

THÈSE

Pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Spécialité : Mécanique et Matériaux

Présentée par : **Viet Quoc VU**

**Nouveaux procédés d'hyperdéformation pour produire des tôles fines
à partir des métaux massifs**

New severe plastic deformation processes to obtain sheet products
from bulk metals

Thèse soutenue publiquement l'aout 28, 2020 à 14h, à l'amphithéâtre UFR MIM (Université de Lorraine-Metz) devant le jury composé de :

Werner Skrotzki	Prof., Technische Universität Dresden, Allemagne	Rapporteur
Leo Kestens	Prof., Ghent University, Belgique	Rapporteur
Valéria Mertinger	Prof., University of Miskolc, Hongrie	Examineur
Véronique Doquet	HDR, Dir. Recherche, LMS, Ecole Polytechnique, France	Examineur
Roxane Massion	Dr., LEM3, Université de Lorraine, France	Examineur
Andras Borbely	HDR, Ecole des Mines de Saint Etienne, France	Examineur
Laszlo Toth	Prof., LEM3, Université de Lorraine, France	Directeur de thèse

*LEM3 /LabEx DAMAS - 7 rue Félix Savart F-57070 METZ, France
Université de Lorraine – Pôle M4: matière, matériaux, métallurgie, mécanique*

Abstract

Severe plastic deformation (SPD) has been acclaimed as an effective technique for producing materials with superior properties such as high mechanical and fatigue strength, high wear resistance, and superplasticity. A generic feature of SPD processes is that large strain is imposed on the processed sample, mostly under high hydrostatic pressure, for transforming a coarse-grained microstructure into an ultrafine-grained or nano-grained microstructure, which are unattainable by conventional thermo-mechanical processing. In the present thesis, three SPD processes namely, plastic flow machining (PFM), high pressure compressive shearing (HPCS) and friction assisted lateral extrusion process (FALEP) are proposed for producing sheet materials. PFM is a SPD process capable of producing sheet materials with large shear strain from bulk samples in one single extrusion step with the assistance of high hydrostatic pressure. The process was tested on Al1050 samples to study imposed strain, microstructure and texture evolutions, and mechanical properties. The results are: a high-degree deformation gradient was obtained across the thickness of the produced Al1050 sheet, with shear strain ranging from 2.5 to 10; UFG microstructures and simple shear textures with gradient across the thickness of the produced sheet were presented; the tensile strength of the sheet increased by about a factor of three with a total elongation of 20%; the average Lankford parameter of the sheet was 0.92, which is much higher than conventional aluminum sheets obtained by rolling. Modelling and simulation work on PFM were focused in two parts: mechanical and texture modelling. In the first part, an analytical model accompanied by finite element simulations was established to gain insight the formation of the Al1050 sheet under the loading conditions and die geometry. This modelling and simulation set was able to predict the lateral extrusion ratio and the effect of the applied back pressure and die geometry on the formation of the sheet and it produced results in agreement with the experiment. In the second modelling and simulation set, for texture evolution, first, a strain path model was established; then, two modelling approaches, including viscoplastic self-consistent (VPSC) and grain fragmentation (GR) were employed for various strain zones across the produced sheet. The results showed that in the lowest strain zone, the VPSC model produced good agreement with experiment for the texture. At large strains, the GR model was successful for reproducing the experimental texture, indicating the importance of incorporating grain fragmentation into large strain polycrystal modeling. The second proposed SPD technique in thesis was the HPCS; a variant

