AMÉLIORATION DE LA TENUE À LA FATIGUE-CORROSION D'ORGANES DE TURBINES HYDRAULIQUES

H. Waldura

Electricité de France - SPH-DTG,
37 rue Diderot, 38000 Grenoble, France

RESUME

Afin d'améliorer le comportement en service des roues, des pales et des arbres de turbines hydrauliques soumis à des sollicitations de fatigue-corrosion, les zones de fissuration préférentielle de ces pièces font l'objet d'un grenaillage de précontrainte. Ce traitement, s'il est réalisé suivant une technique appropriée, permet d'augmenter considérablement la durée de vie des pièces. Les surfaces des aciers sensibles à la corrosion doivent obligatoirement être revêtues d'une peinture spéciale après grenaillage.

ABSTRACT

Hydraulic turbine components like runners, blades and shafts are subjected to fatigue corrosion stresses. In order to remove their behaviour in operation the critical areas of these equipments are treated by shoot peening. The life time of the components is significantly increased when such treatment is performed according to an appropriated manner. The surfaces of non stainless steel have to be coated with a special paint after shoot peening treatment.

MOTS CLE

Amélioration résistance fatigue-corrosion ; organes de turbines hydrauliques; grenaillage de précontrainte.

KEYWORDS

Improvement of fatigue corrosion strength ; hydraulic turbine components ; shoot peening

INTRODUCTION

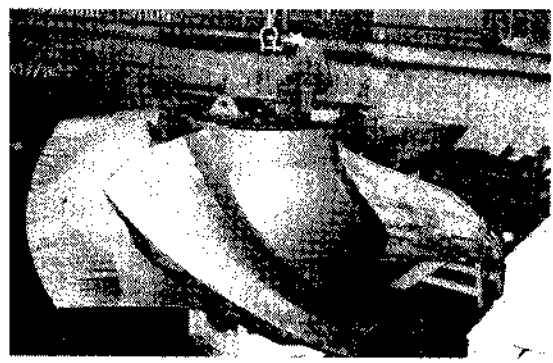
Le parc des centrales hydrauliques, géré par le Service de la Production Hydraulique d'ELECTRICITE de FRANCE, comporte plus de 1200 turbines dont les puissances s'échelonnent de quelques centaines de KW à quelques centaines de MW. Certains organes de ces turbines, sollicités par des contraintes cycliques dans un environnement de corrosion, sont l'objet de fissurations dont la croissance plus ou moins rapide peut conduire à la rupture complète.

Afin de retarder l'initiation de cette fissuration, un traitement de surface par grenaillage de précontrainte est réalisé notamment sur des roues et pales de turbines en aciers moulés à 13 et 17 % de chrôme ainsi que sur des arbres de turbine forgés constitués d'aciers faiblement ou non alliés.

RESISTANCE A LA FATIGUE DES ACIERS POUR ORGANES DE TURBINES HYDRAULIQUES

ACIERS MARTENSITIQUES A 13 ET 17 % DE CHROME

La plupart des roues Pelton (voir cliché 1) et des pales Kaplan



Cliché 2 : Roue de turbine Kaplan de 22MW

Cliché 1 : Roue Pelton (60MW) en acier Z05CN13-4

(Cliché 2) équipant les turbines moyennement et fortement sollicitées sont réalisées avec les aciers moulés Z05CN13-4 et Z05CN17-4 dont les caractéristiques mécaniques classiques sont données ci-dessous :

Rm (MPa)	Re (MPa)	A %	KCV J/cm2 à 0° C
800	600	14	40

L'exécution d'essais de fatigue en flexion rotative sous corrosion d'eau douce (pH # 7) avec des éprouvettes d'un diamètre de section utile voisin de 8mm conduit à une résistance à la fatigue à 10^8 cycles de $\pm$ 280 MPa pour ces deux aciers. Un grenaillage de la surface des éprouvettes améliore très sensiblement la résistance; ainsi à 10^8 elle peut atteindre $\pm$ 350 MPa. La durée de vie des éprouvettes grenaillées est multipliée par 10 comparativement à celle des éprouvettes non traitées.

