

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Corrélations entre les propriétés ultrasonores et d'emboutissabilité pour des échantillons de laiton Cu/Zn 90/10 et 70/30 Dubois, Marc; Bussière, Jean F.

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

<https://doi.org/10.4224/40002682>

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :
<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=9af14bc7-b22f-4135-9963-3061d1eb5b82>
<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=9af14bc7-b22f-4135-9963-3061d1eb5b82>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at
<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site
<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at
PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.



Conseil national
de recherches Canada

National Research
Council Canada

Institut des matériaux industriels

Industrial Materials Institute

75, boulevard de Mortagne
Boucherville, Québec
J4B 6Y4

75 de Mortagne Boulevard
Boucherville, Québec
J4B 6Y4

CMRC-NRC

Rapport technique

Corrélations entre les propriétés ultrasonores et d'emboutissabilité pour des échantillons de laiton Cu/Zn 90/10 et 70/30

Marc Dubois et Jean F. Bussière

Décembre 1996

Canada

INTRODUCTION

L'Institut des Matériaux Industriels (IMI) a développé au fil des années une expertise dans le domaine de l'évaluation non-destructive des propriétés mécaniques des métaux. La technique utilisée est basée sur les propriétés ultrasonores des métaux. Les ultrasons sont générés par un laser et détectés par un système interférométrique-laser. Cette technologie est particulièrement propice aux conditions industrielles car elle permet d'effectuer une mesure en quelques fractions de seconde, permet de balayer aisément un échantillon afin d'en tester l'uniformité et ne nécessite pas de préparation préalable de l'échantillon [1].

Six échantillons de laiton 90%Cu - 10%Zn et 4 échantillons de laiton 70%Cu - 30%Zn ont été envoyés à l'IMI par la compagnie LES TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES SNC INC. Les propriétés d'emboutissabilité de ces échantillons ont été mesurées par le CENTRE DE MÉTALLURGIE DU QUÉBEC sur une série d'échantillons provenant des mêmes lots que ceux reçus à l'IMI. Les propriétés ultrasonores de ces échantillons ont été évaluées à l'IMI à l'aide de la technique laser-ultrason et de techniques conventionnelles faisant appel aux transducteurs piézoélectriques. Les résultats obtenus ont été comparés aux propriétés mécaniques. Ce rapport présente les corrélations observées entre différents paramètres ultrasonores et certaines propriétés mécaniques.

DESCRIPTION DES ÉCHANTILLONS

Le tableau suivant décrit les dix échantillons de laiton reçus à l'IMI.

Tableau 1 Descriptions des échantillons de laiton reçus à l'IMI

No. MAPICS	Proportion CU/ZN	Épaisseur (mm)	Taille des grains (μm)
106618	70/30	3.585	26
106726	70/30	3.611	26
106729	70/30	3.620	19
106731	70/30	3.596	40
101888	90/10	1.092	16
106331	90/10	0.900	18
106646	90/10	1.007	17
106647	90/10	1.000	15
106706	90/10	0.894	16
106709	90/10	0.903	17

Le Tableau 2 présente un résumé des mesures effectuées par le CENTRE DE MÉTALLURGIE DU QUÉBEC. Dans ce tableau, et subséquemment dans ce rapport, seules les valeurs moyennes de n et r sont utilisées. Pour plus de détails, consulter le rapport du CENTRE DE MÉTALLURGIE DU QUÉBEC [2].

Tableau 2 Propriétés d'emboutissabilité des échantillons de laiton reçus à l'IMI

No. MAPICS	Exposant d'écroutissage moyen (n)	Rapport des allongements (r moyen)	Anisotropie dans le plan (Δr)	Hauteur coupelle de Olsen (pouce)
101888	0.33	0.990	-0.040	•
106726	0.36	0.890	-0.030	•
106729	0.35	0.910	-0.110	•
106618	0.38	0.880	-0.060	•
106731	0.34	0.980	0.050	0.492
106331	0.32	1.020	-0.004	0.476
106646	0.31	0.930	0.040	0.505
106647	0.34	0.960	0.100	0.514
106706	0.33	1.040	0.003	0.503
106709	0.34	1.000	0.010	0.497

