

Tenue a la Corrosion sous Contrainte d'un Acier Inoxydable

Influence de l'état de surface

A. Niku-Lari (CETIM, Etablissement de SENLIS) FRANCE

M. Meniel et M. Beranger

(Université de COMPIEGNE) FRANCE

RESUME

L'importance des phénomènes de corrosion sous contrainte n'est plus à démontrer. On sait que beaucoup d'ensembles mécaniques y sont soumis notamment lorsqu'ils se trouvent sous l'action combinée d'un milieu agressif et de contraintes mécaniques de tension. Ces contraintes peuvent être internes et sont dites alors « contraintes résiduelles » ou externes et sont dites alors « contraintes de service ».

La fissuration par corrosion sous contrainte est influencée en particulier par la nature du couple matériau-milieu que l'on définit généralement par les paramètres suivants :

- composition chimique et structure du matériau,
- état de surface de la pièce,
- état des contraintes résiduelles superficielles (exprimé ici par l'intensité de grenailage),
- niveau de la contrainte de service,
- composition chimique du milieu corrosif.

Nous avons donc entrepris une série d'essais destinés à préciser l'influence de l'état de surface sur la tenue à la fissuration par corrosion sous tension d'un acier inox Z6 CN 18.9. Nous avons étudié en particulier l'influence de différents traitements de polissage et de grenailage sur ce phénomène.

INTRODUCTION

La corrosion sous contrainte est un phénomène mécanique dont les conséquences peuvent, dans certains cas, se révéler catastrophiques. A titre d'exemple, la figure 1 montre un tube en acier inoxydable Z 6 CN 18.9 fissuré par corrosion sous contrainte, les fissures traversantes ayant entraîné la rupture de la pièce. De même la figure 2, présente un cas spectaculaire de fissuration d'un autoclave réalisé dans la même nuance d'acier.

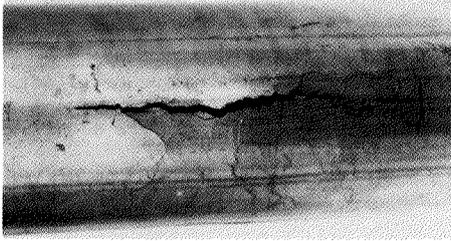
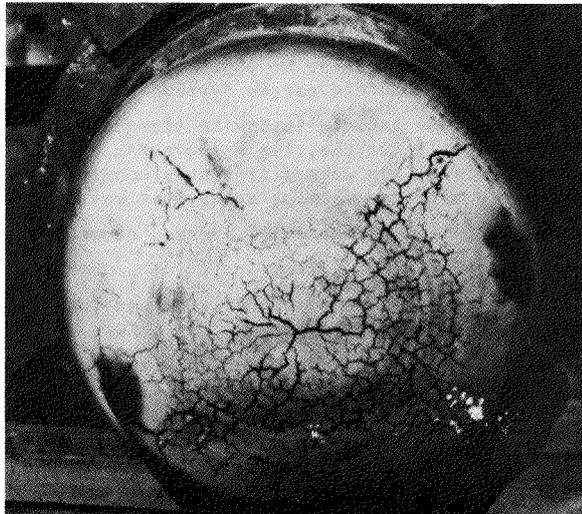


FIGURE 1

Corrosion sous contrainte d'un tube en acier Z 6 CN 18.9

FIGURE 2

Fissuration par corrosion sous contrainte d'un autoclave, d'après [2]



C'est pourquoi nous avons porté un intérêt particulier à ce problème en réalisant des essais comparatifs destinés à préciser l'influence de différents traitements de surface pour améliorer la tenue à la corrosion sous contrainte d'un acier. Les essais ont été effectués sur des éprouvettes en forme de <<U>> réalisées dans un acier inox Z 6 CN 18.9 dont la composition chimique est donnée au tableau 1.

		<u>Tableau 1</u>
Chrome	17,74	Composition chimique en % de l'acier inox Z 6 CN 18.9
Nickel	9,81	
Magnésium	1,62	
Silicium	0,61	
Molybdène	0,13	

Ce matériau avait subi un traitement thermique de sensibilisation, réalisé à 650°C, pendant 3 heures et sous atmosphère d'argon.