of the high pressure sliding (HPS) process. In this thesis, HPCS was applied to ARMCO® steel in an apparatus in which the shear force, normal force, and shearing distance could be monitored to allow the stress-strain response to be measured *in situ* into the steady state work hardening regime. The results were: the applied compression stress did not result in a purely hydrostatic stress state in HPCS; the deviatoric stress state progressively approached the simple shear stress state as a function of strain; the steady state of strain hardening at 1150 MPa, defining a point on the Derby-plot of dynamic recrystallization; the microstructure features revealed the occurrence of dynamic recrystallization in the steady state, at room temperature; the grain size was reduced by about a factor of 170 upon reaching steady state flow conditions; a characteristic bcc simple shear texture was found; the produced microstructure and texture were uniform throughout the thickness of the samples. The last studied SPD process was FALEP, a SPD technique in which a bulk sample is extruded laterally through a channel die with assistance of a friction force to form a sheet with extremely high plastic imposed strain under high hydrostatic pressure. It was applied to Al1050 bulk samples to produce sheets with very imposed high strain which led to a significant grain refinement in which the grain size was reduced more than 160 times; to 600 nm after processing. The produced Al1050 sheet also showed a significant increase in yield strength: by about five times, and a remarkably high formability with R-value of 1.33, which is exceptionally high for aluminum.

Key words

Severe plastic deformation (SPD); Plastic flow machining (PFM); High pressure compressive shearing (HPCS); Friction assisted lateral extrusion process (FALEP); Microstructure evolution; Mechanical modelling; Texture evolution modeling

Résumé

L'hyperdéformation (SPD) a été reconnue comme une technique efficace pour produire des matériaux avec des propriétés supérieures, telles que la résistance mécanique et de fatigue élevée, meilleure résistance à l'usure, et la superplasticité. Une caractéristique générique des processus de HD est qu'une extrême déformation est imposée sur l'échantillon, la plupart du temps sous haute pression hydrostatique, pour transformer la microstructure initiale dans une microstructure à grain ultrafin, voir nano, qui sont inaccessibles par les traitements thermomécaniques conventionnels. Dans cette thèse, trois HP procédés, à savoir : l'usinage plastique (PFM), le cisaillement compressif à haute pression (HPCS) et le processus d'extrusion latérale assistée par frottement (FALEP), sont proposés pour la production des matériaux en forme d'une tôle.

PFM est un procédé SPD capable de produire des matériaux en forme de tôle avec une grande déformation en cisaillement, à partir d'échantillons massifs dans une seule étape d'extrusion à l'aide d'une pression hydrostatique élevée. Le procédé a été testé sur des échantillons d'Al1050 pour étudier les évolutions imposées par la déformation ; concernant la microstructure et de la texture, ainsi que les propriétés mécaniques. Les résultats obtenus sont : un gradient élevé de déformation a été obtenu à travers l'épaisseur de la feuille Al1050 produite, avec une valeur de cisaillement allant de 2,5 à 10; des microstructures UFG et des textures simples de cisaillement avec un gradient à travers l'épaisseur de la feuille produite, la résistance mécanique a augmenté d'environ un facteur de trois avec un allongement total de 20%; le paramètre Lankford de la feuille était de 0,92, ce qui est beaucoup plus élevé que les feuilles d'aluminium conventionnelles obtenues par laminage.

Les travaux de modélisation et de simulation sur PFM ont été concentrés en deux parties sur : de la modélisation mécanique, et de la texture. Dans la première partie, un modèle analytique accompagné de simulations d'éléments finis a été mis en place pour mieux comprendre la formation de la tôle Al1050 sous chargement pour la géométrie de la matrice. Les modélisations et simulations ont été en mesure de prédire le rapport d'extrusion latérale et l'effet de la pression arrière appliquée en fonction de la géométrie de la matrice sur la formation de la tôle et ils ont produit des résultats en accord avec des expériences. Dans le deuxième ensemble de modélisation

et de simulation, pour l'évolution de la texture, tout d'abord, un modèle de mode de déformation a été établi ; puis, deux approches de modélisations ; a viscoplastique auto-cohérente (VPSC) et la fragmentation des grains (GR) ont été employées pour les zones de déformation à travers la tôle produite.

