

INFLUENCE DU GRENAILLAGE DE PRÉCONTRAINTE SUR LA TENUE EN FATIGUE ET SUR LA CORROSION SOUS TENSION DES ALLIAGES D'ALUMINIUM DES SÉRIES 5000 ET 7000

Mme Gaillard.* MM. Chouvy,* Blechet.* Moguerou.* et Dauphin**

*Attachés aux Services Techniques de la Défense Nationale,
*Service Technique des Constructions et Armes Navales, Paris, France
**Direction des Constructions et Armes Navales de Lorient, France*

ABSTRACT

Tests have been carried out on butt-joints welded by MIG method with reinforcement off or as welded. Shot peening introduces in surface stresses of compression of 170 to 200 MPa, which have been determined by X-ray diffraction. The affected layer is .3 mm thick, whereas the pre-strained zone determined by micro-hardness measurements is .25 mm thick.

The following aluminium alloys have been tested : 5086, 5083 H116 and H323, 7020 and a A-G4Z2 type. Corrosion fatigue tests have been carried out in a buffered salt solution (artificial sea-water), whereas stress corrosion tests have been carried out either in the artificial sea-water, or in a bichromate solution of pH3. The improvement on fatigue and corrosion fatigue strength is :

- for plain plate : 20 % for each case,
- for joints with reinforcement off : 15 to 100 % for fatigue and about 50 % for corrosion fatigue,
- for joints as welded : 80 % for some cases.

Stress corrosion results are note significant. The exfoliation corrosion of 7020 welded joints alloy is not modified by shot peening traitement.

KEYWORDS

Aluminium alloys ; butt-joints ; fatigue ; corrosion fatigue ; stress-corrosion ; shot-peening.

1 - INTRODUCTION

En Constructions Navales, les structures en alliages d'aluminium permettent des allègements très précieux sur les structures équivalentes en acier, mais les soudures de ces alliages présentent une tenue en fatigue, particulièrement en fatigue sous corrosion, faible par rapport à leur résistance à la rupture.

Le grenailage de précontrainte est susceptible d'améliorer cette tenue en fatigue et éventuellement la tenue en corrosion.

Aussi a-t-on évalué l'intérêt du grenailage de précontrainte pour différents alliages d'aluminium : 5083, 5086, 7020 et CP 43 (A-G4Z2).

La tenue de ces alliages en fatigue, fatigue sous corrosion et corrosion sous contrainte, a été évaluée sur des éprouvettes extraites de joints soudés.

On a déterminé le niveau et la répartition des contraintes engendrées par le grenailage ainsi que l'épaisseur de la zone plastifiée.

2 - ALLIAGES ETUDIÉS - CONDITIONS DE SOUDAGE - CONFECTION ET PARACHE-
VEMENT DES EPROUVETTES - CARACTERISTIQUES MECANIQUES

Les alliages étudiés se présentent sous forme de tôles de 3, 4, 6 et 20 mm d'épais-
seur. Leur composition chimique est donnée dans le tableau I.

TABLEAU I - ALLIAGES ETUDIÉS

| ! Nuance et état | ! Epaisseur de la tôle en mm | ! Composition chimique | | | | | | | |
|--------------------------|------------------------------------|------------------------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--|
| | | ! Mg % | ! Zn % | ! Mn % | ! Cr % | ! Cu % | ! Si % | ! Fe % | |
| ! 5086 H22! | ! 4 | ! 4,12 | ! - | ! 0,36 | ! 0,09 | ! - | ! - | ! - | |
| ! 5083 H116! | ! 3 | ! 4,44 | ! - | ! 0,67 | ! 0,10 | ! - | ! - | ! - | |
| ! 5083 H323! | ! 3 | ! 4,90 | ! - | ! 0,63 | ! 0,08 | ! - | ! - | ! - | |
| ! CP43 H24! (A-G4Z2)! | ! 6 | ! 4,57 | ! 2,63 | ! 0,01 | ! 0,01 | ! 0,01 | ! 0,02 | ! 0,20 | |
| ! 7020 T6 ! | ! 6 et 20 | ! 1,20 | ! 4,40 | ! 0,04 | ! 0,22 | ! 0,054 | ! 0,11 | ! 0,20 | |

Il s'agit pour tous les alliages de soudure à franc-bord, par procédé MIG, le métal d'apport est soit l'alliage 5183 (A-G5MC), soit l'alliage 5280 (A-Z4G2).

