



HAL
open science

Caractérisation de la taille des grains par ultrasons

Ali Bouda Badidi, Ahmed Mebtouche, Sonia Djili, Wahiba Djerir

► **To cite this version:**

Ali Bouda Badidi, Ahmed Mebtouche, Sonia Djili, Wahiba Djerir. Caractérisation de la taille des grains par ultrasons. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00550551

HAL Id: hal-00550551

<https://hal.science/hal-00550551v1>

Submitted on 28 Dec 2010

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.

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Caractérisation de la taille des grains par ultrasons

Ali Badidi bouda, Ahmed Mebtouche, Sonia Djili, Wahiba Djerir

Laboratoire de Caractérisation et d'Instrumentation, Centre de Soudage et de Contrôle, Route de Dély Brahim, B.P64 Chéraga (Algiers) ALGERIA,
alibadidi@yahoo.fr

Un traitement thermique ou mécanique d'un matériau permet de modifier, entre autres, la taille moyenne des grains. Cette dernière dépend de la température, du temps de maintien et du mode de refroidissement ou de la contrainte de laminage. La taille moyenne des grains, outre son influence sur les vitesses de propagation et coefficient d'atténuation des ondes ultrasonores, affecte aussi la fréquence de l'onde à travers le matériau. La grosseur des grains est un indicateur de l'état de fatigue d'un matériau. Elle peut donc être exploitée dans le suivi ou la prévention de l'endommagement en fatigue. Dans ce papier, nous étudions l'effet de divers traitements thermiques et donc de diverses tailles moyennes de grains d'un acier sur la fréquence de l'onde ultrasonore après traversée du matériau. Nous avons fait la même étude expérimentale sur des échantillons en aluminium. Les différentes tailles de grains sont obtenues par laminage. La mesure du décalage en fréquence des ondes longitudinales est réalisée en immersion avec deux sondes de fréquences différentes 2.25 et 5 MHz. Les résultats expérimentaux sont représentés sous forme de courbes donnant la fréquence pour les deux sondes de 2.25 et 5 MHz en fonction de la taille des grains. Les traitements thermiques sur l'acier et le laminage sur l'aluminium effectués sur les échantillons ont permis d'obtenir un gradient de tailles des grains. Nos résultats sont en accord avec la théorie en raison du trajet important dans l'échantillon et dans ce cas le décalage en fréquence vers le bas est prépondérant. Ils montrent une relation directe entre le décalage en fréquence et la taille moyenne des grains. Il est donc possible de remonter de manière quantitative à une taille moyenne de grains à partir de la mesure de la fréquence d'une onde ultrasonore ayant traversé ce matériau et par conséquent à son état de fatigue thermique ou mécanique.

1 Introduction

Une onde ultrasonore qui traverse un matériau subit une modification. Cette modification est directement liée aux caractéristiques intrinsèques du milieu de propagation. Nous pouvons citer la nature du matériau, sa structure, son état de contrainte ainsi que les traitements thermiques subis. Chacune de ses caractéristiques influe sur un ou plusieurs paramètres ultrasonores tels que la vitesse de propagation ou le coefficient d'atténuation d'un ou de plusieurs modes de propagation [1]. Les modifications structurales obtenues par traitement thermique permettent de conférer aux aciers des propriétés particulières adaptées à sa meilleure utilisation.

IL s'agit d'améliorer les propriétés des aciers pour leur emploi mais, souvent, l'amélioration de l'une d'elles va généralement de paire avec une dégradation d'autres propriétés. Ainsi, une augmentation de dureté ou de résistance mécanique, est toujours associée à un accroissement de la fragilité ou une diminution de la ductilité. Un traitement thermique d'un matériau permet de modifier, entre autres, la taille moyenne des grains. Cette dernière dépend de la température, du temps de maintien et du mode de refroidissement [2].

La taille moyenne des grains, outre son influence sur les vitesses de propagation et coefficient d'atténuation des ondes ultrasonores, affecte aussi la fréquence de l'onde à travers le matériau [3, 4]. Dans ce papier, nous étudions l'effet de divers traitements thermiques et donc de diverses tailles moyennes de grains d'un acier sur la fréquence de l'onde ultrasonore après traversée du matériau.

2 Echantillons

Le manuscrit doit être transmis sur le site du congrès avant le 1^{er} mars 2010. Nous avons choisi cinq échantillons identiques d'acier. Les échantillons sont cylindriques de diamètre 35mm et de 110 mm de longueur. Une analyse spectrométrique à fluorescence X pour quantifier la composition en éléments des échantillons (tableau 1) a été effectuée. C'est un acier faiblement allié de nuance E24 et d'usage courant dans l'industrie.

