

CONTRÔLE DE LA CÉMENTATION PAR BRUIT BARKHAUSEN

CHECKING OF CASE HARDENING BY BARKHAUSEN NOISE

F. ZHANG, C. CHEVALLIER, B. DUPONT, H. WALASZEK – CETIM, 52 avenue Félix Louat
– 60304 – BP 80067 - Senlis Cedex. Tél. +33 (0)3 44 67 35 50 – Fax. +33 (0)3 44 67 33 52.
e-mail : fan.zhang@cetim.fr

J.P. CANIVET – GIMA, 41, avenue Blaise Pascale – BP 60223 – 60002 Beauvais Cedex.
Tél : 33 (0)3 44 11 33 35 – Fax : 33 (0)3 44 11 34 18. E-mail : jean-paul.canivet@gima.fr

Résumé

Le contrôle de la cémentation est un cas difficile pour les méthodes non destructives, en raison de son gradient de microstructure relativement faible dans la couche traitée, auquel s'ajoute un profil complexe de contraintes résiduelles ainsi que la diversité de cas industriels. N'ayant pas de solution matérielle sur le marché, nous avons étudié la faisabilité du bruit ferromagnétique (Bruit Barkhausen) en vue de caractériser dans les pignons, la profondeur cémentée ainsi que de détecter d'autres défauts tels qu'un excès d'austénite résiduelle et la présence de réseaux de carbures. D'abord, une sonde a été spécialement conçue pour être adaptée à la géométrie complexe des dentures. Puis des conditions d'excitation et de réception ont été optimisées par rapport aux caractéristiques d'une structure martensitique. Enfin, une méthode d'analyse du bruit a été développée permettant d'extraire le paramètre le plus pertinent pour caractériser la profondeur cémentée. Cette faisabilité a été menée en intégrant les conditions industrielles de fabrication ainsi qu'un certain nombre de facteurs métallurgiques influant la réponse en Bruit Barkhausen du matériau, comme par exemple : le type de cémentation, le cycle de traitement, la nuance d'acier, les contraintes et les austénites résiduelles, la présence de réseaux de carbures, etc. Nous présentons dans cet article les performances et les limitations de la technologie développée par le CETIM.

Abstract

The case hardening assessment is case difficult reach by NDT methods because of a low microstructure gradient in the case depth, with a complex stress profile observed on the various industrial applications. As there was any industrial solution available on the market, we studied the feasibility of Barkhausen noise characterisation of case depth in the gable combined with residual austenite excess or carbides network detection. First, a probe was specially designed and adapted to the complex geometry of gable. Electromagnetic excitation and reception technique were optimised in relation with the martensite structure. Finally, a noise analysis method was developed to isolate the pertinent parameter for case depth characterisation. This feasibility was led with integration of manufacturing conditions and a great number of metallurgical characterisation influencing the Barkhausen noise. These characterisations are the type of case hardening, the heat processing cycle, the steel grade, the stress and residual austenite and the presence of carbide networks. We present on this paper the results obtained by the Barkhausen noise method, and both advantages and limitations of the method in the conditions of the study developed by CETIM.

INTRODUCTION

A la demande des fabricants d'engrenages, l'équipe ICM (Ingénierie Contrôles et Mesures) du CETIM a poursuivi – depuis la précédente publication aux journées COFREND 2005 – les travaux de caractérisation de la profondeur de cémentation sur les dentures d'engrenage par la technique du Bruit Barkhausen. L'objectif de l'étude est d'approfondir les facteurs influant sur la caractérisation de la profondeur cémentée. Après avoir étudié plus particulièrement : la taille des pignons, les contraintes résiduelles superficielles, la fréquence d'excitation, la présence d'austénite résiduelle et la nuance d'acier, nous arrivons aujourd'hui à mieux cerner les performances et les limites du contrôle par Bruit Barkhausen. Parallèlement, les résultats ont été comparés avec les appareils de commerce pour montrer la nécessité de les adapter afin de répondre aux besoins du contrôle.