MESURES EXPÉRIMENTALES

Deux séries de mesures ultrasonores ont été effectuées à l'IMI. La première série consiste en des mesures de vitesses ultrasonores selon différentes directions à l'aide de transducteurs piézoélectriques de contact. Un échantillon octogonal, d'une longueur de 25.4 mm, d'une épaisseur égale à l'épaisseur de la feuille de laiton dont il provient et ayant un de ses cotés parallèle à la direction de laminage, a été découpé de chacune des différentes feuilles de laiton. La forme de cet échantillon facilite la mesure des vitesses des ondes transversales polarisées parallèlement au plan des feuilles de laiton dans 3 directions: 0° , 45° et 90° relativement à la direction de laminage; et permet de mesurer les vitesses longitudinale et transversales dans la direction normale au plan des feuilles de laiton. Les fréquences de résonance des transducteurs utilisés sont: 20 MHz pour la mesure de la vitesse longitudinale, 10 MHz pour la mesure des vitesses transversales au travers de l'épaisseur et 5 MHz pour la mesure des vitesses des ondes transversales polarisées parallèlement au plan des feuilles de laiton.

Les valeurs de ces différentes vitesses ultrasonores permettent de calculer les coefficients d'orientation cristallographique (COC) W_{400} , W_{420} et W_{440} . La plupart des matériaux métalliques sont des agrégats de monocristaux, généralement appelés grains, ayant chacun sa propre orientation

cristallographique. Si les orientations des grains sont totalement aléatoires, et si le nombre de grains est élevé, le matériau peut être considéré comme isotrope à l'échelle macroscopique et les COC sont nuls. Toutefois, les procédés de mise en forme des métaux entraînent presque toujours une orientation cristallographique préférentielle des grains (texture) ce qui crée une anisotropie macroscopique du matériau.

Roe [3] a proposé en 1965 d'exprimer l'anisotropie d'un matériau à l'aide d'une fonction de distribution d'orientations cristallographiques décrivant la probabilité ($w(\psi, \theta, \phi)$) de trouver un grain dans une orientation donnée, orientation spécifiée par les angles d'Euler ψ , θ et ϕ . Cette fonction est exprimée à l'aide d'une expansion en série et prend la forme suivante:

$$w(\psi, \theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l W_{lmn} Z_{lmn}(\cos\theta) e^{-im\psi} e^{-in\phi},$$

où $Z_{lmn}(\cos \theta)$ est une généralisation de la fonction de Legendre associée et où les W_{lmn} sont les coefficients de l'expansion, précédemment nommés COC. Les propriétés ultrasonores des matériaux dépendent seulement des COC ayant $l \leq 4$ et dans le cas d'un matériau cubique comme le laiton, seuls W_{400} , W_{420} et W_{440} sont non-nuls [4]. La mesure des COC grâce aux ultrasons permet donc d'obtenir une information sur l'orientation cristallographique des grains à laquelle sont sensibles les propriétés d'emboutissabilité. Par exemple, les COC permettent de calculer un module de Young moyen qui est directement relié au rapport moyen des allongements plastiques, r moyen, et la valeur de W_{440} est une indication de l'anisotropie plastique dans le plan, Δr .

La seconde série de mesures consiste en l'évaluation de l'atténuation ultrasonore à l'aide du système laser-ultrason. Une face de l'échantillon est soumise à une impulsion laser ultraviolet d'une durée de 6 ns et d'une énergie de 200 mJ. Cette impulsion laser vaporise une mince couche d'huile sur une surface de 1 cm². L'effet de recul causé par la projection de l'huile génère les ondes ultrasonores dans l'échantillon. En laboratoire, l'utilisation d'une couche d'huile est nécessaire afin de protéger la surface de l'échantillon contre la répétition de la mesure au même endroit. En milieu industriel, les ultrasons sont générés par la vaporisation d'une couche de résidus formés d'oxyde, de graisse et de poussière. Le mouvement continu des feuilles de métal évite les dommages à la surface occasionnés par la répétition de la mesure au même endroit. Un système interférométrique utilisant un laser infra-rouge détecte les ultrasons sur la face opposée à la génération.

