



**HAL**  
open science

## Influence de la température sur le comportement mécanique de pièces métalliques miniaturisées

Pierre-Antoine Dubos, Clément Keller, Mayerling Martinez Celis, Eric Hug

► **To cite this version:**

Pierre-Antoine Dubos, Clément Keller, Mayerling Martinez Celis, Eric Hug. Influence de la température sur le comportement mécanique de pièces métalliques miniaturisées. Journées Annuelles de la SF2M 2021, Oct 2021, Caen, France. hal-03409082

**HAL Id: hal-03409082**

**<https://hal.science/hal-03409082>**

Submitted on 29 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Influence de la température sur le comportement mécanique de pièces métalliques miniaturisées

Pierre-Antoine Dubos<sup>a</sup>, Clément Keller<sup>b</sup>, Mayerling Martinez Celis<sup>c</sup>, Eric Hug<sup>c</sup>

- <sup>a</sup> Université de Nantes, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (UMR CNRS 6183), 58 Rue Michel Ange – BP 420, 44606, Saint-Nazaire Cedex, France  
<sup>b</sup> Groupe de Physique des Matériaux, UMR 6634 CNRS - Université de Rouen, INSA de Rouen, Avenue de L'université, 76800, Saint-Etienne Du Rouvray, France  
<sup>c</sup> Laboratoire de Cristallographie et Sciences des Matériaux, ENSICAEN, Université de Caen, CNRS, 6 Bd Maréchal Juin, 14050, Caen, France

## Résumé

Le comportement mécanique de pièces miniaturisées est analysé au travers d'une étude de la loi de Hall-Petch pour différents matériaux dans des conditions de températures variables. Ces travaux ont permis de mettre en évidence une contrainte d'écoulement réduite par rapport à celle attendue par la loi de Hall-Petch pour les échantillons possédant peu de grains dans l'épaisseur de tôles. De plus l'effet de la température et de l'énergie de faute d'empilement des matériaux a été analysé afin de donner une vue d'ensemble sur cette problématique.

## Introduction

Depuis quelques dizaines d'années, la miniaturisation des pièces et la compréhension de leurs mécanismes de déformation est une problématique majeure au niveau industriel. Les secteurs liés à ces problématiques de pièces miniaturisées sont principalement l'électronique, la micro-mécanique, le transport, le médical et l'horlogerie. Pour les tôles métalliques, la réduction des dimensions par rapport à la taille de la microstructure, modifie drastiquement le comportement mécanique, pouvant altérer la qualité de la mise en forme et modifier la tenue mécanique en service des pièces, si la modification des lois de comportement n'est prise en compte. Cette étude vise à appréhender ces effets d'échelles au travers d'une caractérisation expérimentale de plusieurs matériaux (différentes structures cristallographiques, différentes énergies de faute d'empilement) dans des conditions de températures variables. La stratégie mise en place est de travailler avec des plaques d'épaisseurs constantes et des tailles de microstructures variables pour s'approcher des conditions de miniaturisation.

## Méthodes expérimentales

Les quatre matériaux (Ni, Cu, Ni<sub>20</sub>Cr et Co) se présentent sous forme de tôles d'épaisseur  $t = 500 \mu\text{m}$ . Des traitements thermiques à différentes températures et temps de maintien sous vide secondaire sont réalisés sur des éprouvettes de traction préalablement usinées dans le but de faire croître la taille de grains  $d$ . Les gammes de nombres de grains dans l'épaisseur, représentés par le rapport  $t/d$  sont comprises entre 1 et 50 et caractérisées par diffraction d'électrons rétrodiffusés. Ni, Cu et Ni<sub>20</sub>Cr présentent une structure cubique à faces centrées (CFC) indépendamment de la

température de sollicitation alors que le Co présente une microstructure biphasée 10% CFC/90% Hexagonale Compacte à température ambiante et une transformation allotropique à 430 °C aboutissant à une structure 100 % CFC au-dessus de 460°C [1]. Dans le cas de cette étude, les proportions de phase n'évoluent pas avec la déformation plastique. Des essais de traction uniaxiaux et monotones ont été menés à différentes températures dans une étuve pour des températures inférieures à 250 °C et dans un four trois zones pour les températures supérieures. La déformation est mesurée avec un extensomètre clip-on dans l'étuve et un extensomètre à chaud dans le four. Les essais sont pilotés en vitesse de déformation  $2.10^{-4} \text{ s}^{-1}$  et la cellule de force a une capacité de 50 kN.