RAPPEL DES RESULTATS PRECEDENTS

Les travaux antérieurs ont montré qu'une des caractéristiques du Bruit Barkhausen varie de façon linéaire avec la profondeur réelle de cémentation obtenue après découpe et filiation de microdureté, et que la même relation est applicable à la plupart des nuances utilisées par les fabricants de pignons (figure 1).

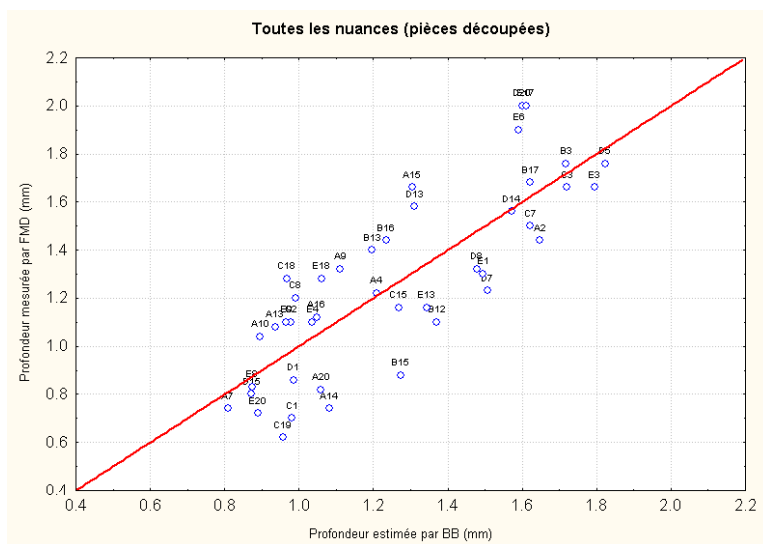


Figure 1 : La corrélation du Bruit Barkhausen avec la profondeur cémentée réelle sur les 6 nuances différentes (A : 20NiCrMo2-2, B : 20MnCr5, C : 18NiCr5-4, D et E : 17NiCrNo6-4, F : 16NCD6)

INFLUENCE DE LA TAILLE DU PIGNON

Pour l'étudier, une rondelle cémentée d'épaisseur initiale de 40 mm a été utilisée sur laquelle des mesures du Bruit Barkhausen ont été effectuées au fur et à mesure de la réduction de son épaisseur jusqu'à 2 mm. La figure 2 représente l'évolution du paramètre caractéristique de la profondeur cémentée en fonction de l'épaisseur restante de la rondelle. On constate que l'influence de l'épaisseur n'est significative que pour des épaisseurs inférieures à 5 mm, ce qui correspond approximativement à des modules de pignons inférieurs à 4.

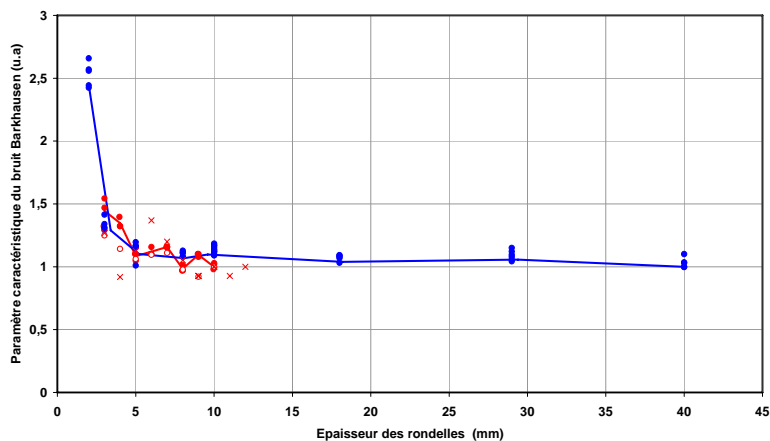


Figure 2 : Evolution du paramètre caractéristique du bruit Barkhausen en fonction de l'épaisseur de la rondelle (points rouges et bleus correspondent aux deux campagnes d'essai)

INFLUENCE DES CONTRAINTES SUPERFICIELLES

Sur une série de pièces en forme de rondelle d'épaisseur 10 mm cémentées des deux côtés, toutes brutes d'usinage à l'exception de la pièce 6 rectifiée, les mesures du Bruit Barkhausen ont été effectuées et tracées en fonction du niveau de contraintes résiduelles en surface (figure 3) déterminées par diffraction des rayons X.

