



HAL
open science

Analyse par diffraction X des contraintes résiduelles générées par le procédé de fabrication des ressorts de soupape hélicoïdaux

J. Krier, P. Mille, A. Cornet

► **To cite this version:**

J. Krier, P. Mille, A. Cornet. Analyse par diffraction X des contraintes résiduelles générées par le procédé de fabrication des ressorts de soupape hélicoïdaux. *Journal de Physique IV Proceedings*, 1996, 06 (C4), pp.C4-267-C4-272. 10.1051/jp4:1996425 . jpa-00254308

HAL Id: jpa-00254308

<https://hal.science/jpa-00254308>

Submitted on 4 Feb 2008

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.

Analyse par diffraction X des contraintes résiduelles générées par le procédé de fabrication des ressorts de soupape hélicoïdaux

J. Krier, P. Mille et A. Cornet

ENSAIS, Laboratoire de Métallurgie, Corrosion et Matériaux, 24 boulevard de la Victoire, 67084 Strasbourg, France

Résumé: Dans la perspective de l'augmentation du nombre de soupapes des moteurs, les constructeurs recherchent une augmentation globale de la qualité du produit. Des études sont lancées au niveau de la matière première, du tréfilage et de la gamme de fabrication des ressorts de soupapes. Cette étude concerne l'évolution des contraintes résiduelles introduites par les opérations de parachèvement successives et plus précisément par le grenailage.

Abstract: 16 valves motors are more and more used today, therefore manufacturers have to increase the quality of valve's springs. Studies on material elaboration, on wire drawing, on the forming and finishing process of springs are running. The aim of this study is to know the effects of process steps on residual stresses developed in the spring, especially after shot peening.

1. INTRODUCTION

Les ressorts de soupapes ont pour fonction d'emmagasiner l'énergie élastique lors de la déformation due à la charge, et de restituer intégralement à la suppression de celle-ci. Ils sont de ce fait sollicités en permanence entre une charge mini qui assure la fermeture et une charge maxi lors de l'ouverture. La géométrie du ressort est calculée pour que la charge maximum en service n'introduise pas de déformations plastiques irréversibles. Ce sont donc le diamètre du fil et le diamètre d'enroulement, mais également les caractéristiques du matériau qui vont définir les charges d'utilisation des ressorts. Ces ressorts travaillent à des températures supérieures à 80° en milieu non corrosif. Le bon fonctionnement du moteur implique une bonne stabilité des caractéristiques mécaniques du ressort. Les aciers les plus utilisés dans ce domaine sont les aciers à hautes performances au Chrome-Silicium et au Chrome-Vanadium.

Pour réduire toujours plus l'encombrement et le poids embarqué, les ressorts sont calculés avec le maximum de précision. Pour assurer les performances mécaniques et leur stabilité en service il est indispensable de maîtriser les différentes parties du procédé de fabrication. Les traitements mécaniques des ressorts devront ainsi maximiser les caractéristiques mécaniques du produit tout en minimisant l'influence du couplage fatigue-fluage pour assurer une durée de vie suffisante.

1.1. Position du problème

La gamme de fabrication des ressorts de soupapes débute par l'enroulement du fil pour en faire un ressort hélicoïdal. Les contraintes résiduelles introduites dans cette transformation sont relaxées par un revenu de détente. Ensuite, les extrémités des ressorts sont meulées pour obtenir les faces d'appuis.

Pour augmenter la durée de vie des ressorts, les fabricants ont recours au grenailage de précontrainte. Cette opération consiste à projeter des billes en acier sur la surface externe de la pièce pour y introduire des contraintes de compression. Le grenailage peut s'effectuer en vrac ou individuellement. Les paramètres les plus influents sont la vitesse de projection, le diamètre des billes, la dureté des billes et le temps d'exposition.

La qualité et la reproductibilité du grenailage sont généralement mesurées à l'aide de la flèche d'une éprouvette ALMEN qui donne une estimation de l'influence globale des paramètres de réglage et qui correspond au réglage ou au contrôle de la production. La maîtrise des paramètres influents le procédé passe par une caractérisation directe sur le ressort, soit par analyse en diffraction X des contraintes résiduelles, soit par des essais de fatigue.

La dernière étape consiste à bloquer le ressort à chaud, autrement dit, à comprimer le ressort de manière à introduire une déformation plastique qui a pour objet d'initier le fluage primaire pour atteindre le fluage secondaire qui assure la stabilité géométrique et des charges en service. Dans le présent travail, nous étudions les contraintes développées par le grenailage par diffraction des rayons X.