## Résultats expérimentaux

A l'aide des courbes de contrainte-déformation ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) obtenues, il est possible de tracer la loi de Hall-Petch (1) pour différents niveaux de déformation [2]

$$\sigma(\epsilon) = \sigma_0(\epsilon) + k_{HP}(\epsilon)/\sqrt{d} \quad (1)$$

Les résultats de la figure 1 montrent qu'au-dessus d'un niveau de déformation critique  $\epsilon_c$ , le comportement mécanique polycristallin classique décrit par la loi de Hall-Petch n'est plus respecté faisant apparaître, pour des échantillons de taille de grains supérieure à une valeur critique  $d_c$ , un comportement dit multicristallin. Ce comportement se traduit par une baisse significative de la contrainte par rapport à celle attend par la loi de Hall-Petch et une sensibilité accrue à la taille de grains.

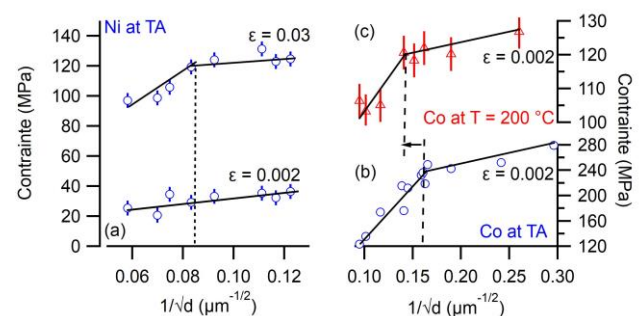


Figure 1. Loi de Hall-Petch à température ambiante pour le nickel à deux niveaux de déformation (a). Loi de Hall-Petch pour le cobalt pour une de déformation totale de 0,002 à température ambiante (b) et 200 °C (c).

La comparaison entre le nickel et le cobalt à température ambiante (respectivement (a) et (b)) semble montrer que le niveau de déformation critique à partir duquel apparaît la transition du comportement entre un polycristal et un multicristal semble dépendre du matériau :  $\epsilon_c = 0.03$  pour le Ni et 0.002 pour le Co. De plus, le nombre de grains dans l'épaisseur critique ( $t/d_c$ ) dépend lui aussi du matériau (4 pour le Ni [3] et 14 pour le Co [4]) mais semble également pouvoir être réduit par une augmentation de la température. En comparant le comportement du cobalt à température ambiante (Fig1.b) et à 200 °C (température à laquelle les proportions de phases initiales ne sont pas modifiées) (Fig1.c), la valeur de ( $t/d_c$ ) est réduite de 14 à 10. Des résultats similaires ont été obtenus sur le Ni et le Cu avec une sensibilité moins importante à mesure que l'énergie de faute d'empilement augmente [5].

Les énergies de faute d'empilement à température ambiante pour les matériaux d'études sont rappelées dans le tableau 1. La diminution de ces énergies de faute d'empilement avec la température dans la gamme d'étude est prise en compte dans la figure 2.

Tableau 1. Energie de faute d'empilement à température ambiante pour les 4 matériaux d'étude.

Matériau	Energie de faute d'empilement (mJ.m <sup>-2</sup> ) à TA
Cobalt	31
Ni <sub>20</sub> Cr	42
Cu	45
Ni	125

La figure 2 montre une synthèse des résultats de cette étude, notamment des deux paramètres critiques ( $(t/d)_c$  et  $\epsilon_c$ ) définissant la transition polycristal-multicristal. Cette figure montre clairement une plus forte sensibilité du matériau à la miniaturisation dans le cas d'une énergie de faute d'empilement faible. Cela se traduit par un faible rapport  $t/d$  critique généralement considéré comme caractéristique d'un comportement polycristallin pour des applications industrielles.

