

Stratégie d'étude de la baisse des températures de forgeage appliquée à un alliage de cuivre Cu-Ni-Si

J. Chalon^a, L. Dubar^b, J.D. Guérin^b, E.S. Puchi-Cabrera^{b,c,d}, A. Boukamel^a

a. FCS RAILENIUM, Espace Technopôle, Le Mont Houy, RD 958, 59300 Famars, France

b. Université Lille Nord de France, UVHC, LAMIH UMR CNRS 8201, F-59313 Valenciennes, France

c. School of Metallurgical Engineering and Materials Science, Faculty of Engineering, Universidad Central de Venezuela, Postal address 47885, Los Chaguaramos, Caracas 1040, Venezuela

d. Venezuelan National Academy for Engineering and Habitat, Palacio de las Academias, Postal Address 47885, Caracas 1040, Venezuela

Résumé :

La baisse des températures de forgeage représenterait une source d'économie d'énergie importante pour les industries. Cependant, une telle modification ne peut être sans conséquence sur la faisabilité d'un procédé. Cette communication présente la stratégie scientifique développée pour répondre à cette problématique appliquée à une pièce forgée en alliage Cu-Ni-Si.

La première phase de cette stratégie a consisté à caractériser le matériau et le procédé de forgeage effectifs. L'analyse fine de l'ensemble de ces résultats a démontré l'existence d'un fort couplage matériau-procédé. Pour aller vers l'optimisation du procédé, la connaissance des limites de formabilité du matériau sollicité dans les conditions de forgeage de la pièce est essentielle. Une boucle d'optimisation couplant un modèle numérique du procédé et une étude de formabilité permettrait d'identifier les températures minimales admissibles par le procédé.

Abstract :

The decrease of the forging temperature would represent a source of significant energy savings for the industries. However, such a modification has inevitably an impact on the process feasibility. This communication reports the scientific strategy developed to tackle this problem applied to a forged part in a copper alloy Cu-Ni-Si.

The first stage of this strategy involves the characterization of the effective material and forging process. A fine analysis of these results highlights a strong material-process coupling. Knowing the limits of workability of the material deformed under the conditions encountered in the forming process is necessary to optimize this process. An optimization loop linking a numerical model of the process and a workability study would identify the minimum temperatures allowed for this process.

Mots clefs : Cuivre, Cu-Ni-Si, Rhéologie, Forgeage, Formabilité

1 Introduction

Les raccords et connecteurs de caténaires ont un rôle important dans l'intégrité électrique et mécanique des systèmes caténaires. Dans un contexte de fiabilisation du réseau ferroviaire, l'amélioration des performances et des procédés de fabrication de ces pièces est recherchée, avec la volonté de réduire l'impact environnemental dû à leur fabrication. De par les propriétés mécaniques et électriques des alliages de cuivre qui les constituent, ces pièces sont pour la plupart mises en forme par forgeage à chaud et leur élaboration intègre plusieurs cycles thermiques. La baisse des températures de forgeage représenterait donc une source d'économie d'énergie importante.

Le comportement de ces alliages est fortement dépendant de la température de déformation. Il s'agit donc d'un paramètre crucial du procédé de mise en forme qui peut avoir des conséquences sur sa faisabilité. Cette communication présente la stratégie scientifique développée pour répondre à cette problématique de baisse de la température de mise en forme. Cette stratégie est appliquée à une pièce de référence, la griffe de jonction.

La première étape de cette stratégie consiste à établir un bilan de l'existant en caractérisant l'alliage Cu-Ni-Si et le procédé de mise en forme effectif. L'objectif est d'identifier qualitativement l'influence de la température sur ce procédé. Les conclusions de cette première étape permettront ensuite d'établir une stratégie d'étude vers l'optimisation des températures du procédé.

2 Étude de l'existant

La griffe de jonction est un connecteur de caténaire dont la fonction principale est de maintenir bout à bout deux fils de contact pour assurer une liaison à la fois mécanique et électrique de la caténaire. Cette pièce est utilisée pour le remplacement de sections de fils de contact lorsqu'une usure localisée est détectée. Elle est formée par matriçage à chaud de l'alliage de cuivre Cu-2Ni-Si.