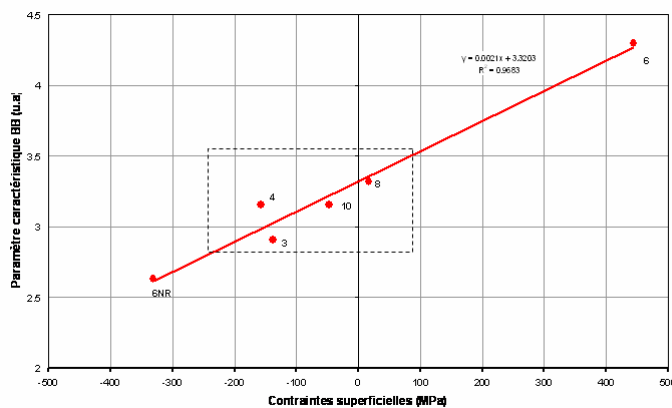


Figure 3 : Le paramètre caractéristique du Bruit Barkhausen en fonction du niveau des contraintes présentes en surface sur les 6 rondelles cémentées

On observe que le paramètre caractéristique du Bruit Barkhausen évolue de façon sensible et linéaire avec les contraintes superficielles. En revanche, pour les pièces ayant des contraintes limitées entre 0 et -300 MPa (entourées par un carré sur la figure 3), leur effet peut être considéré comme négligeable, puisque l'écart entre la profondeur estimée par le Bruit Barkhausen et celle mesurée par filiation de microdureté ne dépasse pas 0.12 mm.

INFLUENCE DE LA FREQUENCE D'EXCITATION

Afin de réduire les effets en surface tels que les contraintes résiduelles et les austénites résiduelles, nous avons tenté de réduire la fréquence d'excitation. On constate effectivement que l'effet des contraintes superficielles est atténué, mais d'autres inconvénients apparaissent : mesures moins pertinentes pour les profondeurs cémentées les plus élevées, plus sensibles à la taille des pignons, plus longues et plus bruyées. Il en résulte que la réduction de la fréquence d'excitation n'apporte pas d'améliorations sur la mesure.

DETECTION DES AUSTENITES RESIDUELLES

En exploitant d'autres paramètres sur les signaux Barkhausen, nous avons constaté que la position du pic permet facilement de déceler un excès d'austénite résiduelle, par exemple supérieur à 40% (figure 4).

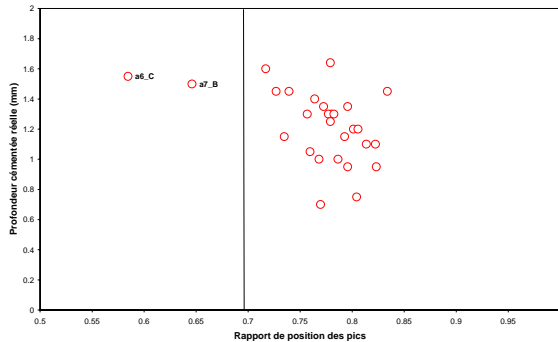


Figure 4 : Profondeur de cimentation réelle en fonction d'un paramètre caractérisant la position du pic Barkhausen

