

Éviter les problèmes potentiels.

Un hélicoptère Safari a été perdu à cause d'une rupture par fatigue dans un tube de commande après avoir volé seulement quelques centaines d'heures. Qu'est-ce qui a provoqué la rupture par fatigue ?



Une photo « Avant » du Safari, qui a reçu un prix de Grand Champion des giravions à Oshkosh.

Les charges de commande sont relativement faibles. Les contraintes calculées sont faibles. Qu'y avait-il de différent dans les tiges de commande de cet appareil par rapport à tous les autres Safari, dont aucun n'avait connu cette rupture ?

Une réponse était que les tiges avaient été anodisées en noir pour ajouter de « l'attrait extérieur ». Mais l'anodisation affecte-t-elle la durée de vie en fatigue de l'aluminium ?

J'ai reçu un « oui » retentissant lorsque cette question a été posée au monde des experts en finition. Dans un article intitulé « Propagation des fissures de fatigue assistée par film dans les alliages d'aluminium anodisés », publié dans le Journal of Materials Science Letters, volume 14, n° 21/janvier 1995 [ISSN 0261-8028 (imprimé) 1573-4811 (en ligne)], les auteurs A.M. Cree, G.W. Weidmann et R. Hermann ont écrit : « Il est bien établi que la présence de films anodisés sur les alliages d'aluminium peut affecter défavorablement leurs performances en fatigue. »



La photo « Après » du même hélicoptère Safari.

Dans *Fatigue Design of Aluminum Components & Structures*, de Maurice L. Sharp, Glenn E. Nordmark et Craig C. Menzemer, un graphique (page 110) montre une diminution de la durée de vie en fatigue due au pré-nettoyage ainsi que les effets de l'Alodine et de deux épaisseurs différentes de revêtements anodiques.

À un niveau de contrainte de 35 ksi (1 ksi = 1 000 livres/pouce carré), la durée de vie en fatigue d'un échantillon non pré-nettoyé et non revêtu était d'environ 0,2 million de cycles. La seule utilisation d'un composé de pré-nettoyage appelé C2X montrait une durée de vie en fatigue de 0,055 million de cycles, soit une réduction d'un facteur 3,64. Sans pré-nettoyage et avec un revêtement anodique de 0,002", la durée de vie en fatigue était réduite à 0,035 million de cycles, soit une réduction d'un facteur 5,7.

QU'EST-CE QUE CELA SIGNIFIE ?

Une vibration à deux tours dans un Safari provoque une fréquence de vibration de 17 hertz. On s'attendrait à ce que cette fréquence, agissant sur un dispositif ayant une durée de vie en fatigue de 0,035 million de cycles, provoque sa rupture après environ 0,57 heure.

De plus, le graphique indiquait l'effet de la réduction de la contrainte à 25 ksi, et la durée de vie en fatigue attendue d'un échantillon non pré-nettoyé avec un revêtement anodique de 0,002" est de 0,08 million de cycles. On s'attendrait à ce que le même élément exposé aux 17 hertz rompe après approximativement 1,3 heure.



Les tubes de commande trouvés sur le site de l'accident. Ce tube est nettement rompu, et non plié jusqu'à la rupture par l'accident, mais rompu par fatigue à la suite de la propagation d'une fissure activée par les vibrations.

L'expérience peut être trompeuse lorsque des personnes disent connaître des pièces anodisées qui ont duré plus longtemps. Quels étaient les niveaux de contrainte ? Le Safari a duré beaucoup plus longtemps que 1,3 heure. Les mesures de la pression du ressort nécessaire pour compenser les forces du collectif sur le Safari ont donné approximativement 50 livres. Cette charge était répartie sur le tube de commande, qui était un tube en aluminium de 1/2" par 0,083", donnant une section transversale de 0,109 pouce carré. Une charge de 50 livres créait une contrainte d'approximativement 460 psi.

Un élément soumis à un niveau de contrainte inférieur à la limite d'endurance est considéré comme ayant une durée de vie en fatigue infinie, en d'autres termes, l'élément durera éternellement. Cette durée de vie infinie est une caractéristique des aciers. Certaines sources indiquaient que l'aluminium n'avait pas de limite d'endurance bien définie et qu'il finirait par rompre quelle que soit la contrainte. Cependant, dans le but de quantifier et d'établir des estimations, l'Aluminum Association Inc. a publié Aluminum Standards and Data 1988, indiquant une limite d'endurance de 10 000 psi pour 500 millions de cycles.