Rappellons cependant que ces valeurs de résistance à la fatigue ne sont pas représentatives des grosses pièces industrielles sur lesquelles on relève des valeurs nettement plus basses; des essais de fatigue en flexion plane exécutés sous corrosion d'eau douce à l'aide d'éprouvettes de grande dimension prélevées dans des lingots de 500mm d'épaisseurs en aciers à 13 et 17% de chrôme ont permis d'obtenir les résistances Rf suivantes :

Contrainte moyenne MPa	0	90	300
Rf à 10^8 cycles MPa	$\pm$ 110	$\pm$ 90	$\pm$ 60

Les fissurations et ruptures observées sur des pièces en exploitation ont conduit le Service de la Production Hydraulique à imposer aux constructeurs de dimensionner les pièces soumises à un nombre de cycles élevé (roue Pelton par ex.) de telle sorte qu'en aucune zone la sollicitation cyclique ne dépasse $\pm$ 30 MPa.

ACIERS FAIBLEMENT OU NON ALLIES

Les arbres des turbines hydrauliques sont constitués d'aciers forgés faiblement (25 CD4) ou non alliés (XC 38). La résistance à la fatigue corrosion de ces aciers à 10^8 cycles est souvent inférieure à $\pm$ 100 MPA. La durée de vie peut là aussi être nettement améliorée par l'exécution d'un grenaillage de précontrainte. Cependant, en raison de la sensibilité à la corrosion de la surface de ces métaux l'effet bénéfique d'un tel traitement est réduit pour des pièces sollicitées à un nombre élevé de cycles; afin de palier à cet inconvénient, les surfaces doivent obligatoirement être protégées par un revêtement de peinture.

LE GRENAILLAGE DE PRECONTRAINTE

La précontrainte de la surface est obtenue par projection sur le support à traiter de billes (Ø 0,4 à 1,8mm) en acier coulé présentant une dureté HRc de l'ordre de 40 à 50. Une partie de l'énergie cinétique des projectiles se transforme en énergie de déformation élastoplastique conduisant à un état biaxial de contraintes superficielles de compression et à un écrouissage du matériau.
La présence d'un état de contrainte de compression sur une profondeur de quelques dixièmes de milimètres permet d'augmenter considérablement la résistance à la fatigue du matériau.
Cette amélioration résulte :

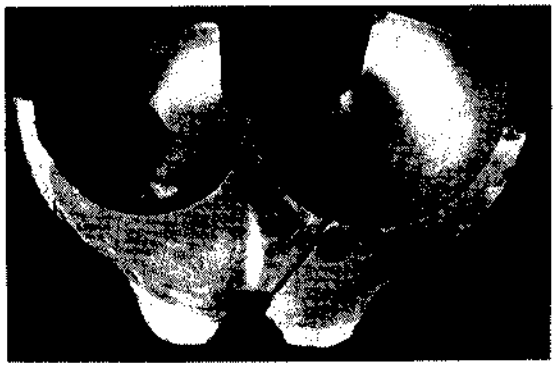
- de la diminution de la sollicitation des fibres superficielles du matériau étant donné que les contraintes résiduelles de compression se retranchent des contraintes d'extension de service.

- de l'éxistence de la couche superficielle en compression s'opposant à la formation et au développement des microfissures, notamment en milieu corrosif.

L'opération de grenaillage peut être contrôlée à l'aide d'éprouvettes minces de référence, grenaillées dans les mêmes conditions que la pièce à traiter. La mesure de leur flèche qui résulte de la présence de contraintes de compression indique l'intensité de grenaillage ou intensité Almen. Le choix de ce paramètre dépend essentiellement de la dureté du support.

EXEMPLES DE PIECES TRAITEES PAR GRENAILLAGE
ROUES ET PALES DE TURBINE

Les clichés n° 3 et 4 montrent des cas de fissuration survenus en service d'une part sur une roue Pelton dont l'auget s'est entièrement détaché de la roue par fissuration progressive amorcée dans l'attache auget-jante, d'autre part sur une pale Kaplan où la fissure a pris naissance dans le congé de raccordement de l'aube sur le tourillon.



Cliché 3 : Auget Pelton détaché par fissuration progressive d'une roue de 13 MW en acier Z10CN13-2.

Cliché 4 : Pale Kaplan d'une turbine de 40MW fissurée par fatigue après 35 000 heures de service.

Plusieurs essais de grenaillage de zones de fissuration préférentielles ont été réalisés sur des roues Pelton et des pales Kaplan. Les trente pales des six turbines identiques de 60 MW en acier Z05CN17-4, dont un mobile figure sur le cliché 2, ont été grenaillées dans les congés de raccordement aube-tourillon; une intensité Almen C de 0,18mm a été adoptée pour le grenaillage (dureté du métal = 240 HV).