VALIDATION SUR DIFFERENTES NUANCES D'ACIER

Nous avons testé la méthode de contrôle sur une trentaine de pignons de différentes nuances d'acier. Le tableau 1 compare, pour chaque pignon, la valeur de la profondeur cimentée estimée à partir de l'analyse du Bruit Barkhausen avec celle réellement mesurée par filiation de microdureté. On constate que les pignons présentant un écart supérieur à 0,4 mm correspondent aux trois cas suivants : module inférieur à 4, surface grenillée, ayant un excès d'austénite résiduelle. Les estimations faites sur les autres pignons présentent des écarts inférieurs à 0,4 mm. Ces écarts proviennent des trois dispersions : celles liées à la mesure (estimée à $\pm 0,05$ mm) et celles liées au process et à la méthode de filiation de microdureté (la somme des deux étant estimée à $\pm 0,15$ mm)

| Pignon | profondeur cimentée réelle ou extrapolée (mm) | Profondeur estimée BB (mm) | Justesse (mm) | Observation |
|--------|---|----------------------------|---------------|---------------|
| a1(A) | 1.1 | 0.87 | 0.23 | grenillé |
| a2(B) | 1.15 | 1.43 | 0.28 | grenillé |
| a3(A) | 1.45 | 0.78 | 0.67 | module faible |
| a4(B) | 1.35 | 1.19 | 0.16 | |
| a5(C) | 0.7 | 1.12 | 0.42 | grenillé |
| a6(C) | 1.55 | 2.73 | 1.18 | AR 50% |
| a7(B) | 1.5 | 3.91 | 2.41 | AR 50% |
| a8(B) | 1.64 | 1.36 | 0.28 | |
| a9(B) | 1.45 | 1.18 | 0.27 | |
| a10(B) | 1.3 | 0.98 | 0.32 | |
| a11(C) | 1.05 | 1.27 | 0.22 | |
| a12(C) | 1.2 | 1.51 | 0.31 | |
| a13(A) | 0.75 | 1.16 | 0.41 | grenillé ? |
| a14(C) | 1.3 | 1.37 | 0.07 | |
| a15(C) | 1.6 | 1.74 | 0.14 | |
| a16(C) | 1.3 | 1.17 | 0.13 | |
| a17(B) | 0.95 | 0.85 | 0.10 | |
| a18(A) | 1.1 | 0.94 | 0.16 | |
| a19(B) | 1 | 1.06 | 0.06 | |
| a20(A) | 1.35 | 1.28 | 0.07 | |
| b1A(A) | 0.95 | 0.87 | 0.08 | |
| B1D(C) | 1.25 | 1.48 | 0.23 | |
| b1E(C) | 1 | 1.37 | 0.37 | |
| b1F(C) | 1.2 | 0.98 | 0.22 | |
| b1G(D) | 1.15 | 1.10 | 0.05 | |
| b1H(C) | 1.3 | 1.12 | 0.18 | |
| b1I(A) | 1.4 | 1.35 | 0.05 | |
| B1J(C) | 1.45 | 1.07 | 0.38 | |

| Pignon | Profondeur réelle (mm) | Profondeur estimée (mm) | Justesse (mm) | Observation |
|--------|------------------------|-------------------------|---------------|-------------|
| G05 | 0.47 | 0.69 | 0.22 | |
| G10 | 1.05 | 1.24 | 0.19 | |
| G15 | 1.65 | 2.08 | 0.43 | AR à 45 % |
| G20 | 2 | 2.39 | 0.39 | AR à 45% |

A : 20NCD2
 B : 20MC5
 C : 20NC6
 D : 17CrNiMo6

Tableau 1 : Comparaison sur les différents pignons de nuance différente la profondeur estimée par le Bruit Barkhausen et la profondeur réelle

COMPARAISON AVEC LES APPAREILS DE COMMERCE

Les résultats présentés ci-dessus ont été comparés avec ceux obtenus par deux appareils de commerce : l'un en courants de Foucault basse fréquence (128 Hz) et l'autre en Bruit Barkhausen excité à 10 Hz (figure 5). La synthèse présentée dans le tableau 2 montre que les résultats sont plus dispersés que ceux obtenus par le CETIM. De plus, sur l'appareil Barkhausen, les critères de contrôle sont différents selon le procédé de cémentation (rondelles après cémentation gazeuse et pignons après cémentation accélérée). Les dispersions observées sur les appareils de commerce pourraient être dues à leur faible profondeur de pénétration rendant ainsi les mesures plus sensibles aux effets de surface.