Différents traitements de surface ont été appliqués aux éprouvettes :

- Polissage manuel sur du papier de grade 80 à l'oxyde d'aluminium utilisé à sec ;
- Polissage manuel sur du papier de grade 280 au carbure de silicium humide ;
- Polissage manuel sur du papier de grade 1 000 au carbure de silicium humide ;
- Micro-sablage humide ;
- Grenailage de précontrainte .

LES TRAITEMENTS DE GRENAILLAGE DE PRECONTRAINTE

Il est bien connu que le grenailage de précontrainte, en créant des contraintes résiduelles de compression dans des couches superficielles du matériau, améliore considérablement la tenue à la fatigue et à la corrosion sous contrainte des pièces. Le contrôle de cette opération est généralement effectué dans l'industrie par le système dit Almen [1] [2].

Afin d'obtenir une gamme d'intensité Almen recouvrant celles habituellement utilisées dans l'industrie, les éprouvettes ont subi des grenailages de précontrainte réalisés dans différentes conditions industrielles. Les paramètres de grenailage que nous avons fait varier ont été les suivants :

- nature des billes (acier coulé, verre, céramique électrofondue réfractaire) ;
- diamètre des grenailles ;
- vitesses de projection (caractérisées par les pressions d'air ; 2, 3 et 4 bars).

Les diagrammes de la figure 3 montrent les courbes de saturation obtenues pour ces différents traitements.

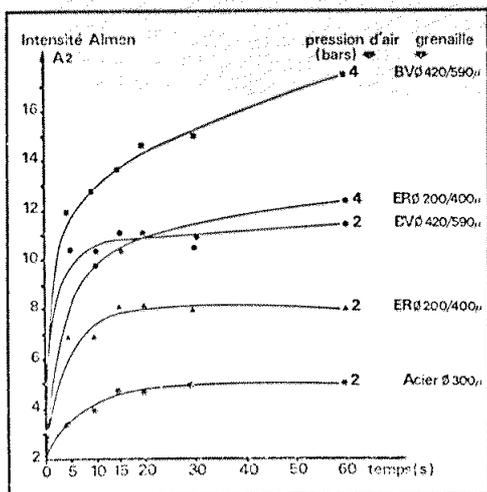


FIGURE 3

Comparaison des courbes de saturation obtenues pour les différents traitements de grenailage de précontrainte.

On constate d'une manière générale que l'intensité Almen augmente avec le diamètre des billes et la pression d'air. A diamètre égal (0,25 - 0,42 mm), les intensités Almen obtenues par billes électrofondues réfractaires sont sensiblement identiques à celles obtenues pour les billes de verre. Le tableau II précise les intensités Almen pour chaque type de grenailles après 20 secondes de grenailage.

Type de grenailles	Composition chimique (%)	Diamètre (mm)	Intensité Almen A2 (1/1 000 inch) pour		
			$P_a = 2 \text{ bar}$	$P_a = 3 \text{ bar}$	$P_a = 4 \text{ bar}$
Billes en acier coulé	C (1,6) Si (0,3) Mn (0,25) S (0,018) P (0,022)	0,3 0,4	4,7 —	— —	— —
Billes en verre	SiO ₂ (71,1) MgO (3,4) Al ₂ O ₃ (4,8) Na ₂ O (13,5) CaO (8,2) K ₂ O (0,4) divers	0,15-0,25	4	—	5,5
		0,25-0,42 0,42-0,59	8 11	9,5 —	11,5 14
Billes électrofondues réfractaires	ZrO ₂ (68,7) SiO ₂ (31) Al ₂ O ₃ (0,2) Fe ₂ O ₃ + TiO ₂ (0,1)	0,2,0,4 0,4,0,6	8 —	— —	11 —

TABLEAU II

Caractéristiques des grenailles et intensités Almen après 20 secondes de grenailage.