L'atténuation ultrasonore est évaluée en effectuant le rapport des spectres de fréquences du second et du premier écho. Pour la plupart des métaux, l'atténuation ultrasonore est principalement causée par la diffusion des ondes ultrasonores par les grains. Le niveau de diffusion est relié à la fréquence ultrasonore et à la taille des grains. Il est donc possible d'utiliser l'atténuation ultrasonore en fonction de fréquence afin d'évaluer la taille des grains rapidement et non-destructivement [5]. Un modèle de diffusion ultrasonore développé à l'IMI a permis de calculer une taille de grain à partir de l'atténuation ultrasonore en fonction de la fréquence pour chacun des échantillons de laiton.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tous les paramètres ultrasonores mesurés sur les feuilles de laiton ont été comparés individuellement aux propriétés d'emboutissabilité à l'aide de régressions linéaires, en utilisant tout d'abord des relations reconnues entre les propriétés ultrasonores et d'emboutissabilité. Toutes les corrélations présentées dans ce rapport sont significatives à plus de 95% en se basant sur l'analyse des variances.

Les calculs effectués nécessitent les constantes élastiques des monocristaux de même que la masse volumique des laitons. Les constantes élastiques des monocristaux ont été interpolées à partir de valeurs extraites de la référence [6] et les masses volumiques proviennent de la référence [7]. Les valeurs utilisées sont données au Tableau 3.

Tableau 3 Constantes élastiques et masses volumiques des laitons 90-10 et 70-30.

Laiton (%Cu - %Zn)	C ₁₁ (GPa)	C ₁₂ (GPa)	C ₄₄ (GPa)	Masse volumique (g/cm ³)
90-10	157.3	114.3	73.11	8.80
70-30	136.7	101.9	69.36	8.53

Taille des grains

La taille des grains calculée à partir de l'atténuation ultrasonore ne correspond pas exactement à une taille de grains métallographique (interception linéaire moyenne, diamètre équivalent ou autre) mais l'ordre de grandeur doit être le même et il doit exister une corrélation entre la taille des grains ultrasonore et celle métallographique. La Figure 1 présente la taille des grains mesurée par métallographie en fonction de la taille des grains estimée à l'aide de l'atténuation. L'erreur sur la taille des grains ultrasonore est basée sur la reproductibilité de mesures précédemment effectuées à l'IMI ($\pm 5\%$). L'erreur sur les tailles des grains mesurées par métallographie n'est pas indiquée dans le rapport du CENTRE DE MÉTALLURGIE DU QUÉBEC.

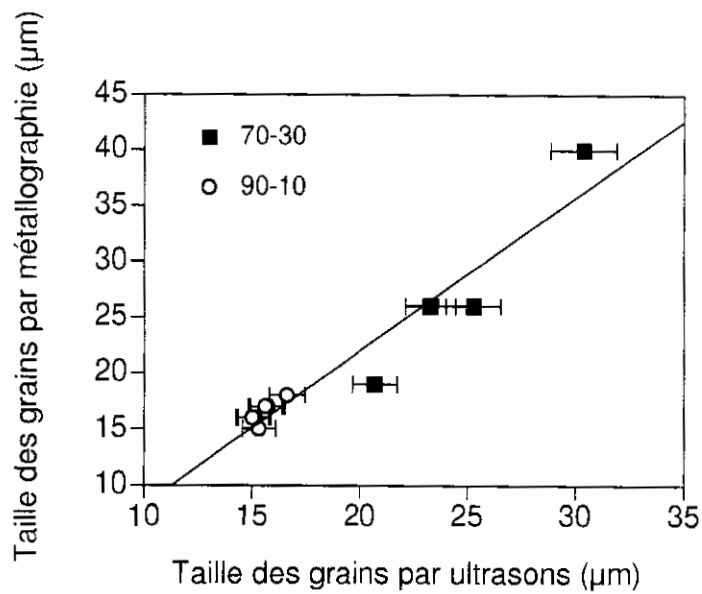


Figure 1 Corrélation entre la taille des grains mesurée par métallographie et la taille des grains estimée à l'aide de l'atténuation ultrasonore. Le résiduel de la régression linéaire sur la taille des grains mesurée par métallographie est de 2 µm.

La pente de la régression linéaire de la Figure 1 est de 1.4 et son ordonnée à l'origine est égale à -5 µm. Malgré le relativement faible nombre d'échantillons, on peut conclure que les tailles de grains estimées par ultrasons sont en bon accord avec les tailles de grains mesurées par métallurgie. Les propriétés mécaniques dépendant de la taille des grains devraient donc pouvoir être estimées à l'aide de la taille des grains ultrasonore.