élément	% C	% P	% S	% autres
quantité	0.17	0.040	0.040	< 0.008

Table 1 Composition chimique des échantillons

3 Analyse métallographique

L'étude métallographique des échantillons à l'état brut et à différents grossissements, a révélé une microstructure ferrito-perlitique (fig. 1).

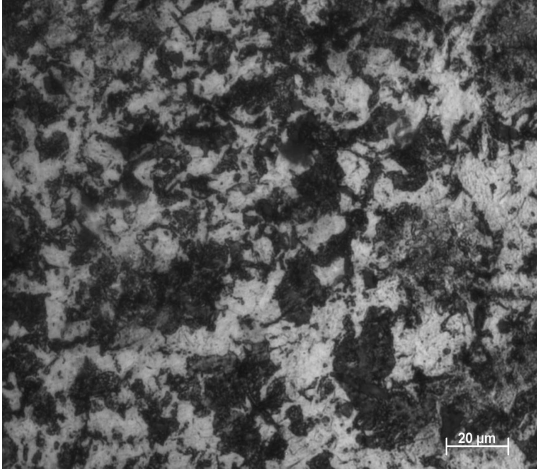


Figure 1 : Microstructure de l'acier E24 à 0.17 %C (ferrite +perlite)

4 Dispositif Expérimental

Le dispositif expérimental (fig. 2) est composé d'un système de contrôle non destructif par immersion des matériaux. L'échantillon, immergé dans l'eau, dispose de 5 degrés de liberté pour analyser l'objet suivant plusieurs incidences. Ce système, géré par ordinateur, permet l'acquisition et le traitement des signaux ultrasonores obtenus à travers les échantillons.

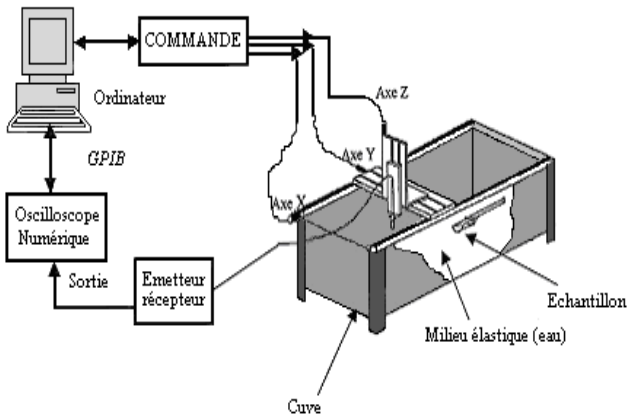


Figure 2: Dispositif du contrôle ultrasonore par immersion

5 Propagation des ondes acoustiques dans les matériaux

L'étude expérimentale de l'influence des caractéristiques mécaniques ou physiques tels que les traitements thermiques, la dureté et la taille de grains sur les paramètres ultrasonores dans les matériaux polycristallins doit tenir compte de la diffusion des ondes ultrasonores. D'une façon générale, le coefficient d'atténuation α est un paramètre relatif composé du coefficient d'absorption α_A et du coefficient de diffusion α_s [5] :

$$\alpha = \alpha_A + \alpha_s \quad (1)$$

Beaucoup de modèles ont montré que le coefficient d'atténuation est fonction de la fréquence [6]. Le plus important résultat montre que $\alpha(f)$ est fonction du diamètre du grain du matériau D (diamètre moyen) par rapport à la longueur d'onde λ :

Région de Rayleigh $\lambda \gg D$ (cas le plus fréquent):

$$\alpha(f) = c_1 D^3 f^4 \quad (2)$$

Région stochastique $\lambda \approx D$: $\alpha(f) = c_2 D f^2$ (3)

Région de diffusion $\lambda \ll D$: $\alpha(f) = c_3 D f$ (4)

où c_1, c_2 et c_3 sont des constantes.

La diffusion des ultrasons au contact des grains et les interfaces dans les matériaux polycristallins sont la cause de l'atténuation et créent des vitesses dispersives. Le coefficient d'atténuation et la dispersion de vitesses provoqués par les grains sont décrits analytiquement dans la documentation [7,8].

Un modèle pour l'amplitude du signal rétrodiffusé A_b , correspondant à une profondeur donnée z , peut être décrit pour des matériaux ayant des propriétés homogènes comme:

$$A_b = A_0 \cdot \alpha_s(f) \cdot \exp(-2\alpha(f) \cdot z) \quad (5)$$

où A_0 est l'amplitude initiale, $\alpha(f) = \alpha(z, f)$ le coefficient d'atténuation global et $\alpha_s(f) = \alpha_s(z, f)$.