Les résultats ont montré que dans la zone de la plus faible déformation, le modèle VPSC a produit un bon accord avec l'expérience pour la texture. Aux plus grandes déformations, c'est le modèle GR qui a réussi à reproduire la texture expérimentale, ce qui indique l'importance d'intégrer la fragmentation des grains dans la modélisation polycrystal à grande déformation. La deuxième SPD technique proposée dans la thèse était le HPCS; une variante du processus de glissement à haute pression (HPS). Dans cette thèse, l'HPCS a été appliqué à l'acier ARMCO® dans un appareil dans lequel la force de cisaillement, la force normale, et le déplacement pouvaient être mesurés pour pouvoir construire la courbe de contrainte-déformation in situ y compris le régime stationnaire de durcissement.

Les résultats obtenus : la contrainte de compression appliquée n'a pas produit un état de contrainte purement hydrostatique dans l'HPCS ; l'état de stress déviatorique s'est progressivement approché l'état de cisaillement simple en fonction de la déformation ; le stade stationnaire du durcissement à 1150 MPa définissait un point sur le Derby-plot de la recristallisation dynamique; les caractéristiques de la microstructure ont indiqué l'occurrence de la recristallisation dynamique dans le stade stationnaire à température ambiante ; la taille du grain a été réduite d'environ 170 fois dans le stade stationnaire; une texture bcc de cisaillement simple caractéristique a été trouvée ; la microstructure et la texture produites étaient uniformes tout au long de l'épaisseur des échantillons.

Le dernier SPD procédé étudié était le FALEP, une technique SPD dans laquelle un échantillon massif est extrudé latéralement avec l'aide d'une force de friction pour former une tôle avec une déformation plastique extrêmement grande sous une pression hydrostatique élevée. Le FALEP a été appliqué à des échantillons massif d'A11050 pour produire des tôles à très grande déformation, ce qui a entraîné un raffinement important des grains jusqu'à une taille du grain plus de 160 fois plus petite ; à 600 nm. La tôle d'A11050 présentait également une augmentation très

significative de la résistance : d'environ cinq fois, et une formabilité remarquablement élevée avec la valeur R de 1,33, ce qui est exceptionnellement élevé pour l'aluminium.

Acknowledgements

First and foremost, I would like to express my sincere gratitude and heartfelt thanks to my supervisor, professor Laszlo TOTH, for his tremendous guidance and inspiration throughout my thesis work. His continuous and friendly guidance has helped me a lot in constantly improving and expanding my scientific knowledge and research skills. Not only that, he also trained me to play ping pong and practiced with me on a regular basis. This helped me to stay strong physically and mentally to become more effective, productive and consistent in learning and researching. His liveliness and enthusiasm in sports and sharpness in science are a great inspiration for me to grow stronger and better in life and research. I feel very fortunate to have him as my PhD supervisor.

I am very grateful Professor Yan Beygelzimer who gave me a great deal of help in developing some mechanical modelling and calculations. I am also thankful Dr. Roman Kulagin for his great help in some finite element calculations. My thanks should also go to Dr. Jean-Jacques Fundenberger, Dr. Yajun Zhao and Dr. Cai Chen for their support and cooperation to facilitate my research work.

I highly appreciate the special help given by Dr. Olivier Perroud, Dr. Julien Guyon, Dr. Yudong Zhang and Mr. Patrick Moll for their training and help in X-ray diffraction, Microscopy and tensile testing measurements.

A friendly and supportive working environment always plays an important role at workplace. I really appreciate many colleagues and friends in LEM3 laboratory for their support and friendship during my time in the lab. They are Dr. Benoit Beausir, Mrs. Nathalie Niclas, Mrs. Arlette Jacquiere, Professor Eric Fleury, Dr. Laurent Weiss, Mr. Julien Oury, Dr. Marc Novelli, Dr. Subrata Panda, Dr. Satyaveer Dhinwal, Mr. Surya N. Kumaran, Mr. Pariyar Abhishek, Dr. Sudeep Sahoo, Dr. Zhang Chi, Ms. Qiang Chen, Mr. Hailong...I could not mention all of the names here, but I will remember all of you as very nice colleagues and friends.

I would like to sincerely appreciate all the thesis examiners and reviewers for taking their time to examine and review this thesis work.

Finally, I would like to thank my family for their unconditional love and support throughout my PhD study.