Coefficient d'écroutissage (n)

Plusieurs auteurs [8,9] considèrent que l'exposant d'écroutissage n doit augmenter avec la taille des grains. La Figure 2 présente donc le n moyen en fonction de la taille des grains estimées à l'aide de l'atténuation ultrasonore.

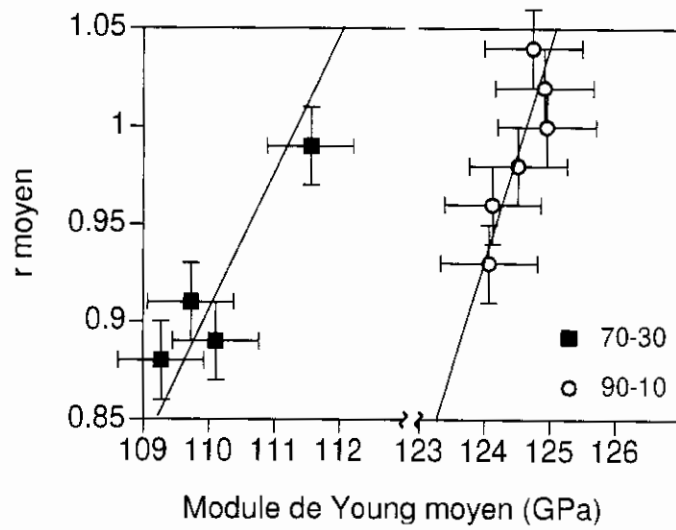


Figure 3 Corrélations entre le r moyen et le module de Young estimé à partir des vitesses ultrasonores. Le résiduel sur le r moyen est de 0.02 pour les deux régressions.

Le r moyen est donc relié au module de Young moyen pour le laiton de façon équivalente à ce qui a déjà été observé pour les aciers [10]. Toutefois, la Figure 3 montre clairement que les régressions linéaires entre le r moyen et le module de Young diffèrent selon le type de laiton. Lors d'une mesure ultrasonore du r moyen, le type de laiton devrait donc être connu.

Anisotropie dans le plan (Δr)

Le coefficient d'orientation cristallographique W_{440} possède une symétrie [11] qui s'apparente à celle du coefficient d'anisotropie dans le plan Δr . On s'attend donc à ce que W_{440} corrèle avec Δr . Les valeurs de Δr sont tracés à la Figure 4 en fonction des W_{440} calculé à partir des vitesses des ondes transversales polarisées parallèlement au plan des feuilles de laiton. La barre d'erreur sur Δr est la même que celle calculée précédemment pour le r moyen. La barre d'erreur sur W_{440} ($\pm 0.02 \times 10^{-3}$) a été calculée à partir de l'erreur sur les vitesses ultrasonores causée par la mesure d'épaisseur (0.1%).

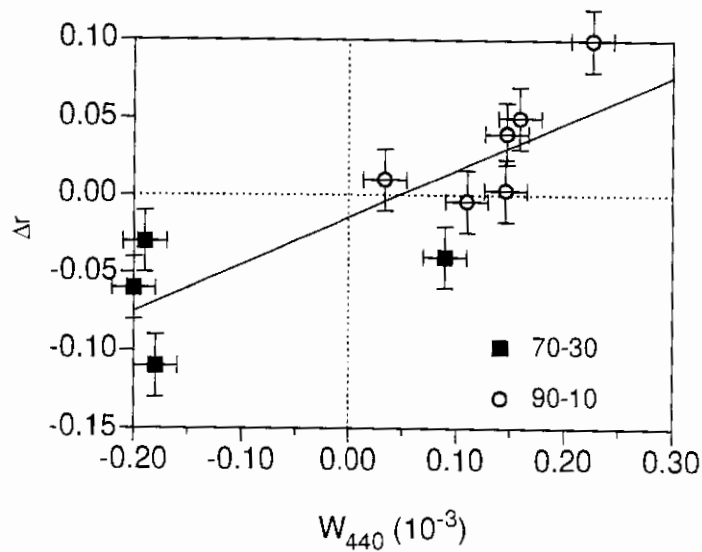


Figure 4 Corrélation entre Δr et le W_{440} calculé à partir des vitesses ultrasonores. Le résiduel de la régression linéaire sur Δr est de 0.04.