1.2. Comportement mécanique du ressort

Le ressort en service est principalement sollicité en torsion, mais également en flexion. Il en résulte que les contraintes maximales se situent sur le diamètre intérieur d'enroulement. En exprimant le tenseur des contraintes dans le fil lié à la torsion, il apparaît dans le repère principal des directions sollicitées en traction et en compression. Il est important que la surface externe reste comprimée en service pour augmenter la durée de vie des ressorts en évitant l'amorçage de fissures et leur propagation.

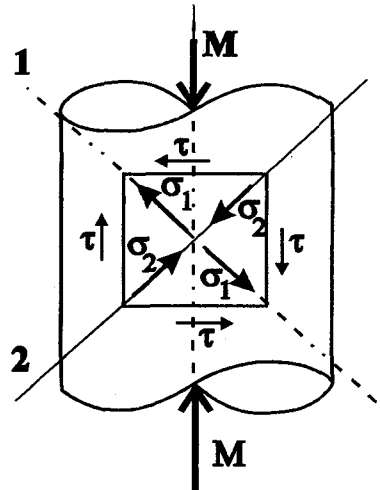


Figure 1: Répartition des contraintes dans un fil soumis à un moment de torsion M
Principal stresses due to torsion in a wire.

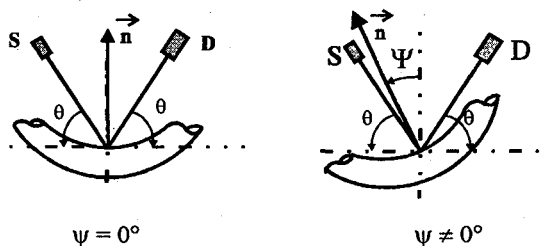
2. PREPARATION DES ECHANTILLONS

La zone la plus sollicitée du ressort se situe à 1,5 spires sur le diamètre intérieur d'enroulement (localisation de la majorité des ruptures). Des études préliminaires de PSA ont montré qu'il n'y avait pas de relaxation de contrainte à la découpe d'un tiers de spire. Les mesures sont donc effectuées sur un tiers de spire coupée à 1,5 spires.

2.1. Problèmes liés à la géométrie

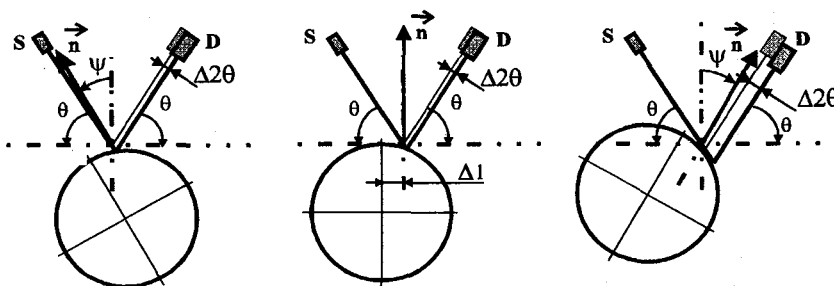
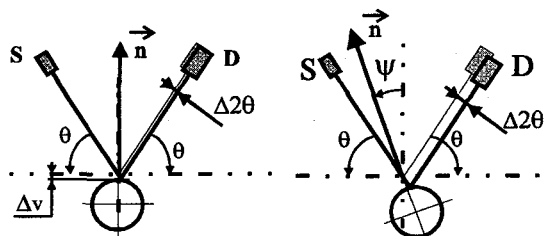
Le diamètre du fil est d'environ 4 mm pour un diamètre d'enroulement de 25 mm. Les figures 2 et 3 montrent l'influence du positionnement de l'échantillon sur la position de la raie de diffraction. Pour ne pas introduire de contrainte fictive, il est impératif que l'échantillon soit bien placé au centre du goniomètre. Ce positionnement est assuré par visée LASER.

Figure 2 : Principe de la mesure de contrainte par Diffraction X, dépouillement par la loi des $\sin^2 \psi$
Stress measurement using X ray diffraction



Cette première précaution permet, pour un faisceau de rayons X suffisamment fin et rectangulaire, de déterminer les contraintes dans les directions longues et transverses du fil. En effet dans ce cas les défauts sont symétriques et n'influent pas sur la position du pic. Les mesures sont effectuées en utilisant une fente classique d'une ouverture de 1 mm. Pour toutes les directions intermédiaires en revanche, il est nécessaire d'utiliser une fente circulaire pour diminuer l'influence des défauts géométriques qui ne sont plus symétriques. La figure 7 qui sera commentée plus tard représente un diagramme polaire déterminé à l'aide d'une fente de 1 mm de diamètre.