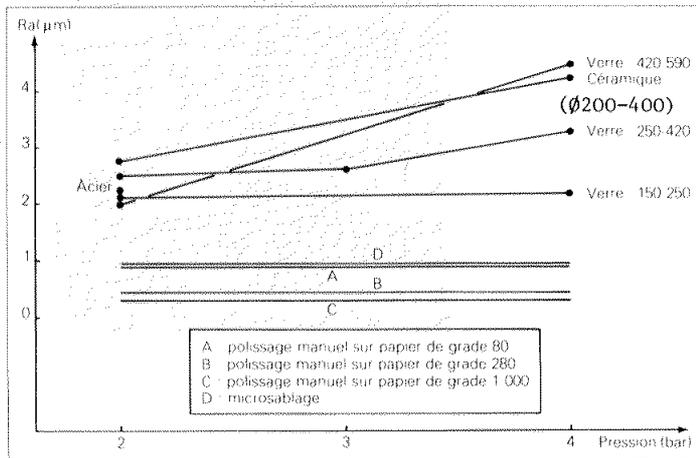
La composition chimique des billes en acier coulé utilisées se rapproche de celle d'une fonte décarburée. Elle n'est donc pas représentative des grenailles en acier coulé utilisées couramment en Shot-peening.

CARACTERISATION ET MORPHOLOGIE DES SURFACES

Le diagramme de la figure 4 montre l'évolution de la rugosité Ra obtenue sur les éprouvettes grenillées en fonction de la pression d'air. A titre indicatif, nous avons reporté sur ce même diagramme les valeurs de la rugosité obtenue avec différents types de polissage ainsi que par microsablage.

FIGURE 4

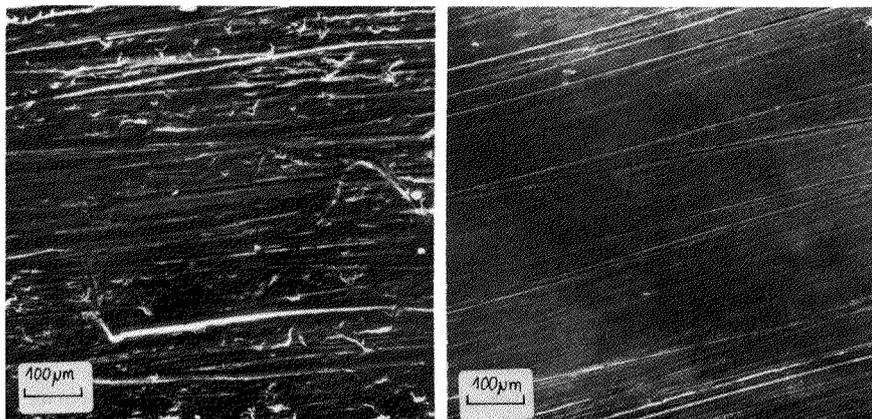
Rugosités superficielles en fonction de la pression d'air.



On constate que, pour les faibles pressions d'air, l'étendue de la variation de Ra en fonction du diamètre et de la nature des grenailles est faible. La différence entre les rugosités obtenues à l'aide de différentes grenailles est beaucoup plus importante pour la pression de 4 bar .

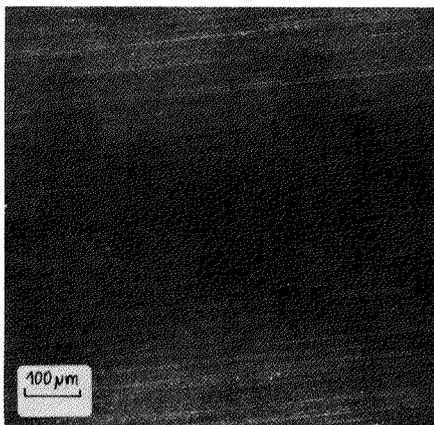
Dans ce cas, ce sont la bille de verre (\varnothing 0,42 - 0,59 mm) et la bille de céramique (\varnothing 0,2 - 0,4 mm) qui donnent la plus forte valeur de la rugosité de surface.