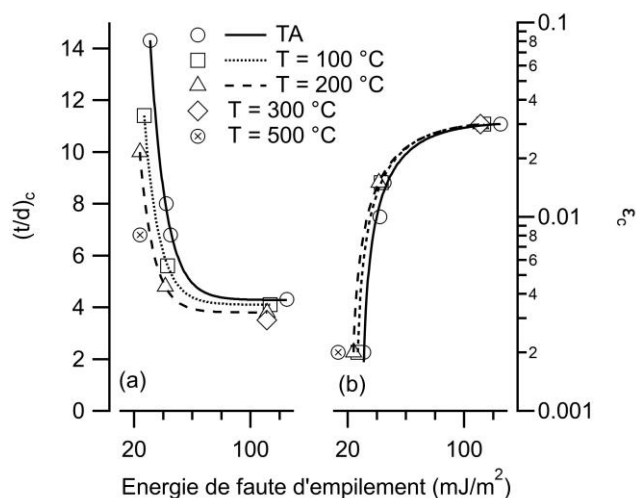


Figure 2. Influence de l'énergie de faute d'empilement sur le nombre de grains critique dans l'épaisseur (a) et sur le niveau de déformation critique (b).

De plus, cette transition apparaît très rapidement en déformation (en deçà de la limite d'élasticité). Ce niveau de déformation critique est plus important lorsque le matériau présente une énergie de faute d'empilement plus importante. Une augmentation de la température de sollicitation ne modifie pas le niveau de déformation critique mais permet d'accroître la plage de d'existence (en termes de tailles de grains) des domaines polycristallins. La sensibilité à la température du rapport ( $t/d$ )<sub>c</sub> semble être en lien direct avec l'évolution de l'énergie de faute d'empilement avec la température.

La possibilité de retarder le niveau de déformation auquel apparaît la modification du comportement mécanique a été montré dans des travaux antérieurs par une modification du trajet de chargement [6].

## Conclusions

La caractérisation mécanique d'éprouvettes de quatre métaux avec des microstructures de tailles variables a permis de mettre en évidence l'apparition d'un abatement des propriétés mécaniques dès lors que le nombre de grains dans l'épaisseur est inférieur à une valeur critique et pour un niveau de déformation lui-même supérieur à un niveau critique. Cette étude en lien direct avec des problématiques de miniaturisation a aussi permis d'investiguer l'apport de la température lors de la sollicitation mécanique. Des travaux complémentaires sur la genèse du comportement multicristallin ont été réalisés, et sur les solutions envisageables par des revêtements minces déposés par PVD pour son amélioration sont toujours en cours.

## Références

- [1] N. Iskounen, P.A. Dubos, J. Fajoui, M. Coret, M.-J. Moya, B. Girault, N. Barrier, N. Bruzy, E. Hug, D. Gloaguen, Experimental investigation of allotropic transformation of cobalt: influence of temperature cycle, mechanical loading and starting microstructure, *Metall. Mater. Trans. A.* (2021).
- [2] A.W. Thompson, M.I. Baskes, W.F. Flanagan, The dependence of polycrystal work hardening on grain size, *Acta Metall.* 21 (1973) 1017–1028.
- [3] C. Keller, E. Hug, Hall–Petch behaviour of Ni polycrystals with a few grains per thickness, *Mater. Lett.* 62 (2008) 1718–1720.
- [4] G. Fleurier, E. Hug, M. Martinez, P.-A. Dubos, C. Keller, Size effects and Hall–Petch relation in polycrystalline cobalt, *Philos. Mag. Lett.* 95 (2015) 122–130.
- [5] E. Hug, P.A. Dubos, C. Keller, L. Duchêne, A.M. Habraken, Size effects and temperature dependence on strain-hardening mechanisms in some face centered cubic materials, *Mech. Mater.* 91, Part 1 (2015) 136–151.
- [6] P.A. Dubos, G. Fleurier, E. Hug, An Experimental Investigation of the Size Effects in Forming Processes of High-Purity Thin Metallic Sheets, *Mater. Sci. Forum.* 879 (2017) 459–464.