Défauts de mise en position verticale (Δv)



Défaut de positionnement latéral (Δl)

Figure 3: Influence de la mise place latérale de l'échantillon sur la position de diffraction 2θ en fonction de l'angle ψ :

Influence of sample placing on the 2θ position for ψ tilts

2.2. Détermination des contraintes

La détermination des contraintes est effectuée par diffraction des rayons X sur un diffractomètre Siemens D5000. Le rayonnement de Chrome permet d'utiliser la famille de plans réticulaires {211} à un angle de diffraction $2\theta=156^\circ$ pour la détermination des contraintes. Elle s'effectue suivant la méthode elliptique, les raies sont mesurées en mode Ω pour des angles ψ variant de -45° à $+45^\circ$ dans la direction du fil et dans la direction transverse. Le temps de mesure qui en découle est d'environ 4 heures pour la détermination de la contrainte dans une direction. Les contraintes peuvent être déterminées à ± 15 MPa.

2.3. Mesures en profondeur

L'étendue des contraintes de compression en profondeur a une grande importance pour la tenue en service. Elle sera déterminée par la mesure de profils de contraintes en profondeur par abrasion de couches successives. Cet enlèvement de matière est effectué à l'aide d'une solution qui se compose d'un tiers d'acide nitrique et de deux tiers d'eau distillée.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Une approche préliminaire a permis d'établir la répartition des contraintes de grenailage en surface autour du fil du ressort pour trois procédés de grenailage: en vrac, individuel et la composition des deux premiers. La figure 4 présente les valeurs de contraintes déterminées sur le diamètre extérieur, le diamètre intérieur et le côté du fil. On observe des contraintes plus faibles sur le diamètre intérieur pour le grenailage en tonneau, liées à l'enchevêtrement des ressorts sur le tapis, des contraintes plus faibles sur le côté du fil pour le grenailage en ligne, liées à un angle d'impact plus faible dans cette zone et enfin des contraintes homogènes pour le double grenailage. La meilleure répartition des contraintes et la maîtrise des paramètres machines semblent privilégier le grenailage en ligne; cette solution devra être validée par des essais de fatigue.

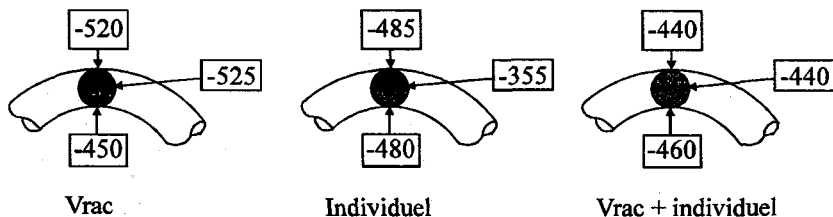


Figure 4: Influence du type de grenailage sur les contraintes résiduelles longitudinales
Influence of shot-peening methods on residual stress [MPa].

Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressés à l'influence des paramètres de grenailage individuel sur l'évolution des contraintes de compression des ressorts en acier chrome-vanadium d'une dureté de 48 HRC, et en acier chrome-silicium d'une dureté de 54 HRC. La discussion est fondée sur l'évolution des profils de contraintes mesurés suivant la profondeur dont la figure 5 présente un exemple.

Les paramètres de grenailage n'ont une influence significative que si la dureté des billes est supérieure à celle du matériau. Ainsi, on observe une augmentation des contraintes de compression et de la profondeur de pénétration avec le diamètre, la dureté et la vitesse de projection de la grenaille. Ces résultats sont conformes aux observations de Mattson [1] et Tissot [2] sur des ressorts à lames. Les gains sont plus importants dans le cas de l'acier chrome-silicium dont la dureté est supérieure.

Des paramètres de grenailage adéquats permettent d'obtenir des gains en contraintes d'environ 15 % en surface et de 30 % en contraintes maximum pour une même profondeur affectée sur cet acier. Pour des ressorts à lames, Tissot et Barret montrent que la durée de vie augmente avec la dureté du matériau jusqu'à un maximum de 53-54 HRC [2].

Le grenailage sous prédéformation s'effectue en compressant le ressort de $\Delta l = 12$ mm (charge de 570N). Cette prédéformation induit un moment de torsion dans le sens long du fil du ressort identique aux sollicitations en service (cf. figure 1). Les fibres à 45° sont grenillées sous tension tandis que celles à 135° sont grenillées sous compression. Il résulte de la décharge une augmentation des contraintes de grenailage pour les fibres tendues et une diminution pour les directions comprimées.

Les contraintes déterminées en surface tous les 15° sont représentées sous forme de figure polaire. La figure 6a montre une répartition classique autour de 600 MPa pour le grenailage simple. La figure 6b présente une évolution en "haricot" pour le grenailage sous prédéformation. Les contraintes de compression maximum, 700 MPa, sont obtenues dans la direction tendue en service, et les contraintes minimum, 250 MPa dans la direction comprimée en service.