Les micrographies de la figure 5 montrent les différents aspects de surface obtenus par l'opération de polissage. On constate une réduction de la profondeur des stries lorsque la granulométrie du papier diminue.



a) sur papier de grade 80

b) sur papier de grade 280



c) sur papier de grade 1 000

FIGURE 5 : Aspects de surface obtenus pour trois types de polissage manuel

On remarque d'autre part des blessures superficielles dans le cas du polissage grossier (papier n° 80). Ces blessures peuvent être le siège privilégié de concentrations de contraintes de service et conduire à une aggravation de la tenue à la corrosion sous contraintes du matériau.

Les micrographies des figures 6 et 7 montrent la morphologie de surface des éprouvettes ayant subi respectivement un traitement de microsablage et un traitement de grenaillage.

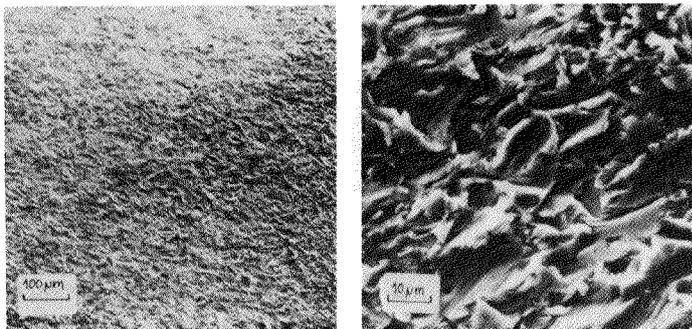


FIGURE 6 : Morphologie de surface des éprouvettes microsablées

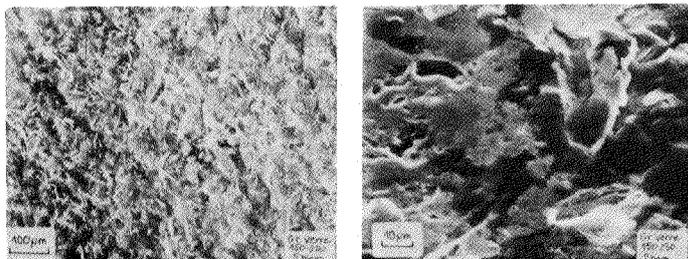
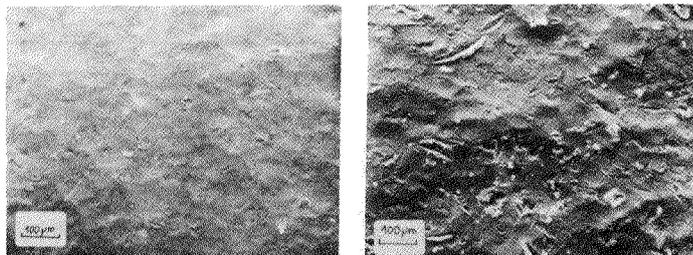


FIGURE 7 : Morphologie de surface des éprouvettes ayant subi un grenaillage par billes de verre : diamètre des grenailles : 150 à 250 µm , pression d'air : 2 bar

En ce qui concerne le microsablage ou le traitement de grenaillage par billes de verre, des examens par microscopie électronique à balayage ont montré que l'aspect de surface était très tourmenté. En effet, les angles vifs des grains de sable ou de billes de verre cassées conduisent à des arrachements de matière qui sont siège privilégié de concentration de contraintes. Les fissures de corrosion sous contraintes peuvent s'amorcer plus facilement au fond de ces entailles.

L'aspect de la surface grenailée avec des billes d'acier ou des billes de céramique électrofondues réfractaires semble être plus martelé et moins blessé (fig. 8). Toutefois il faut rappeler que l'effet nuisible des entailles localisées provoquées par ce type de grenailage n'est pas à négliger (voir résultats).



a) billes d'acier, pression 2 bar

b) billes céramiques, pression 4 bar

FIGURE 8 : Aspects de surface des éprouvettes ayant subi un grenailage par billes d'acier ou de céramique.

Comme on peut le constater, l'état de surface des éprouvettes grenailées ne semble pas très favorable pour la résistance à la corrosion sous contrainte.

