

**RÔLE DU GRENAILLAGE SUR LA
DURÉE DE VIE EN TORSION ONDULÉE
D'UN ACIER A RESSORT TRAITÉ A
HAUT NIVEAU DE RÉSISTANCE**
(Influence of shot-peening on the life-time under pulsating
torsion stresses of high resistance level spring steel).

J. Heinrich, C. Mas, R. Lemaitre, J. P. Lumet and M. Bousseau

Etablissement Technique Central de l'Armement, Arcueil, France

ABSTRACT.

45SCD6 steel is used in the making of either spiral or longitudinal springs. Generally, after oil quenched, it is annealed in the temperature range of 425 to 450°C. In order to use it at a higher strength level, annealings at 200 and 300°C have been made.

Under torsion the yield strength can be greatly increased by overstraining.

Under pulsating torsion stresses ($R_S = 0,3$), for a 1370 MPa maximum stress, the life-time is about 65000 cycles.

A shot peening carried out after overstraining allows life time to reach $2 \cdot 10^6$ cycles.

KEYWORDS.

High yield strength steels - Spring steels - Toughness - Fatigue - Shot peening.

INTRODUCTION

L'acier 45SCD6 est utilisé pour la réalisation d'organes de suspension soit sous forme de ressorts hélicoïdaux (voitures de chemin de fer) soit sous forme de barres de torsion (véhicules blindés par exemple).

La teneur en carbone élevée (0,45%) ainsi que la présence de chrome et de molybdène favorisent l'existence de carbures stables qui durcissent la matrice ; le silicium retarde l'adoucissement au revenu et contribue à augmenter la limite d'élasticité.

La trempabilité de cet acier est satisfaisante.

Cet acier est habituellement utilisé à l'état trempé-revenu, la trempe étant effectuée à l'huile et le revenu pratiqué entre 420 et 450°C ; la limite d'élasticité ($R_{p0,2}$) est alors voisine de 1550 MPa.

Après avoir déterminé les caractéristiques de traction ($R_{p0,2}$, R_m , $A\%$) ainsi que la tenacité (K_{IC}) pour des températures de revenu de 200 et 300°C, le comportement en torsion sera examiné.

Comme acier à ressort il convient d'étudier sa tenue en fatigue ; la torsion ondulée a été retenue, car représentative du mode de sollicitation auquel peut être soumis une barre de torsion.

Afin d'améliorer la durée de vie il est nécessaire d'augmenter la durée de la phase d'amorçage ; le traitement de grenailage de précontrainte, en permettant de créer des contraintes superficielles de compression, doit contribuer à cette amélioration.

La place du traitement de grenailage dans la gamme de fabrication sera examinée.

Des mesures de contraintes résiduelles effectuées par diffraction de rayons X sur les éprouvettes avant essais de fatigue viennent compléter cette étude.

NATURE DE L'ACIER

L'acier 45 SCD 6 retenu pour cette étude a été élaboré au four électrique.

Il a été livré à l'état recuit sous forme de barres laminées de diamètre 65 et 32 mm.

Les compositions chimiques des deux coulées considérées sont données dans le tableau 1 : elles sont comparées aux valeurs limites relatives à cette nuance définies par la NFA 04-106.

TABLEAU 1 : Compositions chimiques des deux coulées étudiées

	% C	% Si	% Mn	% S	% P	% Cr	% Mo
suivant	0,42	1,30	0,50	-	-	0,50	0,15
NFA	0,50	1,70	0,80	0,025	0,030	0,75	0,30
Coulée $\varnothing = 65$	0,47	1,52	0,74	0,005	0,012	0,70	0,22
Coulée $\varnothing = 32$	0,46	1,48	0,70	<0,005	0,010	0,70	0,23

Les examens micrographiques avant attaque ont permis de déterminer la propreté inclusionnaire de chacune des coulées ; il s'agit d'un aspect important en ce qui concerne la tenue en fatigue [1] .

Sur 50 champs examinés seules des inclusions de type alumine et oxyde ont été mises en évidence. Le comptage, effectué selon la méthode D dans l'ASTM E 45, conduit à un indice moyen de 0,29 pour les inclusions du groupe B (alumine) et 1,32 pour celles du groupe D (oxydes).