2.1 Comportement du matériau

Comme une majorité d'alliages de cuivre à résistance mécanique élevée, l'alliage Cu-2Ni-Si fait partie de la famille des alliages faiblement alliés à durcissement structural par formation de précipités. Lorsque le matériau est maintenu à l'état sursaturé, un traitement thermique de revenu (dit revenu durcissant) déclenche la formation de précipités cohérents avec la matrice de cuivre. Ces derniers sont souvent identifiés comme étant la phase δ -(Ni₂Si) seule [1, 2, 3]. Leur présence freine le mouvement des dislocations, ce qui durcit le matériau. La libération des sites du solvant par les atomes de solutés suite à la formation des précipités restitue en partie la conductivité électrique du cuivre. Ainsi, le revenu durcissant confère à l'alliage Cu-2Ni-Si un bon compromis de propriétés en terme de tenue mécanique et de conductivité électrique [4]. Ce traitement thermique est une des dernières étapes du procédé de fabrication de la griffe de jonction. Il est donc primordial que les cycles thermiques associés aux différentes étapes du procédé soient optimisés pour garantir un état sursaturé de l'alliage à l'étape de revenu.

Lors d'une mise en forme à chaud, ces alliages en solution solide sursaturée peuvent être soumis à une précipitation dynamique si la température de déformation est inférieure à celle de la frontière du domaine de solubilité. Ce phénomène a été observé notamment dans des alliages de cuivre [5, 6, 7]. En comparaison avec une précipitation dite statique, déclenchée par un revenu durcissant, la cinétique d'une précipitation dynamique est plus rapide, car favorisée par le mouvement des dislocations [8].

Afin de caractériser le comportement de l'alliage Cu-2Ni-Si lors de sa mise en forme par matriçage à chaud, des essais de compression ont été réalisés. Les vitesses de déformation en matriçage sont de l'ordre de 10^{-2} à 10 s^{-1} [9], et on parle de déformation à chaud lorsque la température atteinte (T) est supérieure à la moitié de la température de fusion (T_m) du matériau ($T > 0.5 \cdot T_m$), ce qui correspond pour l'alliage Cu-2Ni-Si à une température d'environ 520 °C . Ainsi, les essais de compression ont été effectués sur la plage de température $600 - 900 \text{ °C}$ et pour trois vitesses de déformation $0.1, 1$ et 10 s^{-1} . Les résultats de cette campagne expérimentale ont été publiés [10] et une synthèse de leur analyse est présentée dans cette communication. Les essais ont confirmé le caractère thermoviscoplastique du matériau et ont mis en évidence des comportements distincts en fonction de la température :

- **Pour les températures inférieures à 800 °C** , une hausse importante de la limite d'élasticité a été reportée. Ce phénomène a été attribué à l'activation du mécanisme de précipitation dynamique. Le durcissement induit par cette précipitation permettrait également d'expliquer en partie la baisse de ductilité constatée pour ces échantillons qui présentent des fissures.
- **Pour les températures supérieures à 800 °C** , les mécanismes microstructuraux de restauration dynamique et de recristallisation dynamique discontinue ont été mis en évidence. Un modèle rhéologique à base physique a été développé pour tenir compte de ces mécanismes. La contrainte d'écoulement σ est représentée par la loi proposée par Sah et al. [11] et la dépendance à la température et à la vitesse de déformation des paramètres de contraintes σ est décrite par le modèle de Sellars-Tegart-Garofalo [12] en fonction du nombre de Zener-Hollomon. La loi d'Avrami couplée à la relation proposée par Jonas et al. [13] est utilisée pour exprimer la cinétique de recristallisation. La figure 1 représente les courbes de contrainte-déformation expérimentales et modélisées à 850 °C et 950 °C . La description obtenue par le modèle reproduit convenablement le comportement du matériau avec un faible intervalle d'erreur de $\pm 7 \text{ MPa}$.