Par contre, le grenailage ou microsablage entraîne un écrouissage du métal créant ainsi des contraintes résiduelles de compression. Ces contraintes résiduelles ont un effet bénéfique sur la fissuration par corrosion sous contrainte et estompent l'effet néfaste dû au mauvais état de surface introduit par le traitement. C'est dans cet esprit que nous avons étudié l'influence de l'état de surface dans des conditions particulières que nous allons préciser.

DESCRIPTION DES ESSAIS DE CORROSION SOUS CONTRAINTE

Le principe de l'essai consiste à faire passer de l'eau distillée à travers un matériau fibreux, ici de la laine de quartz, contenant des quantités préalablement déterminées de composants chimiques particuliers. Ces composants sont introduits sous forme de solution filtrée dans la laine lors de sa mise en place sur le poste d'essais de corrosion. L'eau, lors de son passage se charge en éléments chimiques et les amène jusqu'à l'éprouvette (figure 9).

La température élevée de l'éprouvette conduit à l'évaporation de l'eau entraînant la concentration du milieu corrosif à la surface de l'éprouvette. Ces conditions reproduisent le cas d'une installation industrielle isolée thermiquement et soumise à un environnement humide.

Si les paramètres expérimentaux le permettent, des fissures principalement de corrosion sous contrainte peuvent se produire (par exemple, par ruissellement le long d'une paroi).

Les paramètres régissant ce phénomène sont :

- l'état de surface de l'éprouvette,
- le niveau et la répartition des contraintes résiduelles,
- la température de la surface,
- les caractéristiques du milieu corrosif,
- la durée d'exposition.

Le montage expérimental est composé de cinq postes d'essais de corrosion sous contraintes. La figure 9 montre le schéma d'un tel poste au cours d'un essai. Quatre éprouvettes en forme de <<U>> sont placées autour d'un tube support chauffant et serrées à l'aide d'un boulon avec une déformation constante contrôlée par une butée cylindrique de la longueur définie.

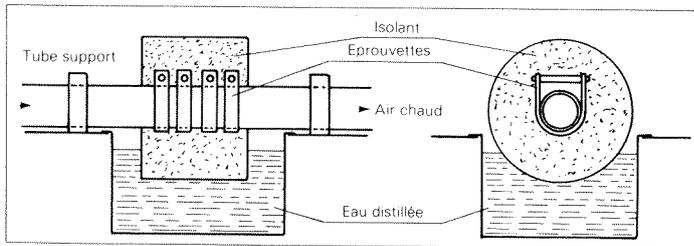


FIGURE 9 : Schéma du dispositif d'essais

Le matériau d'isolation, de forme cylindrique (figure 10) englobe totalement les éprouvettes. Il trempe à sa base dans une cuve dont le niveau en eau distillée est maintenu constant.

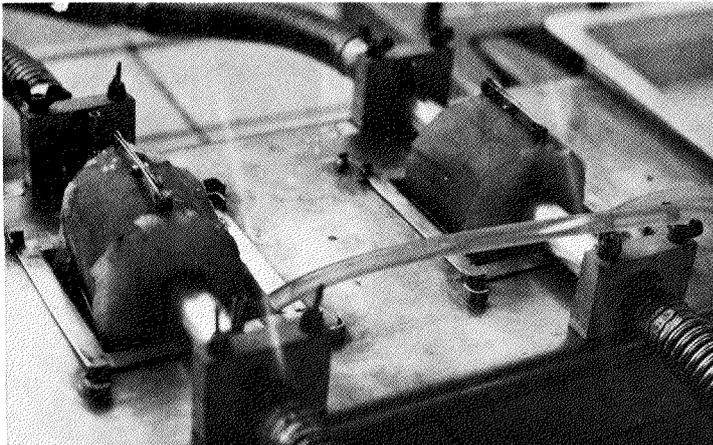
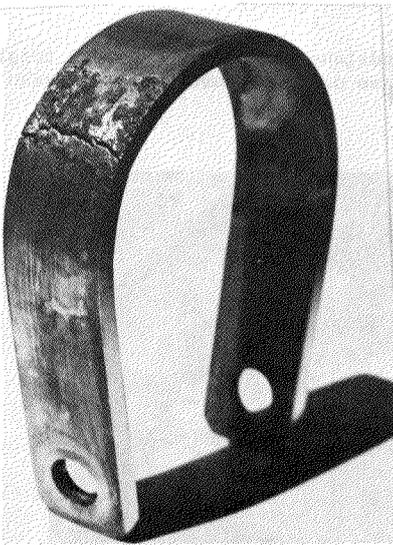