En général, les pertes par diffusion sur les grains sont grandes comparées aux pertes par absorption. Dans la région de Rayleigh (notre cas) où $\lambda \gg D$, le coefficient d'absorption dépend linéairement de la fréquence et le coefficient de diffusion est proportionnel à f^4 :

$$\alpha(f) = a_1 f + a_2 D^3 f^4 \quad (6)$$

où a_1 est la constante d'absorption, a_2 la constante de diffusion et le f la fréquence. Le coefficient de diffusion montre une sensibilité élevée à la variation de la taille de grain. Les équations suivantes donnent respectivement l'expression du coefficient de diffusion pour une onde longitudinale et de cisaillement [9] :

$$\alpha_l = \frac{8 \pi^3 V g A^2}{375 \rho^2 V_l^8} \left[2 + 3 \left(\frac{V_l}{V_t} \right)^5 \right] f^4 \quad (7)$$

$$\alpha_s = \frac{6 \pi^3 V g A^2}{375 \rho^2 V_l^8} \left[3 + 2 \left(\frac{V_l}{V_t} \right)^5 \right] f^4 \quad (8)$$

Avec $A = C_{11} - C_{12} - 2C_{44}$ et Vg : le volume moyen des grains.

Ces équations (7) et (8) indiquent que les pertes par diffusion affectent beaucoup plus les ondes de cisaillement que les ondes de compression. Dans la région de Rayleigh, les composantes à haute fréquence sont rétrodiffusées avec une plus grande intensité comparée aux composantes de basse fréquence. En conséquence, un décalage vers le haut dans la fréquence prévue du spectre de puissance des échos à large bande est alors induit.

En outre le terme $\exp(-2\alpha(f) \cdot z)$ dans l'équation (5) introduit quant à lui un décalage vers le bas dans la variation de fréquence. Le décalage de haut en bas dépend de la position des diffuseurs relativement à la sonde. Nous avons ici deux phénomènes en opposition, c'est à dire décalage vers le haut en raison de la diffusion et décalage vers le bas provoqué par l'atténuation.

Toutefois, le trajet ultrasonore z peut être considéré comme élevé en raison des allers-retours dans l'échantillon, le décalage vers le bas provoqué par l'atténuation est prépondérant.

6 Mesure des paramètres ultrasonores

La mesure du décalage en fréquence des ondes longitudinales est réalisée en immersion avec deux sondes de fréquences différentes 2.25 et 5 MHz. Nous avons choisi les ondes longitudinales car elles sont plus aisées à produire et à analyser et leur atténuation dans l'acier est la plus faible comparativement aux autres modes de propagation.

7 Résultats expérimentaux

Nous avons obtenu pour chaque échantillon et pour chacune des deux fréquences le signal temporel sur la face arrière de l'échantillon et calculé son spectre en fréquence.

Nous donnons à titre d'exemple le signal temporel d'une onde longitudinale et son spectre de fréquence après propagation dans l'échantillon (fig.3 et 4).

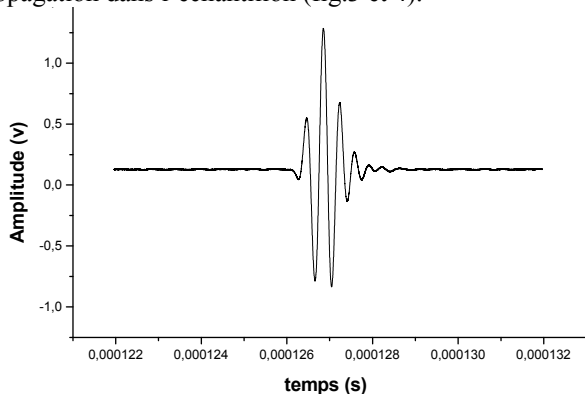


Figure 3: Signal temporel

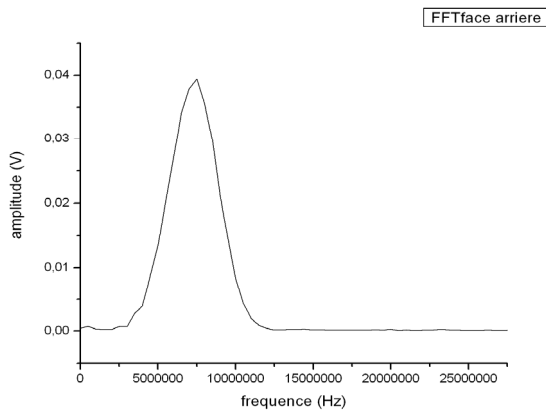


Figure 4: Spectre en fréquence du signal

Les résultats expérimentaux sont représentés sous forme de tableaux donnant pour chaque échantillon et pour chaque fréquence la fréquence centrale du signal ultrasonore (tableaux 2 et 3).