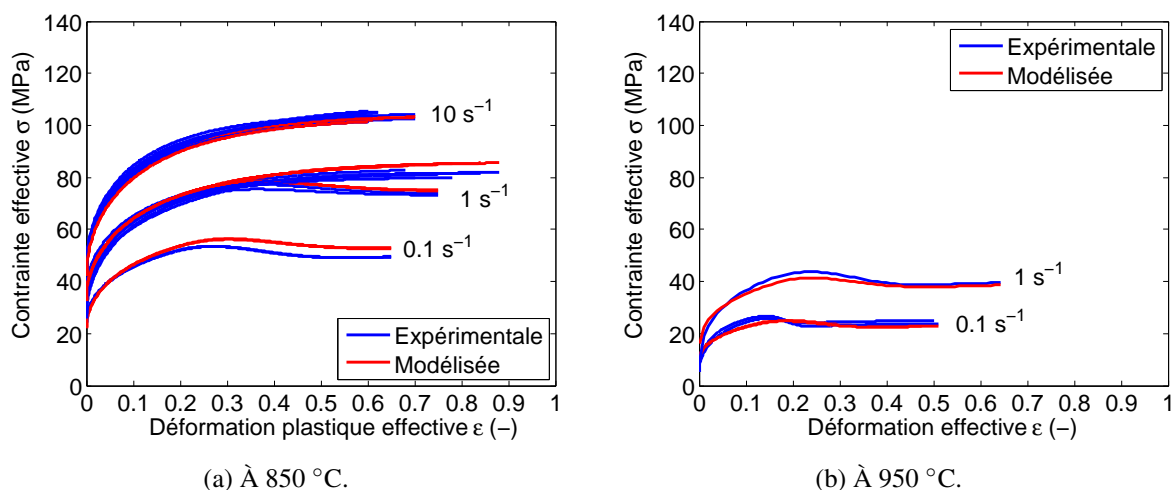


FIGURE 1 – Courbes contrainte-déformation expérimentales corrigées et prédites par le modèle rhéologique identifié.

Pour conclure, la mise en forme de l'alliage Cu-2Ni-Si à l'état sursaturé peut déclencher, en fonction de la température de déformation, différents mécanismes microstructuraux qui ont une influence directe sur le comportement du matériau. De plus, ils peuvent également impacter la formabilité du matériau et donc la faisabilité du procédé [14]. Si les mécanismes dynamiques mènent à l'affinement de la microstructure, la déformation du matériau devient plus homogène, ce qui améliore sa formabilité. Par contre sans l'action mutuelle de la recristallisation dynamique, la ductilité du matériau baisse entraînant une

baisse de formabilité.

2.2 Modélisation du procédé de mise en forme

Une connaissance précise du procédé de mise en forme est requise afin de développer un modèle numérique fidèle à la réalité. Ainsi, une campagne de mesures sur site industriel a été menée afin d'identifier les conditions thermiques, les efforts de matriçage et la cinétique de presse.

La modélisation du procédé de mise en forme de la griffe de jonction a été réalisée à l'aide du logiciel éléments finis FORGE® NxT 1.0. Elle se compose de trois éléments : un lopin et deux matrices. Le lopin est en alliage Cu-2Ni-Si dont le comportement rhéologique est décrit par le modèle sus-cité [10]. Les matrices sont modélisées par des surfaces rigides, et sont maillées par des éléments triangulaires selon une précision adaptée afin de reproduire le plus fidèlement possible la géométrie des matrices réelles. La cinétique de presse réelle est traduite numériquement en imposant un déplacement au cours du temps de la matrice supérieure.

Pour être valides, les résultats d'un modèle numérique ne doivent pas dépendre de la taille de maille choisie. Une étude de sensibilité au maillage a donc été menée afin de définir un compromis optimal en matière de finesse de maillage et de temps de calcul.

Les paramètres d'échanges thermiques ont été identifiés par le biais de mesures sur site et en laboratoire. Le frottement entre le lopin et les matrices est établi par le modèle de Bay et al. [15]. Sans donnée expérimentale, la valeur du coefficient de frottement est fixé à $f = 0.4$ en première approximation et une étude de sensibilité du procédé à ce paramètre a été menée. Sur la figure 2, on constate que le frottement influe fortement sur l'écoulement de la matière. Les cartes d'isovaleurs de la distance de contact matrices-lopin indiquent l'apparition de défauts de remplissage au niveau des dents de serrage de la pièce lorsque le frottement augmente. On remarque également que le volume de matière contenu dans les bavures au coin de la pièce diminue avec l'augmentation du frottement.