Le tableau II donne le parachèvement et le traitement thermique éventuel des éprouvettes après soudage. Le parachèvement consiste soit en un arasage du cordon, soit en un grenailage, soit en un arasage suivi de grenailage.

Le traitement thermique concerne l'alliage 7020 qui a été étudié soit simplement mûri après soudage : état T4, soit revenu : état T6 (24 h à 100° C + 24 h à 120° C après séjour d'une semaine à l'ambiante).

Le traitement de grenailage a été appliqué aux faces et aux chants des éprouvettes sur une bande encadrant le cordon de soudure.

Les paramètres du grenailage ont été déterminés et contrôlés avec des éprouvettes ALMEN en aluminium.

TABLEAU II - PARACHEVEMENT ET TRAITEMENT THERMIQUE DES EPROUVETTES

| ! Alliage | ! Etat du cordon de soudure | ! Traitement thermique |
|-------------------|---|--|
| ! 5083 | ! non arasé ! non arasé et grenailé | ! sans |
| ! CP43 | ! non arasé ! non arasé et grenailé ! arasé | ! sans |
| ! 7020 ! 6 mm | ! arasé ! arasé et grenailé | ! sans état mûri T4 avec ! traitement T6 (24 h à 100°C ! précédé d'un séjour de 1 se- ! maine à l'ambiante après ! soudage). |
| ! 7020 ! 20 mm | ! arasé | ! sans |

Les caractéristiques mécaniques des tôles de base et des joints soudés sont don-
nées dans le tableau III.

TABLEAU III - CARACTERISTIQUES MECANIQUES

| Alliages | Type d'éprouvettes | Rp 0,2 (MPa) | R (MPa) | A % | |
|-----------|--------------------------------|-----------------|------------|-----|--|
| 5086 H22 | Tôle de base | 240 | 320 | 16 | |
| | Joint soudé - Cordon non arasé | (156) | 274 | | |
| 5083 H116 | Tôle de base | 204 | 324 | 20 | |
| | Joint soudé - Cordon non arasé | (166) | 284 | | |
| 5083 H323 | Tôle de base | 264 | 357 | 18 | |
| | Joint soudé - Cordon non arasé | (175) | 302 | | |
| CP 43 | Tôle de base | 240 | 360 | 16 | |
| | Joint soudé - Cordon non arasé | (233) | 357 | | |
| | Joint soudé - Cordon arasé | (200) | 332 | | |
| 7020 | Tôle de base | 334 | 378 | 18 | |
| | Tôle de base grenillée | 330 | 372 | 17 | |
| | Joint soudé | T4 | (209) | 328 | |
| | Fil 5280 | T4 grenillées | (231) | 344 | |
| | Cordon arasé | T6 | (270) | 344 | |
| | | T6 grenillées | (292) | 342 | |
| | Joint soudé - fil 5183 | T4 | (206) | 312 | |
| | Cordon arasé | T6 | (238) | 320 | |

3 - MODIFICATION DE SURFACE INDUITE PAR LE GRENAILLAGE

Les contraintes résiduelles de grenailage et de soudure ont été mesurées par diffractométrie des rayons X sur l'alliage 5086 à l'état H22 dans la direction perpendiculaire au cordon de soudure.

Dans le cas des joints soudés non grenillés les plages à analyser ont été préparées par polissage électrolytique. Les surfaces grenillées ont été laissées en l'état.

Pour l'étude de la distribution des contraintes dans l'épaisseur de la tôle, l'enlèvement de matière a été réalisé uniquement par polissages électrolytiques successifs et les mesures ont été effectuées à une distance suffisamment éloignée du cordon de soudure pour éviter toute perturbation. Les résultats sont représentés graphiquement dans la figure 1. Il existe, en surface, une contrainte de compression de 170 MPa qui croît jusqu'à 210 MPa à environ 0,06 mm de la surface puis décroît pour s'annuler à 0,4 mm. La contrainte se stabilise ensuite à une valeur de 60 MPa en traction.