La Figure 4 montre la relation linéaire observée entre Δr et W_{440} . La régression linéaire calculée passe près de l'origine ce qui est en accord avec le fait que pour $\Delta r = 0$, on s'attend à ce que $W_{440} = 0$. Bien que la présence d'une corrélation entre W_{440} et Δr soit assurée à plus de 95%, un nombre plus important d'échantillons, une plus grande variabilité parmi ceux-ci et une analyse plus poussée des barres d'erreur sur la mesure de Δr permettraient d'établir avec plus de confiance la relation entre W_{440} et Δr .

Coupelle de Olsen

La littérature indique que la hauteur de la coupelle de Olsen est équivalente à une combinaison linéaire du r moyen et de l'élongation totale moyenne [12]. Toutefois, aucune corrélation significative en ce sens n'a été observée, autant avec les r moyen et n moyen (qui est relié à l'élongation totale) mesurés mécaniquement par le CENTRE DE MÉTALLURGIE DU QUÉBEC, qu'avec le module de Young et la taille des grains calculés à partir des paramètres ultrasonores. Une corrélation entre un quelconque paramètre ultrasonore et la hauteur de la coupelle de Olsen a donc été recherchée empiriquement. Une corrélation significative à plus de 99% a été trouvée entre la hauteur de la coupelle Olsen et la vitesse de l'onde longitudinale se propageant normalement au plan de la plaque (voir Figure 5). Les barres d'erreur pour la hauteur de la coupelle Olsen sont celles données par le CENTRE DE MÉTALLURGIE DU QUÉBEC, et celles pour la vitesses proviennent de l'erreur sur la mesure d'épaisseur soit $\pm 0.1\%$.

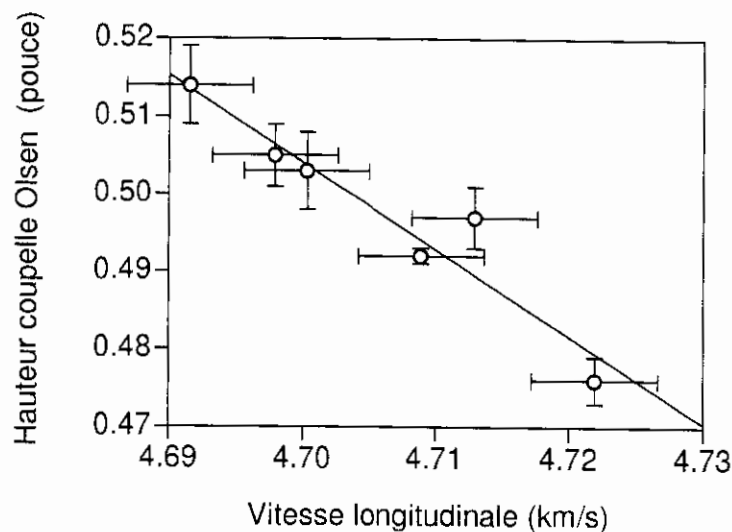


Figure 5 Corrélation entre la hauteur de la coupelle Olsen et la vitesse longitudinale au travers de l'épaisseur des feuilles de laiton 90-10. Le résiduel de la régression linéaire sur la hauteur de la coupelle Olsen est de 0.004 pouce.

La corrélation observée à la Figure 5 ne s'explique pas pour le moment. Le nombre particulièrement limité d'échantillons (le test de la coupelle de Olsen n'a pas été fait sur les échantillons de laiton 70/30) amène à considérer ce résultat avec prudence. Une analyse plus complète en utilisant un plus grand nombre d'échantillons serait nécessaire afin d'établir avec certitude la relation entre la vitesse longitudinale au travers de l'épaisseur et la hauteur de la coupelle Olsen.

CONCLUSION

En se basant sur les résultats présentés dans ce rapport, les paramètres extraits des signaux ultrasonores permettraient d'évaluer la taille des grains, le coefficient d'écroutissage moyen (n moyen), le rapport moyen des élongations plastiques (r moyen), le coefficient d'anisotropie dans le plan (Δr) et la hauteur de la coupelle Olsen. Dans le cas de la taille des grains, du n moyen, du r moyen et du Δr , bien que le nombre d'échantillons soit relativement faible, les corrélations obtenues reposent sur des fondements reconnus. Il est donc à-peu-près certain de pouvoir évaluer ces propriétés à l'aide des ultrasons. Des mesures dans un plus grand nombre d'échantillons permettraient d'établir les courbes d'étalonnage avec un plus grand degré de confiance.