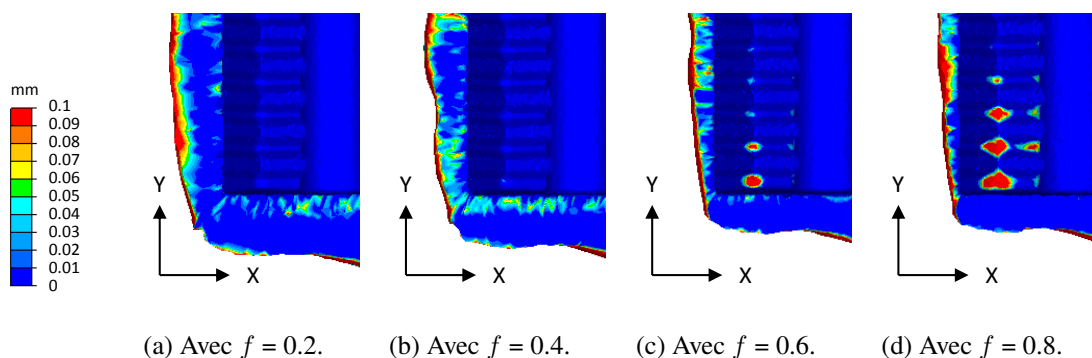


FIGURE 2 – Influence du coefficient de frottement f sur le remplissage des matrices et sur la longueur de bavure, isovaleurs de la distance de contact avec les matrices.

Cette modélisation numérique est validée par comparaisons géométriques entre des pièces finales réelles et numériques, et par comparaison des courbes expérimentales et numériques de l'évolution de l'effort de matriçage au cours du temps. Elle est considérée comme fiable car de bonnes corrélations sont obtenues pour ces comparaisons.

Afin d'identifier les zones susceptibles de se fissurer durant la mise en forme de la griffe de jonction, le critère normalisé de Cockcroft et Latham est utilisé. Il s'exprime en fonction de la contrainte équivalente

de von Mises σ_{eq} , de la première contrainte principale σ_I et de la déformation équivalente ε_{eq} tel que :

$$C = \int_0^{\varepsilon_{eq}} \frac{\sigma_I}{\sigma_{eq}} d\varepsilon \quad (1)$$

D'après Martins et al. [16], ce critère est adapté à l'étude de la mise en forme de pièces massives. Cependant, sans connaissance de la déformation équivalente critique à rupture qui est propre au matériau et aux conditions thermomécaniques imposées, ce critère n'a qu'une valeur qualitative et ne peut pas prédire la fissuration.

Le critère indique que la zone la plus sensible de la pièce est la face intérieure des dents de serrage comme le montre la figure 3. Par conséquent, en cas de baisse de la formabilité du matériau, cette zone serait le premier lieu de fissuration.

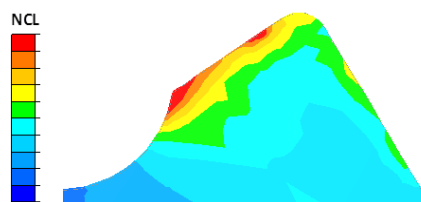


FIGURE 3 – Carte d'isovaleurs du critère normalisé de Cockcroft et Latham, zoomée sur une coupe dans une dent de serrage de la griffe de jonction.

3 Vers l'optimisation du procédé

Les conclusions de l'étude de l'existant permettent d'identifier plusieurs observables relatifs aux procédés étudiés. Comparés aux observables dits de référence car témoins des propriétés de l'existant, ils indiquent l'influence d'une modification affligée au procédé. Ils sont au nombre de trois pour le matriçage de la griffe de jonction :

- les propriétés électriques et mécaniques de la pièce finalisée ;
- la précision géométrique de la pièce matriçée (défauts de remplissage, taille des bavures) ;
- l'absence de fissures dans les dents de serrage.