Les contraintes résiduelles superficielles ont été mesurées sur les deux faces de l'éprouvette suivant une ligne normale au plan de symétrie du cordon de soudure et en différents points distants de 3 mm environ. Les contraintes mesurées sur cordon brut et sur cordon grenillé sont données dans le tableau IV. On constate que le soudage introduit des contraintes résiduelles relativement modérées (amplitude inférieure à 50 MPa) en traction sur une face, en compression sur l'autre, et qu'après grenailage, les contraintes mesurées près du cordon de soudure sont de

l'ordre de 170 MPa en compression, soit 70 à 100 % de la limite d'élasticité en traction du matériau (voir tableau IV, 5086 H22).

On a observé les modifications micrographiques provoquées par le grenailage de précontrainte. La déformation superficielle engendrée par le grenailage est visible sur environ 0,1 mm sur coupe au microscope optique. Des mesures de microdureté (sous charge de 50 g) ont été effectuées selon des filiations dans l'épaisseur au niveau du cordon de soudure puis à 5 et 15 mm du pied du cordon de soudure. Ces résultats sont présentés à la figure 2. On constate que, quel que soit l'emplacement de la mesure, l'écroûissage provoqué par le grenailage s'étend sur 0,25 à 0,30 mm de profondeur.

Ces résultats sont en accord avec les observations faites par diffractométrie des rayons X. On constate en effet que la largeur à mi-hauteur des raies de diffraction, qui est une fonction croissante du taux d'écroûissage, n'évolue plus après une profondeur de 0,3 mm.

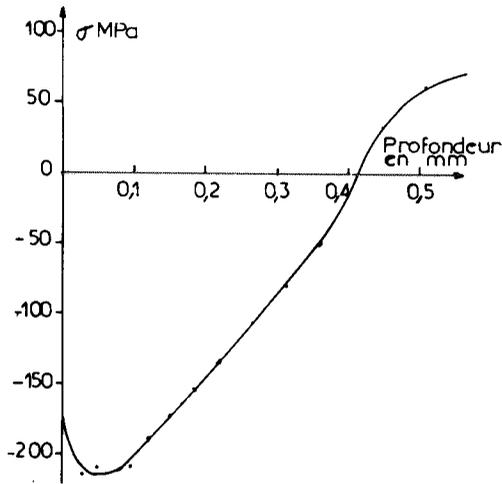


Fig. 1. Alliage 5086 H22 (épaisseur 4 mm)
Répartition des contraintes résiduelles, engendrées par un traitement de grenailage, dans l'épaisseur d'une tôle.

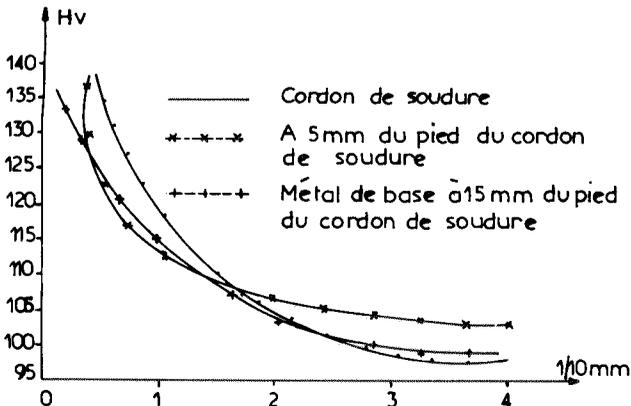


Fig. 2. Alliage 5086 H22
Témoin soudé grenailé - courbes de microdureté.

TABLEAU IV - VALEURS DES CONTRAINTES RESIDUELLES AVANT ET APRES
TRAITEMENT DE GRENAILLAGE

| Distances à l'axe du cordon de sou- dure (en mm) | Contraintes résiduelles transversales (en MPa) | | | |
|--|--|----------------------|----------------------------|----------------------|
| | face envers de la soudure | | face endroit de la soudure | |
| | avant grenaillage | après grenaillage | avant grenaillage | après grenaillage |
| 10,5 | - 36 + 4 | - 175 + 24 | + 27 + 8 | - 182 + 20 |
| 16,5 | - 33 + 8 | - 167 + 15 | + 33 + 7 | - 192 + 19 |

4 - ESSAIS DE FATIGUE

Les essais ont été réalisés en traction-compression ($R_s = -1$) à une fréquence de 110 à 150 Hz. Pour les essais sous corrosion, la partie utile des éprouvettes était incluse dans une cellule en ALTUGLAS dans laquelle circulait, en circuit fermé, 2 litres environ de réactif A3 défini par la norme AIR 0754. Ils ont été poursuivis jusqu'à 15 000 000 de cycles, et conduits selon la méthode de l'escalier.