Contents

Abstract	i
Résumé	iii
Acknowledgements	vi
Table of contents	vii
List of figures	x
List of tables	xiv
Introduction	1
Chapter 1 Literature review	3
1.1 History of SPD	3
1.2 Main SPD methods	4
<i>1.2.1 Equal channel angular pressing (ECAP)</i>	4
<i>1.2.2 High pressure torsion (HPT)</i>	8
<i>1.2.3 Accumulative roll bonding (ARB)</i>	10
1.3 Other SPD processes	12
1.4 Change in microstructure during SPD processing	19
<i>1.4.1 Change in grain shape</i>	19
<i>1.4.2 Grain refinement during SPD processing</i>	21
<i>1.4.3 Change in disorientation distribution function (DDF)</i>	23
1.5 Change in crystallographic texture during SPD processing	27
<i>1.5.1 Introduction of texture</i>	27
<i>1.5.2 Texture evolution during plastic deformation</i>	28
<i>1.5.3 Kinematics of deformation for orientation change</i>	28
<i>1.5.4 Modelling texture of polycrystals during plastic deformation</i>	31
<i>1.5.4.1 Taylor model</i>	31
<i>1.5.4.2 Static model</i>	32
<i>1.5.4.3 Viscoplastic self-consistent (VPSC)</i>	33
<i>1.5.4.4 Grain fragmentation (GR) model</i>	33
<i>1.5.5 Texture evolution during SPD processing</i>	36
1.6 Chapter conclusions	42

Chapter 2 Plastic flow machining – Microstructure, strain estimation, texture and mechanical properties	45
2.1 Introduction	45
2.2 Working principles and experimental procedures	45
2.2.1 Working principles of PFM	45
2.2.2 Experimental procedures	47
2.3 Results and discussion	48
2.3.1 Microstructure evolution	48
2.3.2 Texture evolution	50
2.3.3 Mechanical properties	53
2.3.4 Formability	53
2.4 Chapter conclusions	55
Chapter 3 Plastic flow machining (PFM) – Mechanical modelling	57
3.1 Introduction	57
3.2 Lateral extrusion ratio and experimental results	57
3.3 Numerical simulation of the PFM process	62
3.4 Analytical modeling of the PFM process	64
3.4.1 Model for the lateral extrusion ratio	65
3.4.2 Model for the strain gradient	71
3.5 Discussion	74
3.6 Chapter conclusions	78
Appendix A: Power dissipation by friction	78
Appendix B: Minimization of the total power for obtaining the x value	81
Chapter 4 Plastic flow machining (PFM) – Texture modelling.....	83
4.1 Introduction	83
4.2 Strain path model	83
4.3 Polycrystal texture modelling	86
4.3.1 VPSC approach	86
4.3.2 Defining the initial texture and initial grain shape inputs	87
4.3.3 Defining strain hardening parameters	89
4.3.4 The grain fragmentation model	91
4.3.5 Defining the input velocity gradient tensors	92
4.3.6 Simulation implementation	93

4.4 Results and discussion.....	94
4.5 Chapter conclusions	100
Chapter 5 The high pressure compressive shearing process	101
5.1 Introduction	101
5.2 Working principles and experimental setup.....	102
5.3 The mechanics of HPCS	103
5.4 Experimental procedures	108
5.5 Experimental results	110
5.6 Discussion	115
5.7 Chapter conclusions	121
Appendix: Conversion of the Hencky strain into shear strain.....	122
Chapter 6 The friction assisted lateral extrusion process (FALEP)	124
6.1 Introduction	124
6.2 Working principles.....	124
6.3 Strain estimation	126
6.4 Example for application of the FALEP on commercially pure aluminum (Al-1050).....	126
6.4.1 <i>Experimental setup</i>	126
6.4.2 <i>Microstructure evolution</i>	128
6.4.3 <i>Texture evolution</i>	130
6.4.4 <i>Mechanical properties</i>	131
6.4.5 <i>Lankford parameter</i>	132
6.5 Chapter conclusions	133
Thesis conclusions	135
Perspectives.....	138
References	139