Comme toute transition de phase, l'exsolution des éléments d'addition de l'alliage est contrôlée par la température qui doit être inférieure à la frontière du domaine de solubilité, mais aussi par le temps de maintien de cette température. Or, les temps de chauffe et de matriçage sont relativement courts (de l'ordre de la minute). Une étude complémentaire avec mesures expérimentales serait donc nécessaire pour évaluer les risques d'exsolution liés à l'étape du matriçage et leurs conséquences sur les propriétés électriques et mécaniques de la pièce finalisée. En première hypothèse ce risque est exclu.

D'après le modèle numérique développé, la précision géométrique de la pièce dépend essentiellement de la tribologie et donc indirectement de la température, du comportement du matériau et de la vitesse de glissement à l'interface pièce-outil [19]. La dernière observable, l'absence de fissures dans la pièce matriçée, dépend uniquement des limites de formabilité du matériau. Ces dernières sont fonction des paramètres du procédé qui définissent les sollicitations du matériau tels que la température, la lubrification, la vitesse, la déformation ou encore le chemin de déformation [20]. Ainsi, des leviers métallurgiques pour aller vers l'optimisation du procédé de la griffe de jonction sont identifiables à partir des observations de l'étude de l'existant :

- la lubrification ;
- la cinétique de presse : le comportement de l'alliage Cu-2Ni-Si étant thermo-viscoplastique, la vitesse de déplacement du coulisseau de la presse a une influence sur la réponse du matériau et plus particulièrement sur sa contrainte d'écoulement ;
- l'activation des mécanismes de réorganisation de la microstructure : les mécanismes de restauration et de recristallisation permettent un adoucissement du matériau. De plus, lorsqu'ils mènent à un affinement de la taille des grains du matériau, ils améliorent sa formabilité ;
- l'état microstructural initial : cet état conditionne le déclenchement des mécanismes microstructuraux de restauration, de recristallisation et de précipitation. Une optimisation de la composition du matériau (éléments d'addition ou impuretés) ou de la taille de grains initiale pourrait améliorer la formabilité [17, 18] ;

Pour conclure, l'étude de la baisse des températures de matriçage nécessite l'optimisation du procédé dans sa globalité en s'appuyant sur les leviers métallurgique sus-cités. La pertinence de la modification proposée est alors évaluée à l'aide des observables, il s'en suit une boucle d'optimisation schématisée en figure 4. Néanmoins, cette dernière n'est réalisable qu'à condition de pouvoir caractériser le frottement et la formabilité du matériau dans les conditions représentatives du procédé. Pour répondre à ce type de besoin, le banc tribologique WHUST [19] pourrait être utilisé et un banc de formabilité est en cours de développement.

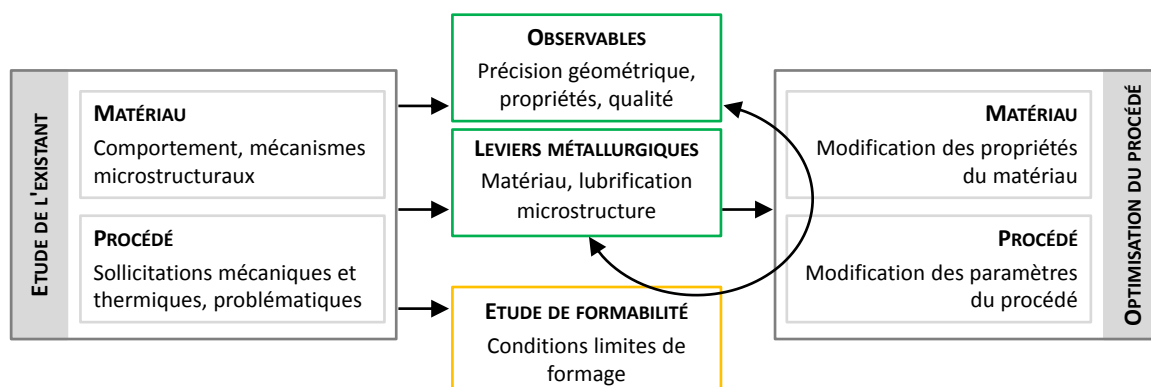


FIGURE 4 – Stratégie d'étude employée.