REPOSE DE L'ACIER 45 SCD6 AUX TRAITEMENTS THERMIQUES

Le but de cette étude a été de déterminer les caractéristiques de l'acier 45SCD6 lorsqu'il est traité pour un niveau de limite d'élasticité supérieur ou égal à 1800 MPa.

Dans tous les cas, les traitements thermiques sont effectués sur les éprouvettes à l'état d'ébauche, ceci afin d'obtenir des caractéristiques mécaniques optimales et de pouvoir éliminer, lors de l'usinage de finition, une éventuelle couche décarburée, préjudiciable à la tenue en fatigue [2].

La gamme de traitement thermique retenue a été la suivante :

- Austénitisation sous vide (10^{-4} torr) 880°C - 30 mn,
- Trempe à l'huile,
- Revenu sous argon 2 h soit à 200 °C soit à 300 °C,
- Refroidissement à l'air.

Les caractéristiques de traction ont été déterminées sur des éprouvettes cylindriques à têtes filetées ayant un fût de 6 mm de diamètre, prélevées dans le sens de laminage.

Le facteur d'intensité de contrainte critique K_{IC} a été déterminé sur des éprouvettes de type RCT, de 20 mm d'épaisseur, de 60 mm de diamètre, ayant leur entaille orientée suivant un rayon.

Les valeurs indiquées dans le tableau 2 sont les moyennes des résultats obtenus sur quatre éprouvettes.

TABLEAU 2 : Réponse de l'acier 45 SCD 6 à des revenus à 200 et 300 °C

	$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa	A%	K_{IC} MPa \sqrt{m}
Revenu 200°C	1850	2100	7	40
Revenu 300°C	1800	2000	8	43

Le revenu à 300°C n'entraîne pas de diminution importante de la résistance (et de la limite d'élasticité) ; il en résulte un faible accroissement de la ténacité.

COMPORTEMENT EN TORSION

Pour l'ensemble des essais de torsion (statique, fatigue ou corrosion sous tension) un même type d'éprouvette est utilisé ; les dimensions des éprouvettes sont indiquées sur la figure 1.

Les ébauches, usinées à 0,3 mm des côtes finales, subissent le traitement thermique de trempe et revenu. La finition est obtenue par rectification en balayage avec meule de forme ; l'état de surface est caractérisé par une rugosité maximale $R_a = 0,2$.

Courbe de torsion statique.

La figure 2 donne l'allure d'une courbe de torsion ; le couple est porté en ordonnée et l'angle de déformation en abscisse. Une telle courbe ne traduit pas de façon fidèle le comportement du matériau ; elle englobe en particulier les déformations des têtes et du montage.

Quoi qu'il en soit à partir d'une telle courbe il est possible d'obtenir des indications, notamment la valeur du couple correspondant au passage élastique/plastique. Dans le domaine élastique la connaissance du couple de torsion permet de calculer la contrainte de torsion correspondante. Les résultats obtenus à partir de ces courbes de torsion sont regroupés dans le tableau 3.

TABLEAU 3 : Caractéristiques mécaniques en torsion

Revenu	Mt élastique N.m	τ élastique MPa	Mt rupture Nm	θ° rupture	Mt rupture / Mt élastique
200°C	560	845	1190	55	2,13
300°C	550	835	1150	90	2,09

Ces résultats mettent en évidence, d'une part, le relativement faible niveau de la limite d'élasticité, d'autre part, l'écart important entre le couple à rupture et celui correspondant au passage élastique. Un tel écart permet d'envisager l'augmentation de la limite d'élasticité par préconformage.

Réalisation du préconformage.

Différents travaux [3 - 4 - 5] ont montré le caractère bénéfique de l'opération de préconformage ; ce dernier permet en effet d'augmenter la limite d'élasticité du matériau et également de créer des contraintes de compression en surface, ce qui est favorable pour la tenue en fatigue.

Afin de pouvoir utiliser l'acier 45 SCD 6 à un niveau de contrainte élevé, le préconformage a été effectué de manière à porter la limite d'élasticité en torsion à des niveaux respectivement de 1400 et de 1450 MPa. Pour obtenir une stabilité mécanique du matériau, cinq préconformages successifs ont été effectués. L'évolution d'une courbe moment déformation est illustrée par la figure 2.

