATIFS DES ESSAIS STATIQUES ET DYNAMIQUES SUR L'ENSEMBLE DES MATERIAUX ETUDIES | A.31 |
| <u>ANNEXE V</u> : COURBES EXPERIMENTALES DE LA MESURE DE LA TEMPERATURE RESIDUELLE APRES IMPACT SUR DIFFERENTS MATERIAUX | A.45 |

•
• •