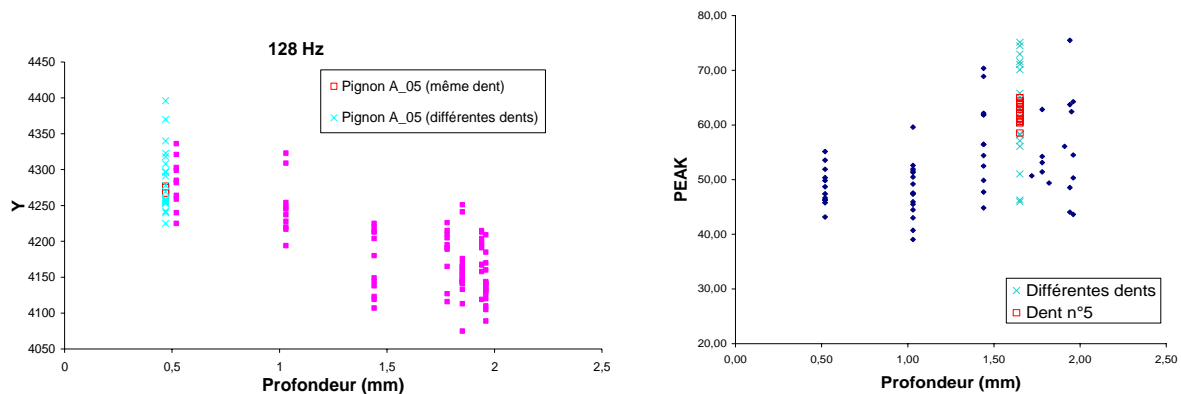


Figure 5 : En fonction de la profondeur réelle de cémentation, les variations observées sur l'impédance imaginaire des courants de Foucault (courbe de gauche), et sur l'amplitude du pic Barkhausen (courbe de droite).

| | | APPAREIL BARKHAUSEN DU COMMERCE | | | SYSTEME CETIM | | | COURANTS DE FOUCAULT | | |
|--------------|---|---------------------------------|---------------------|------|-----------------------------|---------------------|------|--|---------------------|--------------|
| | | Paramètre le plus pertinent | Qualité corrélation | | Paramètre le plus pertinent | Qualité corrélation | | Paramètre le plus pertinent | Qualité corrélation | |
| | | | (a) | (b) | | (a) | (b) | | (a) | (b) |
| Rondelles | A | PEAKPOS | 0,27 | 0,62 | y2 / y3 | 0,73 | 0,81 | - | - | - |
| | D | PEAK | 0,89 | 0,96 | y2 / y3 | 0,93 | 0,96 | Impédance (128 Hz) Partie imaginaire Y | 0,29 | 0,42 |
| Pignons GIMA | | PEAKPOS | 0,42 | 0,94 | y2 / y3 | 0,78 | 0,97 | Impédance (128 Hz) Partie réelle X Partie imaginaire Y | 0,54 0,53 | 0,94 0,94 |

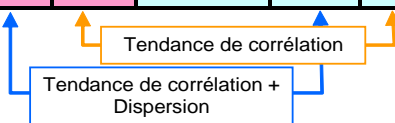


Tableau 2 : Comparaison des résultats de mesure entre les différents méthodes et systèmes (coefficient de corrélation calculé sur toutes les valeurs de mesure (a) et sur les valeurs moyennes (b))

CONCLUSIONS

Aujourd'hui, la technologie développée au CETIM permet d'aboutir aux performances de contrôle suivantes : la technique est actuellement applicable au module de pignons supérieur à 4 mm, aux faibles variations des contraintes superficielles ($\Delta\sigma_r < 300$ MPa) et à la détection d'excès d'austénite résiduelle ($\gamma_r > 40\%$). La précision de l'estimation se situe à ce jour à 0.4 mm en intégrant toutes les dispersions liées au procédé (nuance, procédé, charge, géométrie...) et à la mesure (filiation de micro-dureté et Bruit Barkhausen). Cette précision pourra être certainement améliorée si le contrôle s'effectue sur une production bien définie (même procédé, nuance ...). Une validation dans un atelier de production est en cours.