Dans le cas du test de la coupelle de Olsen, une analyse plus poussée est nécessaire avant de pouvoir tirer une conclusion. Toutefois, la corrélation présentée à la Figure 5 laisse fortement soupçonner la présence d'un lien entre la vitesse longitudinale au travers de l'épaisseur et la hauteur de la coupelle. Ce lien mériterait certainement d'être exploré plus à fond.

Les résultats présentés dans ce rapport de même que l'état actuel de la technique laser-ultrason à l'IMI permettent d'affirmer qu'un système laser-ultrason pourrait mesurer la taille des grains, le n

moyen et le r moyen en ligne et en milieu industriel dans des plaques de laiton. La mesure de W_{440} nécessiterait certains ajustements techniques mais est également possible. La mesure de ces propriétés avec un système laser-ultrason est non-destructive, ne nécessite que quelques fractions de secondes et permet de tester l'uniformité de l'échantillon en balayant sa surface. L'évaluation en usine de la vitesse longitudinale de façon à estimer la hauteur de la coupelle de Olsen est facilement réalisable avec un système ultrasonore (laser ou piézoélectrique) mais demande une analyse exploratoire plus poussée.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier messieurs Martin Lord et Harold Hébert pour les mesures expérimentales, de même que monsieur Daniel Lévesque pour les calculs des tailles de grains à partir de l'atténuation ultrasonore.

RÉFÉRENCES

- [1] Jean-Pierre Monchalin, "Progress Towards the Application of Laser-Ultrasonics in Industry", dans *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation vol. 12*, (Edité par D.O. Thompson et D.E. Chimenti, Plenum Press, New-York, 1993) 495-506.
- [2] Patricio Yanez, "Évaluation de l'emboutissabilité des laitons 90-10 et 70-30", Centre de Métallurgie du Québec, no. de dossier 730-51-836, octobre 1996.
- [3] R.-J. Roe, "Description of Crystallite Orientation in Polycrystalline Materials. III. General Solution to Pole Figure Inversion", *J. Appl. Phys.*, **36** (6) 2024-2031 (1965).
- [4] C. M. Sayers, "Ultrasonic Velocities in Anisotropic Polycrystalline Aggregates", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **15** 2157-2167 (1982).
- [5] D. Nicoletti, D. Kasper, "Ultrasonic Attenuation Based on the Roney Generalized Theory and Multiple Power-Law Grain-Size Distributions", *IEEE Trans. Ultr. Ferroelectrics Freq. Contr.*, **41** (1) 144-149 (1994).
- [6] G. Simmons, H. Wang, *Single Crystal Elastic Constants and Calculated Aggregate Properties: A Handbook*. (M.I.T. Press, Cambridge, 1971).
- [7] -----, "Properties of Wrought Coppers and Copper Alloys", dans *ASM Handbook 10th edition, vol. 2: NonFerrous Alloys and Special Purpose Materials*. (ASM, U.S.A., 1990).
- [8] Y. Tomota, M. Umemoto, N. Komtsubara, A. Hiramatsu, N. Nakajima, A. Moriya, T. Watanabe, S. Nanba, G. Anan, K. Kunishige et M. Miyahara, "Predictions of Mechanical

Properties of Multi-Phase Steels Based on Stress-Strain Curves”, *ISIJ International*, **32** (3), 343-349 (1992).

- [9] F. B. Pickering, *Physical Metallurgy and the Design of Steels*, (Applied Sciences Publishers Ltd, London, 1978) p.48.
- [10] K. Kawashima, “Nondestructive Characterization of Texture and Plastic Strain Ratio of Metal Sheets with Electromagnetic Acoustic Transducers”, *J. Acoust. Soc. Am.*, **87** (2) 681-690 (1990).
- [11] A. Moreau, P.J. Kielczynski, J. F. Bussière et J. H Root, “Ultrasonic Characterization of Texture in Pure and Alloyed Zirconium”, dans *Nondestructive Characterization of Materials VI*, (Edited by R.E. Green et al., Plenum Press, New-York, 1994), 119-127.
- [12] Brian Taylor, “Sheet Formability Testing”, dans *ASM Handbook 9th edition, vol. 8: Mechanical Testing*, (ASM, U.S.A., 1985) p. 565.