FIGURE 10 : Deux postes d'essais avec l'isolation testée

Les conditions expérimentales ont été choisies de façon à favoriser la fissuration par corrosion sous contrainte. En particulier, il a été montré que la sensibilisation à la corrosion sous contrainte était maximale à une température de 100°C, à la surface de l'éprouvette en <<11>>. Par ailleurs, il a été confirmé que les chlorures jouent un rôle important sur cette corrosion. Un diagramme a été établi de façon à illustrer le rôle nocif de cet ion et le rôle bénéfique du silicate de sodium qui inhibe la corrosion, à condition d'être introduit en quantité suffisante dans le matériau d'isolation thermique [6].

Les éprouvettes attaquées lors des essais présentent un réseau plus ou moins dense de fissures, que l'on peut observer au microscope optique (figure 11). Nous avons caractérisé ces états de fissuration à l'aide d'un critère, noté \bar{L} , que l'on peut assimiler à la longueur cumulée des fissures, observées sur une tranche polie de l'éprouvette et à l'aide d'un microscope optique (x 70).

Cette grandeur permet de tracer des diagrammes mettant en évidence le degré de protection éventuelle apporté par les différents traitements de surface envisagés.



b) détail des fissures

a) aspect de l'éprouvette après essai.

FIGURE 11 : Eprouvettes d'essais

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les essais ont été conduits en deux temps :

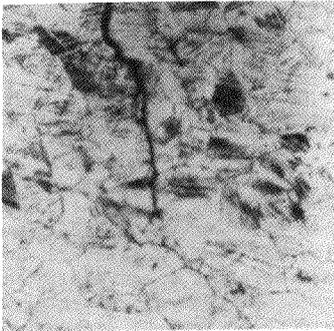
- La première série a été consacrée à la comparaison de l'influence du polissage, du micro-sablage et du grenailage en billes de verre, sur la tenue à la corrosion sous contrainte,
- La deuxième série a consisté à comparer l'influence des différents paramètres du grenailage.

La première série d'essais a été réalisée en introduisant une solution de NaCl (à 1 650 ppm) dans le matériau d'isolation lors de sa mise en place sur le montage expérimental. L'alimentation en eau distillée a été continue durant la totalité de l'exposition soit 500 heures.

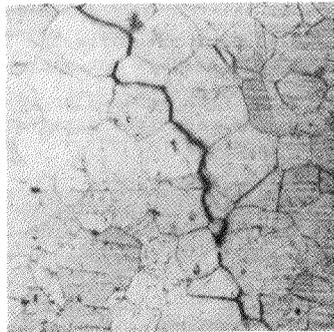
Six états de surfaces différents ont été comparés lors de cette première série :

- polissages manuels sur papiers de grades 80, 280 et 1 000 notés respectivement A, B et C,
- micro-sablage humide,
- grenailage avec des billes de verre 125 - 250 mm à 2 et 4 bar.

Les éprouvettes, après qu'elles aient été démontées des postes de corrosion, sont polies, puis observées au microscope optique (x 80). Lorsqu'un endommagement a eu lieu, on observe la présence de fissures. Ces dernières peuvent se propager selon un mode trans ou intergranulaire (figure 12).



a) fissure transgranulaire



b) fissure intergranulaire

FIGURE 12 : Fissures de corrosion sous contrainte

L'endommagement a été quantifié à l'aide du critère de caractérisation \bar{L} précédemment décrit. Les résultats peuvent alors être illustrés par un diagramme (figure 13).