Chaque échantillon est caractérisé par la température maximale et le temps de maintien.

échantillon	Traitement thermique (temp. en °C, temps de maintien en min)	Fréquence de la sonde en MHz
brut	Sans traitement	2.75
Traitement 1	820 °C, 15 min	2.87
Traitement 2	950 °C, 40 min	2.78
Traitement 3	1050 °C, 60 min	2.53
Traitement 4	1200°C, 90 min	2.74

Table 2: Décalage en fréquence en fonction du traitement thermique pour la sonde de 2.25 MHz

échantillon	Traitement thermique (temp. en °C, temps de maintien en min)	Fréquence de la sonde en MHz
brut	Sans traitement	5.34
Traitement 1	820 °C, 15 min	4.88
Traitement 2	950 °C, 40 min	5.19
Traitement 3	1050 °C, 60 min	5.03
Traitement 4	1200°C, 90 min	4.58

Tableau 3 : Décalage en fréquence en fonction du traitement thermique pour la sonde de 5 MHz

Nous avons représenté les résultats sous forme de courbes donnant la température maximale en fonction de la fréquence pour les deux sondes de 2.25 et 5 MHz (figures 5 et 6).

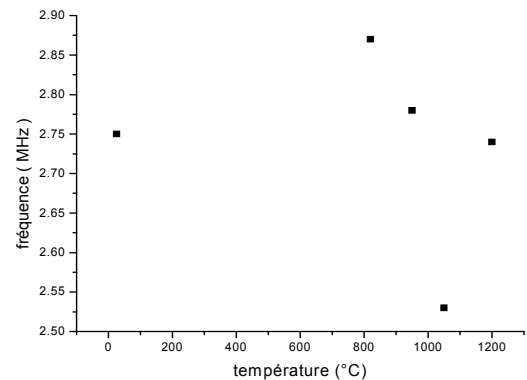


Figure 5: Fréquence en fonction du traitement thermique pour une sonde de 2.25 MHz

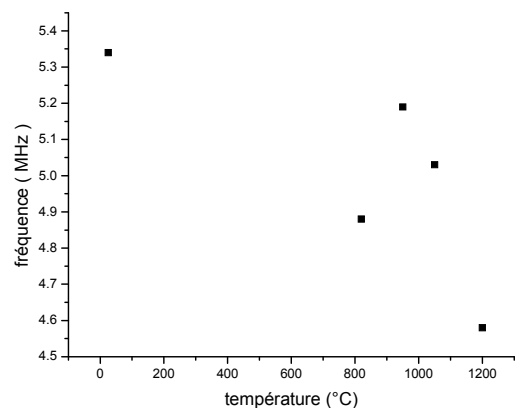


Figure 6: Fréquence en fonction du traitement thermique pour une sonde de 5 MHz

8 Analyse des résultats

Les traitements effectués sur les échantillons ont permis un grossissement des grains. Nous avons donc une croissance de la taille moyenne des grains à partir de l'échantillon à l'état brut puis une croissance en allant du traitement 1 (820 °C, 15 min) au traitement 4 (1200°C, 90 min). Les courbes représentant la fréquence en fonction du traitement thermique pour une sonde de 2.25 MH (fig. 5) et de 5 MHz (fig. 6) montre une décroissance de la fréquence en fonction d'une température croissante et d'un temps de maintien croissant et donc d'une taille moyenne de grains croissante.

Notons que nos résultats sont en accord avec la théorie (voir paragraphe 5 sur la propagation des ultrasons dans les matériaux) en raison du trajet important dans l'échantillon et dans ce cas le décalage en fréquence vers le bas est prépondérant.

Ces résultats expérimentaux montrent une relation directe entre le décalage en fréquence et la taille moyenne des grains. En effet une décroissance de celle ci accroît le décalage de la fréquence vers le bas. Il est donc possible de remonter de manière quantitative à une taille moyenne de grains à partir de la mesure de la fréquence d'une onde ultrasonore ayant traversé ce matériau.