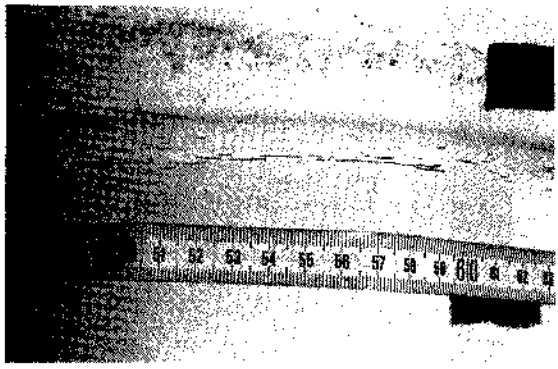
Arbres de turbine : Les arbres des turbines à axe horizontal sont fréquemment l'objet de fissurations se développant dans les congés de raccordement au droit des changements de section constamment exposés à la corrosion. Des fissures multiples (voir clichés 5,6 et 7) caractéristiques du phénomène de fatigue-corrosion, d'abord de faible dimension, se raccordent les unes aux autres et s'enfoncent dans l'épaisseur de la pièce. Des ruptures complètes d'arbres de 300mm de diamètre ont ainsi été observées plus de 20 ans après la mise en service. Des mesures par télé-extensométrie ont révélé que la contrainte de flexion rotative dans ces zones ne dépasse pas $\pm$ 30 MPa. Le nombre de cycles (nombre de révolutions) que peut atteindre ces pièces dépasse fréquemment 10^{10}.

Lorsque la fissuration est décelée suffisamment tôt (la profondeur des défauts ne dépasse pas quelques mm) la réparation de l'arbre est effectuée comme suit :

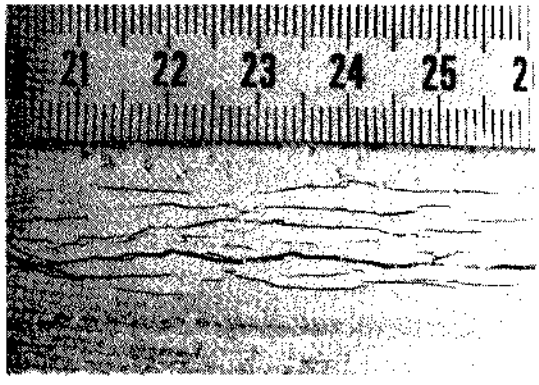
- usinage au tour d'une gorge pour élimination des fissurations.

- grenaillage de la surface (intensité Almen C voisine de 0,25mm)

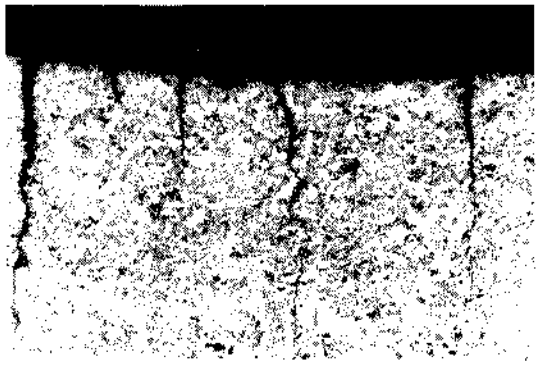
- dépôt d'un revêtement de peinture spéciale présentant de bonnes propriétés d'adhérence et de comportement dans le temps; la présence de ce revêtement est indispensable pour conserver l'efficacité du grenaillage.



Cliché 5 : Fines fissurations de fatigue corrosion détectées par magnétoscopie dans le congé d'un arbre de turbine Pelton à axe horizontal (Ø 280mm).



Cliché 6 : Fissures multiples mises en évidence dans un arbre horizontal d'une turbine Francis (Ø 340mm).



Cliché 7 : Coupe exécutée au droit de la zone fissurée du cliché 6.

CONCLUSION

La résistance à la fissuration par fatigue-corrosion des pièces de turbines hydrauliques fortement sollicitées peut être sensiblement améliorée par l'application d'un grenaillage de précontrainte au droit des zones de fissuration préférentielle.

La mise en oeuvre du traitement de surface doit être réalisée suivant un processus approprié.