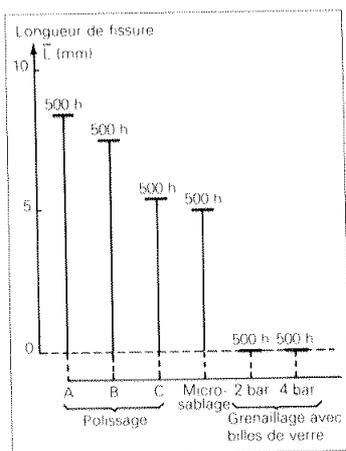


FIGURE 13

Variation de la longueur \bar{L} en fonction du traitement superficiel des éprouvettes

On constate que le polissage grossier du type A est plus favorable à la fissuration par corrosion sous contrainte.

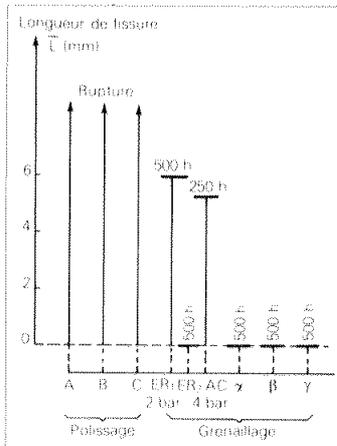
Les résultats obtenus par polissage fin (du type C) sont tout à fait comparables à ceux obtenus par micro-sablage.

Les deux types de grenailages en billes de verre (pression : 2 et 4 bar) ont donné des résultats très satisfaisants. Aucune fissure n'a été observée après 500 heures d'essais.

Ces essais, très encourageants, nous ont conduits à examiner de façon plus détaillée l'influence des paramètres technologiques du grenailage sur la tenue à la corrosion sous contrainte. Pour être sûr que les éprouvettes se fissurent, on les a placées dans un milieu beaucoup plus sévère en utilisant de la laine de quartz pure, mais en remplaçant l'eau d'alimentation par une solution de NaCl à 2,472 g/l. Ces conditions ont entraîné la fissuration des éprouvettes polies manuellement en moins de 24 heures (figure 14) et leur rupture en 500 heures. Deux durées, 250 et 500 heures, ont été utilisées. Au cours de cet essai, nous avons étudié les états de surface suivants :

- grenailage avec des billes de verre,
- grenailage avec des billes de céramique,
- grenailage avec des billes d'acier.

Les conditions d'essais étant très sévères, nous avons réussi à fissurer les éprouvettes grenillées avec de l'acier coulé et avec des billes électrofondues réfractaires. En particulier :



A : polissage manuel sur papier de grade 80,
 B : polissage manuel sur papier de grade 280,
 C : polissage manuel sur papier de grade 1 000,
 ER_{1,2} : grenaillage avec billes de céramique électrofondues réfractaires,
 AC : grenaillage avec billes d'acier coulé,
 α : grenaillage avec billes de verre de diamètre 150-250 μm
 β : grenaillage avec billes de verre de diamètre 250-420 μm
 γ : grenaillage avec billes de verre de diamètre 420-590 μm

FIGURE 14 : Comparaison des résultats obtenus pour différentes conditions de grenaillage

Après 250 heures d'essai :

- L'éprouvette grenaillée avec de l'acier coulé a été fissurée ($\bar{L} = 4,25\text{mm}$),
- aucune fissuration n'a été constatée sur des éprouvettes ayant subi un grenaillage avec des billes de verre ou des billes électrofondues réfractaires.

Après 500 heures d'essai :

- L'éprouvette grenaillée avec des billes électrofondues réfractaires a été fissurée ($\bar{L} = 6 \text{ mm}$) pour une pression d'air de grenaillage de 2 bar.
- aucune fissuration n'a pu être produite sur des éprouvettes grenaillées avec des billes de verre.
- les éprouvettes grenaillées avec des billes électrofondues réfractaires sous une pression d'air de 4 bar n'ont pas été fissurées après 500 heures d'essais.

De ce fait, il est probable qu'un grenaillage effectué avec une intensité plus importante soit plus favorable pour le comportement des pièces à la corrosion sous contrainte.

Etant donné que des éprouvettes grenaillées avec des billes de verre n'ont pas été fissurées, il est difficile de tirer des conclusions quant à l'influence du diamètre des billes ou de la pression de l'air sur la tenue à la corrosion sous contrainte dans ce types d'essais.