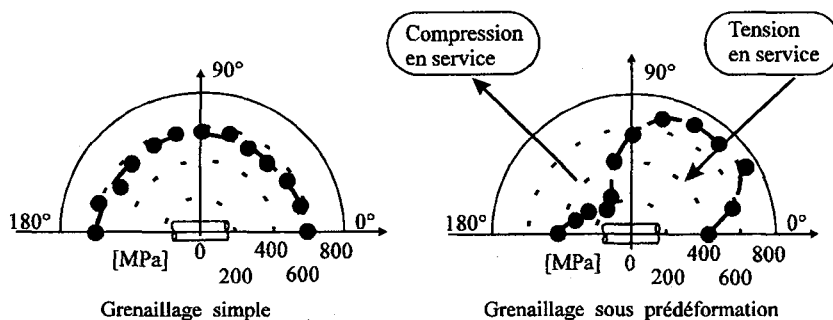


Figure 6: Représentation polaire des contraintes de compression superficielles après grenailage
Polar representation of residual stress after shot peening

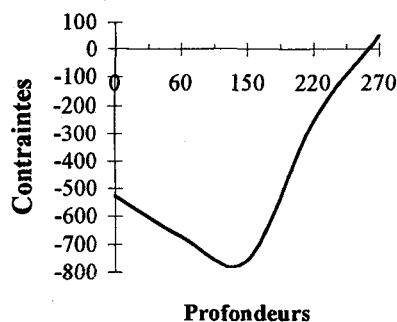


Figure 5: Profil de contrainte [MPa] suivant la profondeur [µm].
Residual stress vs. depth

Le grenailage sous prédéformation est effectué avec des billes de diamètre 0,4 au lieu de 0,6 du fait de la réduction de l'espace interspire. Malgré cela, les contraintes maximales dans la direction sensible sont supérieures à celles constatées pour un grenailage classique. Ceci devrait permettre d'atteindre une meilleure tenue en fatigue. Mattson [1] et Lu [3] montrent, sur des ressorts à lames sollicités à 80% de leur limite élastique, respectivement, que la durée de vie peut être augmentée d'un facteur 10 et que le gain en contrainte peut atteindre 100%.

4. CONCLUSIONS

Les analyses effectuées en surface montrent une répartition différente des contraintes autour du fil pour les différents modes de grenailage. Le grenailage en ligne permet une meilleure maîtrise des paramètres de réglage et un grenailage plus homogène entre intérieur et extérieur des ressorts, le diamètre intérieur étant le plus sollicité.

Le changement de matière passe obligatoirement par une modification de toute la gamme de grenailage. L'optimisation de cette opération impose l'adaptation des paramètres de la grenaille tels que diamètre, dureté, vitesse de grenailage et durée de grenailage à la dureté du matériau utilisé. Il apparaît que les gains en contraintes résiduelles sont plus importants dans le cas de l'acier Chrome-Silicium. Des essais de fatigue sont nécessaires pour valider ces gains en contraintes et feront l'objet d'une étude ultérieure. Cette dernière devrait également permettre d'étudier la stabilité des contraintes résiduelles en service liée aux phénomènes de fatigue et de fluage.

Le grenailage sous prédéformation apporte un gain en contrainte intéressant et une meilleure répartition pour le fonctionnement en service. Facilement applicable pour des ressorts à lames, cette solution reste très coûteuse pour le traitement série des ressorts hélicoïdaux et reste réservée à des ressorts prototypes ou de compétition.

Les différents gains constatés doivent être confirmés par des essais de fatigue. De même, des travaux futurs devraient permettre de chiffrer l'influence, sur les contraintes induites et sur la tenue à la fatigue, de l'opération de blocage à chaud qui suit le grenailage de précontrainte dans la gamme de fabrication des ressorts de soupapes.

Remerciements.

Nous remercions les sociétés ISRI FRANCE et PSA commanditaire de cette étude qui en autorisent la publication.

REFERENCES

- [1] Mattson R.L., Coleman W.S., " Effect of Shot-peening Variables and Residual Stresses on the Fatigue Life of Leaf-Spring Specimens ", SAE Transactions (1953), 546-556.
- [2]. Tissot M., Barret L., " Amélioration de la tenue en fatigue des ressorts par le grenailage ", 10ème conférence sur le grenailage de précontrainte. CETIM (1986), 197-205.
- [3]. Lu J., Flavenot J.F., " Influence des conditions de chargement et de grenailage sur les contraintes résiduelles introduites dans les ressorts à lames grenillées sous contraintes ", 10ème conférence sur le grenailage de précontrainte CETIM (1986), p 173-183.