COMPORTEMENT EN FATIGUE

Les éprouvettes ainsi préconformées ont été sollicitées en torsion ondulée ($R_s=0,3$), à un niveau de contrainte très voisin de la nouvelle limite d'élasticité ($\tau_{max} = 1370$ MPa). Les essais ont été conduits sur un vérin hydraulique d'une capacité maximale de 2500 N.m, équipé d'un capteur de force de même capacité et d'une cellule de déplacement permettant la mesure d'angles de 0 à $\pm 50^{\circ}$.

Le plat usiné sur les têtes des éprouvettes permet de les serrer dans les mors par l'intermédiaire de deux clavettes pentées.

Afin d'éviter tout effort parasite de flexion ou de traction sur l'éprouvette au cours de l'essai de fatigue, sa fixation est assurée par l'intermédiaire d'un système à lames élastiques. Ce dispositif permet de compenser, d'une part, les défauts d'alignement de l'éprouvette par rapport à l'axe de la machine, d'autre part, les variations de longueur de l'éprouvette en cours d'essai.

Les durées de vie moyenne ainsi que l'estimation de l'écart type ont été déterminées conformément à [6]. Les valeurs obtenues, correspondant dans chaque cas à quatre essais, sont rassemblées dans le tableau 4.

TABLEAU 4 : Durée de vie en torsion ondulée.

Revenu	200°C		300°C	
Préconformage τ élastique MPa	1 400	1 450	1 400	1 450
log Ni	4.83199	4.83511	4.77042	4.79435
log Si	0.16630	0.13195	0.05387	0.19991
Durée de vie moyenne	67 919	68 408	58 941	62 280

Mis à part les résultats obtenus après un revenu à 300°C et un préconformage conduisant à une limite d'élasticité de 1 450 MPa, pour lesquels les dispersions sont relativement faibles, dans les autres cas les écarts sont plus importants (facteur 2 environ).

Il apparaît cependant que les durées de vie moyenne sont assez comparables.

A partir de ce faible nombre d'essais, l'analyse de la variance conduit à la conclusion que ces résultats ne sont pas significativement différents.

La rupture des éprouvettes se fait suivant l'un des quatre modes illustrés par la figure 3.

Dans tous les cas l'amorçage de la fissure de fatigue se fait en surface ; l'étendue de cette zone n'excède pas 3,5 mm².

INFLUENCE D'UN GRENAILLAGE DE PRECONTRAINTE SUR LE COMPORTEMENT EN FATIGUE.

Les résultats précédents ont montré qu'il était possible d'obtenir, sur des éprouvettes en acier 45SCD6, préconformées avant fatigue, des durées de vie moyenne en torsion ondulée d'environ 60 000 cycles, pour une contrainte de torsion maximale de 1370 MPa.

Dans le but d'augmenter la durée de vie un traitement de grenailage de précontrainte a été envisagé, afin de créer des contraintes superficielles de compression et donc d'augmenter la durée de la phase d'amorçage [7].

Les éprouvettes utilisées dans cette série d'essais sont identiques à celles employées précédemment.

Sauf exception mentionnée, chaque série d'essai a comporté six éprouvettes.

Les résultats obtenus en torsion ondulée ($R_s = 0,3$) pour un niveau de contrainte maximal de 1 370 MPa sont rassemblés dans le tableau 5.

Des essais préliminaires sur des pions en acier 45SCD6 ayant subi un traitement de revenu à 200°C ont permis de définir les paramètres de grenailage (nature et calibre des billes, distance, pression, durée...).

Sur ces pions, le taux de recouvrement a été estimé ; des mesures de contrainte résiduelles ont été effectuées.

Compte tenu des résultats obtenus, deux types de grenailage ont été retenus. Dans les deux cas des billes d'acier ont été utilisées.

Le grenailage a été effectué sur des éprouvettes ayant subi un revenu à 200°C et une série de cinq préconformages à 1 450 MPa.

Dans le premier cas, de billes de 1,39 mm de diamètre ont été utilisées, elles ont permis d'obtenir une intensité Almen égale à 10C. Pour un taux de recouvrement de 100 % la durée de vie moyenne a été de 376 000 cycles.