L'ensemble des résultats des essais de fatigue est donné dans la figure 3. On remarque que pour l'ensemble des alliages étudiés, l'arasage du cordon et le grenaillage de précontrainte contribuent l'un et l'autre à une amélioration substantielle de la résistance à la fatigue et à la fatigue sous corrosion des joints soudés. En fatigue, cette amélioration est de 85 % à 100 % pour les deux modes de parachèvement. En fatigue sous corrosion les améliorations sont également importantes et permettent d'approcher, si ce n'est d'égaliser, les valeurs obtenues pour les tôles de base.

Il faut rappeler que d'autres facteurs comme la géométrie du cordon ou la présence de porosités jouent des rôles prépondérants et que leur effet ne peut pas toujours être éliminé par une méthode de parachèvement. C'est probablement le cas du témoin soudé en alliage 5083 H116 pour lequel la valeur de résistance à la fatigue sous corrosion demeure faible après grenaillage comparée à celles des témoins en alliages CP 43 et 7020.

Enfin, en règle générale, les améliorations dues aux deux méthodes de parachèvement ne sont pas cumulatives.

En ce qui concerne la tôle de base, le gain apporté par le grenaillage est égal à 20 % aussi bien en fatigue qu'en fatigue sous corrosion (résultats obtenus sur l'alliage 7020).

5 - ESSAIS DE CORROSION SOUS TENSION

Les essais ont été effectués uniquement sur alliage 7020 en traction, sous charge constante, avec des dispositifs munis d'un ressort, les éprouvettes étant chargées à 75 % de leur limite d'élasticité. Deux sortes de solutions ont été utilisées :

- la solution A3
- une solution intitulée B contenant du bichromate de sodium :
 - . Cl Na : 2 %
 - . Bichromate de sodium : 0,5 %
 - pH ajusté à 3 au moyen d'acide chlorhydrique.

Tous les essais ont été réalisés en immersion-émersion avec le cycle suivant : 10 minutes d'immersion - 50 minutes d'émersion, la température de la solution étant maintenue à 25° C. La durée de l'essai est de 30 jours.

Les résultats des essais sont donnés dans le tableau V.