Nous pensons que l'amélioration très spectaculaire de la tenue à la corrosion sous contrainte des éprouvettes par grenaillage par rapport à des éprouvettes polies est due à deux phénomènes :

- l'introduction de contraintes résiduelles de compression introduites par grenaillage, ces contraintes s'opposant aux contraintes de tension de service et modérant leur effet néfaste,

- la modification structurale notamment en écrasant les grains superficiels, cette plastification de la surface provoquant un allongement des grains parallèlement à la surface, ce qui peut diminuer les risques de fissuration intergranulaire.

La fissuration des éprouvettes grenillées avec le type de grenaille en acier utilisé dans ces essais peut être due à une pollution de la surface de l'éprouvette par des particules ferreuses qui se sont dégagées des grenailles. Il est nécessaire que des essais plus détaillés avec d'autres types de grenailles en acier coulé soient conduits dans le futur, afin de pouvoir tirer des conclusions définitives.

Des blessures superficielles constatées après grenaillage avec de l'acier coulé peuvent également être des facteurs méritant des examens plus particuliers.

CONCLUSIONS

Le grenaillage de précontrainte est une opération qui améliore considérablement la tenue à la corrosion sous contrainte des aciers en créant des contraintes résiduelles de compression à la surface du matériau.

Des essais comparatifs de corrosion sous contrainte ont été conduits pour différentes conditions de traitement de grenaillage. On a examiné en particulier l'influence de la nature de la grenaille et de la vitesse de protection.

A l'aide d'un critère statistique de la fissuration par corrosion sous contrainte, les résultats ont été comparés à ceux obtenus pour des éprouvettes polies dans différentes conditions.

En définitive, il s'avère que :

- un grenaillage de précontrainte avec des billes de verre élimine les risques de fissuration par corrosion sous contrainte, même si les essais sont conduits dans un milieu corrosif "sévère",
- un microsablage donne des résultats équivalents à ceux d'un polissage fin,
- plus les conditions de polissage sont sévères, plus les risques de fissuration par corrosion sous contrainte sont importants,
- en ce qui concerne les grenailles en acier coulé, la nature des grenailles utilisées et des conditions de grenaillage trop restrictives ne permet pas de tirer des conclusions définitives, Seule chose pouvant être confirmée c'est qu'un grenaillage avec des billes utilisées lors de ces essais est, dans la mesure du possible, à éviter.
- les grenailles avec des billes électrofondues réfractaires ne semblent pas donner de résultats aussi satisfaisants que des billes de verre. Des essais complémentaires sont nécessaires pour confirmer ce point.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J.F. FLAVENOT et A. NIKU-LARI.
Le grenailage de précontrainte .
Note technique, n° 15 CETIM, 1976 .
- [2] J.F. FLAVENOT et A. NIKU-LARI
La mesure des contraintes résiduelles : méthode de la flèche,
méthode de la source des contraintes résiduelles.
Mémoire technique, n° 31, CETIM, 1977
- [3] ESQUIVEL et EVANS
Effect of microstains and particle size on the fatigue properties
of steel.
S.A.E., n° 793 B, 1964
- [4] A. NIKU-LARI
Shot-peening - proceeding of the 1st International Conference on
Shot-peening .
Paris , septembre 1981 . Pergamon Press, Oxford 1982 .
- [5] G. BERANGER et P. MENIEL
Influence de l'état de surface d'éprouvettes en acier inoxydable
austénitique sur les résultats d'un essai de corrosion sous contrain-
te.
Journées Métallurgiques d'Automne 1981 - Société Française de
Métallurgie. Mémoires et études scientifiques de la Revue de Métal-
lurgie n° 9 , p. 451 .
- [6] P. MENIEL
Etude des conditions d'apparition et de prévention de la corrosion
sous contrainte de l'acier 2 6 CN 18.09 au contact de matériaux
d'isolation thermique humides.
Thèse de Docteur Ingénieur, Université d'Orsay - Octobre 1981
- [7] M.G. FONTANA et N.D. GREENE
Corrosion Engineering .
Mc GRAW HILL BOOK Co, 1967