4 Conclusion

Une stratégie d'étude pour l'optimisation d'un paramètre de procédé de mise en forme a été développée. Elle repose sur deux étapes. La première étape consiste à étudier l'existant pour en déduire des observables et des leviers métallurgiques. La seconde étape est une boucle d'optimisation du couple matériau-procédé. Elle s'appuie sur les résultats de la première étape et nécessite l'identification du coefficient de frottement et des limites de formabilité du matériau dans les conditions représentatives du procédé optimisé.

Références

- [1] S.A. Lockyer et F.W. Noble, Precipitate structure in a Cu-Ni-Si alloy, Journal of materials science, (1994) 218–226.

- [2] E. Donoso, R. Espinoza, M.J. Diáñez et J.M. Criado, Microcalorimetric study of the annealing hardening mechanism of a Cu-2.8Ni-1.4Si (at%) alloy, *Materials Science & Engineering : A*, 556 (2012) 612–616.
- [3] X.P. Xiao, Z.Y. Yi, T.T. Chen, R.Q. Liu et H. Wang, Suppressing spinodal decomposition by adding Co into Cu-Ni-Si alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 660 (2016) 178–183.
- [4] Y. Ye, X. Yang, J. Wang, X. Zhang, Z. Zhang et T. Sakai, Enhanced strength and electrical conductivity of Cu-Zr-B alloy by double deformation aging process, *Journal of Alloys and Compounds*, 615 (2014) 249–254.
- [5] H. Zhang, H.G. Zhang et D.S Peng, Hot deformation behavior of KFC copper alloy during compression at elevated temperatures, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16 (2006) 562–566.
- [6] L. Blaz, E. Evangelista et M. Niewczas, Precipitation Effects during Hot Deformation of a Copper Alloy, *Metallurgical and materials transactions*, 25A (1994) 257–266.
- [7] M. Niewczas, E. Evangelista et L. Blaz, Strain localization during a hot compression test of Cu-Ni-Cr-Si-Mg alloy, *Scripta Metallurgica et Materialia*, 27 (1992) 1735–1740.
- [8] A. Deschamps, F. Bley, F. Livet, D. Fabregue et L. David, In-situ small-angle X-ray scattering study of dynamic precipitation in an Al-Zn-Mg-Cu alloy, *Philosophical Magazine*, 83 (2003) 677–692.
- [9] F. Montheillet, *Métallurgie en mise en forme*, Techniques de l'ingénieur, M600 V2 (1996).
- [10] J. Chalon, J.D. Guérin, L. Dubar, A. Dubois et E.S. Puchi-Cabrera, Characterization of the hot-working behavior of a Cu-Ni-Si alloy, *Materials Science and Engineering : A*, 667 (2016) 77–86.
- [11] J.P. Sah, G.J. Richardson et C.M. Sellars, Grain-Size Effects during Dynamic Recrystallization of Nickel, *Metal Science*, 8 (1974) 325–331.
- [12] C.M Sellars et W.J. McTegart, On the mechanism of hot deformation, *Acta Metallurgica*, 14 (1966) 1136–1138.
- [13] J.J. Jonas, X. Quelenec, L. Jiang et E. Martin, The Avrami kinetics of dynamic recrystallization, *Acta Materialia*, 57 (2009) 2748–2756.
- [14] G.E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, New-York, 1976.
- [15] N. Bay et T. Wanheim, Contact Phenomena under Bulk Plastic Deformation Conditions, *Advanced Technology of Plasticity*, 4 (1990) 1677–1688.
- [16] P.A.F. Martins, N. Bay, A.E. Tekkaya et A.G. Atkins, Characterization of fracture loci in metal forming, *International Journal of Mechanical Sciences*, 83 (2014) 112–123.
- [17] F.J. Humphreys et M. Hatherly, *Recrystallization and Related Annealing Phenomena* (Second Edition), Elsevier Science, 2004.
- [18] T. Sakai, A. Belyakov, R. Kaibyshev, H. Miura et J.J. Jonas, Dynamic and post-dynamic recrystallization under hot, cold and severe plastic deformation conditions, *Progress in Materials Science*, 60 (2014) 130–207.
- [19] J. Brocaïl, M. Watremez et L. Dubar, Identification of a friction model for modelling of orthogonal cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50 (2010) 807 – 814
- [20] ASM Handbook Committee, *Metals Handbook : Forming and forging*, American Society for Metals, 14 (1996)