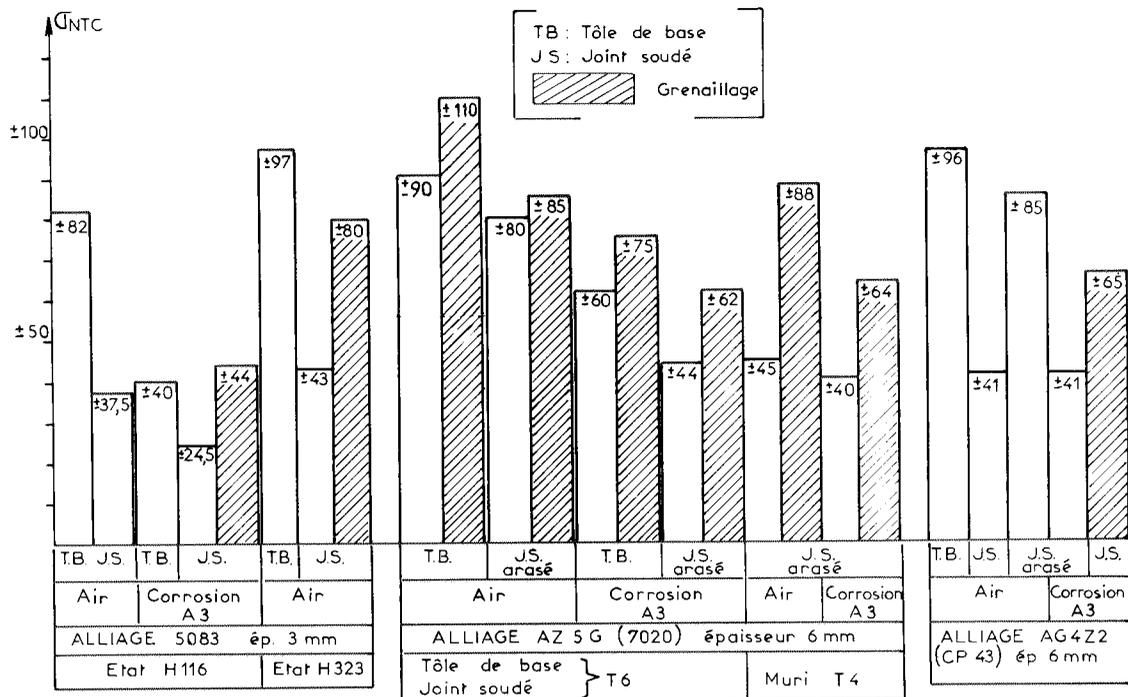


Fig. 3. Récapitulation comparative de résultats d'essais de fatigue sur trois alliages légers. Influence du grenailage de précontrainte.

TABLEAU V - RESULTATS DES ESSAIS DE CORROSION SOUS TENSION

| Définition de l'échantillon | *Essais dans solution A3 | Essais dans solution B |
|----------------------------------|--------------------------|---|
| Tôle de base état T6 | 4 épr N.G. | pas de rupture |
| | 4 épr G.R. | pas de rupture |
| Joint soudé avec fil 5280, arasé | 4 épr N.G. | 2 ruptures à 181 h (7,5 j) et 672 h (28 j) |
| | 4 épr G.R. | Très légères traces de corrosion en ZAT. |
| Joint soudé avec fil 5183, arasé | 4 épr N.G. | 1 rupture à 41 h. Piqûres sur 2 éprouvettes. |
| | 4 épr G.R. | 1 rupture à 210 h (9 j) Piqûre sur 1 éprouvette. |
| Joint soudé avec fil 5183, arasé | 4 épr N.G. | 1 rupture en 312 h (13 j) (***) Légère corrosion en ZAT |
| | 4 épr N.G. | Légères traces corrosion en ZAT. |

* épr. N.G. : éprouvettes non grenillées - épr. G.R. : éprouvettes grenillées
 ** épreuve déformée accidentellement au cours du montage.

On peut retenir de ces essais que :

- l'alliage 7020 à l'état soudé, avec cordon de soudure arasé, ne montre qu'une sensibilité modérée au phénomène de corrosion sous tension.
- cette sensibilité est plus accusée dans le cas où la soudure a été réalisée avec du fil 5280 qu'avec du fil 5183.
- le grenailage ne semble pas apporter d'amélioration notable sur la résistance à la corrosion sous tension, mais les cas de rupture sont trop peu nombreux pour qu'on puisse être vraiment affirmatif.
- en ce qui concerne la corrosion feuilletante, le grenailage se montre inefficace à long terme contre ce type d'agression.

6 - FATIGUE A FAIBLE NOMBRE DE CYCLES

Les essais précédemment cités concernent l'amélioration de la tenue en fatigue à 15 000 000 de cycles. On cherchait à améliorer la tenue à faible nombre de cycles mais à fortes sollicitations de pièces en alliage 7020 soudé. Nous avons estimé l'influence du grenailage de précontrainte sur des éprouvettes soudées de 20 mm d'épaisseur soumises à trois niveaux (160, 180 et 200 MPa) en sollicitations répétées ($R = 0$).