Diverses autres sources indiquaient, pour l'aluminium corroyé, une limite située quelque part entre 8 000 et 18 000 psi selon l'alliage. Ce nombre ne devrait pas être utilisé comme une limite absolue. Cependant, je vais l'utiliser comme une barrière entre une durée de vie en fatigue raccourcie et une longue durée de vie en fatigue.

RETOUR À LA QUESTION

« Comment le tube de commande a-t-il rompu par fatigue alors qu'il était soumis à un niveau de contrainte beaucoup plus faible que la limite d'endurance ? »

Les experts en anodisation ont déclaré que l'anodisation provoquerait cela. Mais comment le processus a-t-il amené la contrainte dans le tube de commande du Safari à dépasser la limite d'endurance ? Il n'y avait aucune preuve de la présence d'une fissure préexistante ou d'une discontinuité de surface notable avant l'anodisation qui aurait pu conduire à une concentration de contrainte.

Quelle que soit mon opinion, le fait est qu'un tube de commande anodisé, soumis à une charge relativement faible, a rompu dans un hélicoptère, provoquant un accident. À ma connaissance, aucun autre Safari avec des tubes de commande en aluminium nu n'a connu de rupture par fatigue de ce tube, et cela inclut des hélicoptères ayant beaucoup plus d'heures de vol.



Les extrémités des tubes de commande qu'un laboratoire d'essais a déterminé être le résultat d'une rupture par fatigue.

FACTEUR DE CONCENTRATION

J'avais entendu parler de concentration de contrainte et de points de concentration de contrainte, mais je croyais seulement que l'effet était provoqué par une diminution de la section transversale du matériau. Ce n'est pas le cas. Considérez ce qui suit.

La contrainte maximale ressentie près d'une fissure se produit dans la zone du plus petit rayon de courbure (plus la pointe de la fissure est aiguë, plus la contrainte est élevée). Dans une fissure elliptique (elliptique a été choisi pour faciliter la description mathématique) de longueur $2X$, sous une contrainte appliquée F , la contrainte à l'extrémité pointue de la fissure est donnée par :

$$F_{\max} = 2F \sqrt{\frac{X}{p}}$$

Ici, p est le rayon de courbure de la pointe de la fissure et F est la contrainte normalement calculée en raison d'une charge sur une section transversale donnée. Dans notre exemple du Safari, $F = 460$ psi.

Remarque : Le facteur de concentration de contrainte est une fonction de la fissure et de son acuité, mais pas de sa largeur.

En appliquant cette équation à la charge de commande subie dans le Safari, nous avons :

$$F_{\max} = 2(460) \sqrt{\frac{X}{p}}$$

Alors :

$$F_{\max} = 920 \times \sqrt{\frac{2p}{p}}$$

ou :

$$F_{\max} = 1\,301 \text{ psi}$$

Ce n'est toujours pas suffisant pour créer une contrainte au-delà de la limite d'endurance. Cette pièce devrait encore avoir une longue durée de vie en fatigue.

Cependant, laissez le rayon de cette fissure devenir petit, par exemple 0,001X (et cela reste un grand rayon de courbure pour l'extrémité d'une petite fissure), et il y a une forte augmentation de la contrainte.

$$F_{\max} = 29 \text{ ksi}$$

Maintenant, elle est au-dessus de la limite d'endurance. La durée de vie en fatigue n'est plus longue. En fait, elle est probablement inférieure à une heure pour notre tube de commande du Safari.

QUE RETENIR DE CET ARTICLE ?

Le but de cet article est de partager certaines informations qui sont à la fois éclairantes et choquantes. Tous les ingénieurs mécaniciens avec lesquels j'ai parlé ne sont pas conscients des problèmes créés par l'anodisation. Tous les experts en anodisation ne sont pas familiers avec la concentration de contrainte comme principal mécanisme de la réduction de la durée de vie en fatigue due à l'anodisation.

Le fait d'être pilote de Safari a fortement augmenté mon intérêt pour la raison pour laquelle ce tube de commande devait rompre par fatigue sous une charge aussi faible.

J'ai maintenant une idée de la raison pour laquelle certaines des personnes dans les ateliers de revêtement ont simplement dit : « Ne plaquez pas et ne revêtez pas les composants critiques pour le vol à moins que vous ne sachiez vraiment ce que vous faites et que vous puissiez compenser les problèmes créés par ces procédés. »

J'ai une meilleure compréhension des processus impliqués dans les ruptures d'arbres secondaires qui ont affecté d'autres hélicoptères expérimentaux. Ces arbres avaient été conçus pour supporter les charges avec un facteur de sécurité, tout comme le tube de commande du Safari. Les fissures qui se sont formées ont élevé le niveau de contrainte bien au-delà des limites de conception, avec les ruptures qui en ont résulté.