9 Cas de l'aluminium

Les mêmes expérimentations ont été faites sur l'aluminium 2024. L'affinage des grains a été obtenu par laminage. En effet pour chaque taux de déformation ou de laminage correspond une taille moyenne des grains de l'échantillon d'aluminium. Les essais ont été réalisés pour trois fréquences : 2.25, 5 et 10 MHz. Nous avons remarqué une similitude des résultats pour les trois fréquences. A titre d'exemple, pour une fréquence de 2.25 MHz, nous donnons les décalages en fréquences en fonction des taux de déformations des échantillons (Tableau 4).

Taux de déformation (%)	Epaisseur r (mm)	Fréquence (MHz)
19.5	16.1	3.001
29	14.2	2.899
38.5	12.26	2.892
52	9.6	2.899
59.5	8.1	2.747
71.5	5.7	2.747
79.5	4.1	2.441

Table 4: Décalage en fréquence en fonction du taux de déformation de l'Al 2024 pour la sonde de 2.25 MHz

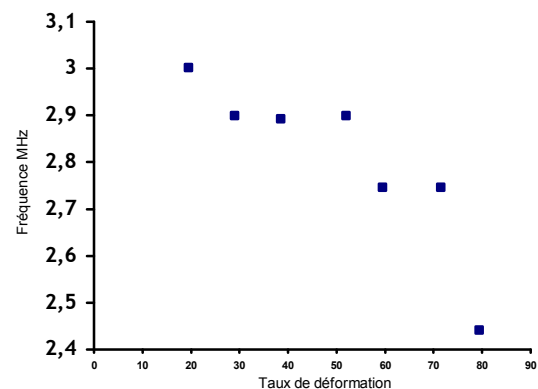


Figure 7: Fréquence en fonction du taux de déformation de l'Al 2024 pour une sonde de 2.25 MHz

En traçant la courbe reliant ces deux paramètres (figure 7), nous constatons que dans le cas de l'aluminium 2024, la fréquence diminue (ou qu'il y a un décalage vers le bas des fréquences) lorsque la taille moyenne des grains diminue (ou que le taux de déformation augmente). Notons que le phénomène est inverse dans le cas des aciers et que ces résultats sont aussi en accord avec la théorie.

10 Conclusion

Nous avons étudié l'interaction entre les ondes ultrasonores et des échantillons en acier avec différents traitements thermiques ayant permis d'obtenir un gradient de tailles moyennes des grains. Ces mêmes essais ont été réalisés sur des échantillons en aluminium avec des traitements mécaniques qui ont aussi permis d'obtenir un gradient de tailles moyennes des grains. Nous avons mesuré expérimentalement les décalages en fréquences d'une onde longitudinale à travers ces matériaux. Nous avons montré une corrélation entre les décalages en fréquences et les traitements thermiques sur l'acier et mécaniques sur l'aluminium ayant permis d'obtenir un gradient de grosseurs de grains, particulièrement pour le mode de propagation longitudinal qui est un mode dont la production et l'analyse des résultats sont aisées. Les ultrasons s'avèrent donc comme un outil non négligeable pour la détermination expérimentale de la grosseur des grains dans un matériau.

Références

- [1] A. Badidi Bouda A. Benchaala & K. Alem, "Ultrasonic characterization of materials hardness", Elsevier, Ultrasonics, vol.38, 2000, pp224-227
- [2] A. Constant et G. Henry, « les principes de base du traitement thermique des aciers », PYC Editions, Paris, 1986
- [3] J.Saniie, T.Wang, N.M. Bilgutay, "analysis of homomorphic processing for ultrasonic grain signal characterization", IEEE transactions on UFFC, vol 36, N°3, 1989, pp 365-373
- [4] A. Badidi Bouda, S. Lebailly & A. Benchaala, "Grain Size Influence On Ultrasonic Velocities and

- Attenuation”, Elsevier, NDT&E International, January 2003
- [5] R.S. Sharpe “Research techniques in non destructive testing”, Sharpe, Volume IV, 1980
 - [6] R.J. Dickinson, “Reflection and scattering in physical principles of medical ultrasonics”, Ed. C.R. Hill (Ellis Horwood, Chichester, 1986) p.225
 - [7] F. Peters et L. Petit, “a broad band spectroscopy method for ultrasound wave velocity and attenuation measurement in dispersive media”, Elsevier ultrasonics 41 (2003), 357-363
 - [8] S. Hireskorn, P.W. Van Andel, U. Netzelmann, “Ultrasonic Methods to Detect and Evaluate Damage in Steel”, Elsevier, NDT&E International 15 (2000)373-393.
 - [9] Etude par microscopie acoustique de l’influence des irradiations sur des acier inoxydables, L. Robert, thèse de doctorat, Université de Montpellier, 1994