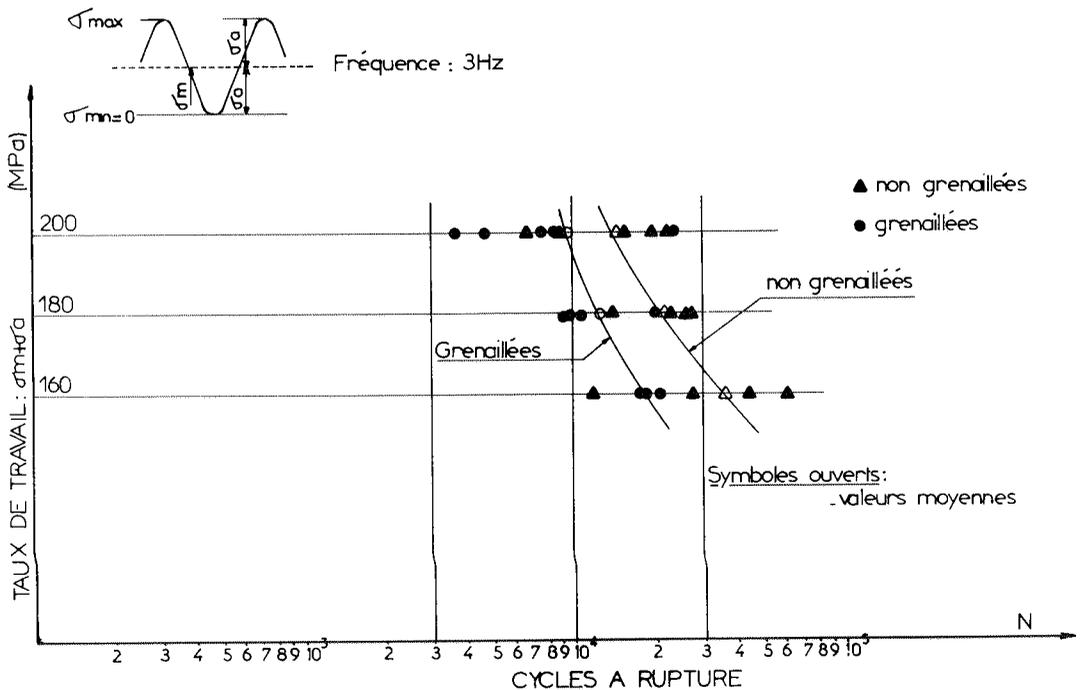


Fig. 4 - Essais de fatigue en traction répétée ($R = 0$) sur joints soudés en alliage 7020.

Les résultats de ces essais sont indiqués sur la figure 4 représentant une portion de la courbe de WOHLER pour les éprouvettes grenillées et non grenillées. On constate un effet inattendu : le grenillage de précontrainte diminue la durée de vie des éprouvettes. Un examen attentif de leur surface montre que le grenillage a fait déboucher des porosités qui étaient situées sous la peau au niveau de la racine du cordon de soudure. Il en résulte une augmentation des concentrations de contraintes favorisant l'amorçage des fissures de fatigue.

7 - CONCLUSION

Ces différents essais permettent d'évaluer l'efficacité du grenillage de précontrainte à la bille de verre comme moyen de parachèvement de tôles et surtout de joints soudés en alliages d'aluminium des séries 5000 et 7000.

Si les caractéristiques mécaniques ne sont pratiquement pas affectées par ce traitement (alliage 7020) en revanche la résistance à la fatigue est nettement améliorée dans de nombreux cas. Cette amélioration se situe à 20 % sur la tôle (alliage 7020) et varie de 85 à 100 % sur les joints soudés bruts. La résistance à la fatigue sous corrosion est améliorée de 80 à 200 % sur joint soudé avec cordon brut et de 40 à 60 % sur joint soudé avec cordon arasé.

Ces améliorations sont la conséquence de la formation d'une couche écrouie dont l'épaisseur est voisine de 0,3 mm dans laquelle existent des contraintes de compression, dont la valeur maximale mesurée par diffractométrie X atteint 170 MPa, c'est-à-dire un niveau voisin de la limite d'élasticité des joints soudés.

Le bénéfice du grenillage ne se cumule cependant pas avec celui d'un traitement tel que l'arasage du cordon. En présence d'alignements de porosités le grenillage de précontrainte peut avoir un effet néfaste sur la tenue en fatigue, c'est ce qui a été constaté en fatigue à faible nombre de cycles sur l'alliage 7020.

Enfin, le grenillage de précontrainte a une influence mineure sur le comportement de l'alliage 7020 soudé, en corrosion sous tension. La légère amélioration de la résistance à la corrosion feuilletante se révèle éphémère.

En définitive, le traitement de grenillage de précontrainte appliqué aux alliages d'aluminium sera surtout utilisé pour l'amélioration des performances en fatigue et en fatigue sous corrosion des assemblages soudés. Encore faut-il s'assurer que les soudures sont saines.