Dans le second cas les billes employées qui avaient un plus faible diamètre (0,58mm), ont conduit à une intensité Almen de 14 A, pour un taux de recouvrement de 100 % ; la durée de vie moyenne a dépassé 2 000 000 cycles avec une faible dispersion. Cette amélioration considérable par rapport à la solution non grenailée (facteur 30) a conduit à retenir le second type de grenailage pour la suite de l'étude.

En effectuant le grenailage 14 A sur des éprouvettes ayant subi un revenu à 300°C (au lieu de 200°C) la durée de vie moyenne reste du même ordre ($2 \cdot 10^6$ cycles). Ce résultat a confirmé la qualité du grenailage et la faible différence de comportement en fatigue, que le revenu soit effectué à 200 ou à 300°C.

D'autres essais ont été réalisés en effectuant un revenu de 2h à 200°C après le grenailage 14A ; la durée de vie est retombée à 355 000 cycles.

En effectuant sur les éprouvettes à l'état revenu le grenailage puis le préconformage la durée de vie ne dépasse pas 200 000 cycles.

L'ensemble des résultats obtenus est rassemblé dans le tableau 5.

TABLEAU 5 : Influence du grenailage de précontrainte sur la durée de vie.

	Rev 200°C Pc = 1450 MPa Référence	Ref + G10C	Ref + + G14A	Rev 300°C + G14A	Ref + G14A +Rev 200°C	Rev 200°C +Gr14A+PC
: log N:	4.83511	5.57546	6.31816	6.30144	5.55124	5.40487
: log s:	0.13195	0.15605	0.11975	0.21894	0.28750	0.16083
: N	68 408	376 237	2 080 454	2 001 889	355 831	254 020

Les éprouvettes ayant subi le revenu à 200°C et le grenailage 14A présentent toutes une rupture en sifflet (Cf. fig.3c). Pour les autres les ruptures sont mixtes (fig.3a,b,d)

Les examens des faciès de rupture révèlent que dans la majorité des cas l'amorçage de la fissure de fatigue se fait à quelques dixièmes de millimètre de la surface, dans certains cas, sur une inclusion.

MESURE DES CONTRAINTES RESIDUELLES.

Pour réaliser les mesures par diffraction X, l'éprouvette a été positionnée sur le goniomètre par l'intermédiaire d'un montage entre pointes.

Les mesures de contrainte ont été effectuées pour différentes directions \varnothing ; seules les valeurs obtenues dans le sens long figurent dans le tableau 6.

Après trempe les contraintes superficielles sont en tension, une rectification fine permet d'obtenir des contraintes de compression qui sont peu modifiées par le préconformage. Le grenailage permet de créer des contraintes de compression élevées ; le grenailage 14A fournit les contraintes les plus élevées. Un revenu après grenailage entraîne une diminution des contraintes.

TABLEAU 6 : Contraintes résiduelles introduites par le grenailage de précontrainte.

	Trempe (1)	(2)	(3)	(3)	(3)+14A	(2)+14A
	+	+	+	+	+	+
	revenu:Rectif.	Préconf.	10 C	14 A	Rev 200°	Préconf.
	= (1)	= (2)	= (3)			
σ MPa:	+ 225	- 375	- 358	- 870	- 1095	- 670
σ MPa:	+ 45	+ 70	+ 54	+ 140	+ 80	+ 50

CONCLUSION.

Cette étude montre que l'acier 45SCD6 habituellement utilisé à des températures de revenu de 425 - 450°C, peut également être employé, pour des applications particulières où un très haut niveau de résistance est exigé, à des températures de revenu de 200 ou 300°C.

En utilisant le préconformage il est possible d'augmenter de façon importante la limite d'élasticité en torsion du matériau.

En torsion ondulée ($R = 0,3$) pour une contrainte maximale voisine de la limite d'élasticité, la durée de vie moyenne est de 65 000 cycles.

Un grenailage avec des billes d'acier de 0,58 mm, de diamètre, permet d'obtenir une intensité Almen égale à 14 A. Les contraintes de compression mesurées par diffraction X atteignent 1 000 MPa. Un tel traitement permet d'atteindre une durée de vie moyenne de 2.10^6 cycles avec une dispersion assez faible.

Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque le grenailage est effectué en dernière opération.

REFERENCES.

1. BRUNET J.C - HUGO M - BELLOT J - Mem. Scient. Rev. Métallurgie 76. juillet 1979 pp.425.436.
2. MARTOT J.L - HUGO M - BRUNET J.C - Influence de l'état de surface sur la résistance à la fatigue des aciers pour ressorts traités, Traitements Thermiques n°150 - 1980 pp.29.36.
3. DE FOUQUET J.- LEVASSEUR M. Effet d'une limite élastique supérieure sur la déformation par torsion. Rev. Française de Mécanique - 1963.
4. NAUDIER F. Stabilité des contraintes résiduelles sous sollicitations dynamiques - I.S.M.C.M 29 nov. 1977.
5. HAYASHI K - DOI S. Influence du travail par déformation plastique en torsion sur la résistance à la fatigue de l'acier au carbone. Journal of the Society of Material Science - Japon - Vol.20 n°219 - 1971 pp.1300.1306.
6. Traitement statistique des données de la courbe de Wöhler (courbes P.S.N) - Recommandation du groupe Fatigue de la Société Française de Métallurgie.
7. FLAVENOT J.F - NIKU.LARI A. Le grenailage de précontrainte. Note Technique n°15 du CETIM - 1976.

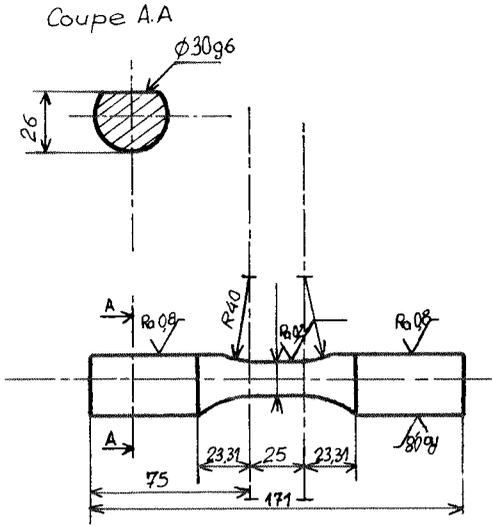


Fig. 1 : Dimension d'une éprouvette de torsion

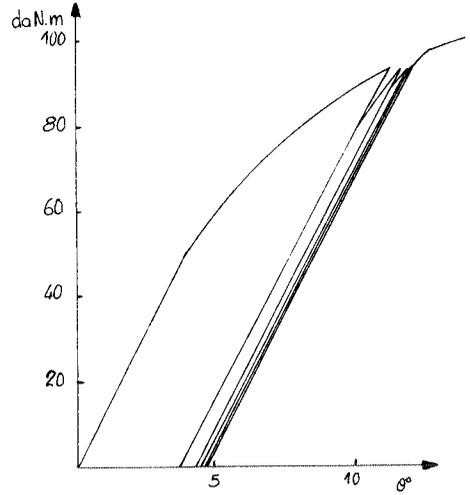


Fig.2 : Courbe Moment-déformation
Rôle du préconformage

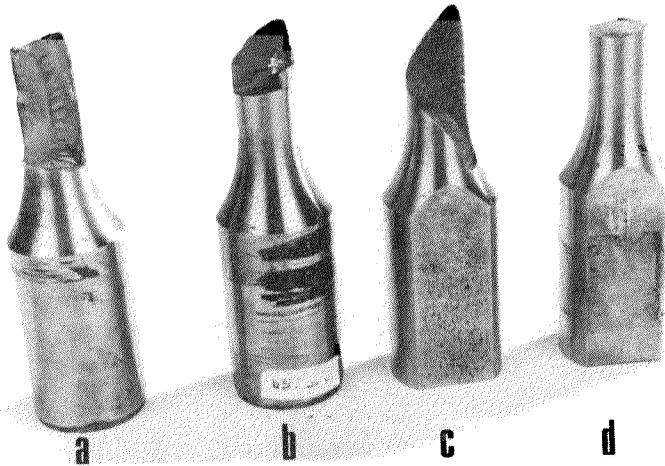


Fig. 3 : Différents modes de rupture.