Schadensuntersuchung an einer Helikopter-Antriebswelle

Failure Investigation of a Helicopter Driveshaft

Chrysta Hochhaus

(Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf, Schweiz)

Einleitung

Die zur Untersuchung vorgelegte Welle aus einem Helikopter des Baujahres 1973 verbindet den Motor mit dem Untersetzungsgetriebe. Die aus dem legierten Vergütungsstahl AMS 6418 gefertigte Welle brach nach einer Betriebsdauer von 2400 Flugstunden bei einer vorgesehenen maximalen Lebensdauer von 6000 Stunden. Die Welle ist während ihrer Betriebsdauer nicht zerstörungsfrei auf Risse geprüft worden. Spezifikationen, z. B. über mechanisch-technologische Forderungen, liegen nicht vor. Die Ergebnisse der metallkundlichen Untersuchung werden in folgender Arbeit vorgestellt.

Introduction

The shaft submitted for investigation was taken from a helicopter built in 1973 and connected the motor to the reduction gearbox. The shaft, made from the heat treatable alloy steel AMS 6418, broke prematurely after only 2400 hours of its expected service life of 6000 hours. During its service life the shaft had not been non-destructively tested for cracks. No specifications for the material (eg. its mechanical requirements) were available. The results of the metallurgical investigation are presented in the following article.

Einlieferungsbefund

Der schrägflächig, etwa 45° zur Wellenachse verlaufende Bruch befindet sich unmittelbar beim Übergang von einer der beidseitigen Bogenzahnkupplungen zur Welle mit einem Durchmesser von 20,5 mm. Anhand des makroskopischen Bruchaussehens kann davon ausgegangen werden, daß es sich hierbei um einen Torsionsermüdungsbruch handeln könnte. Figur 1 gibt den Bruch wieder und zeigt außerdem, daß etwa in Bruchflächenmitte ein klaffender Spalt vorhanden ist, in dessen Fortsetzung im Wellenbereich eine axial verlaufende Werkstofftrennung vorliegt (Pfeil). Es muß somit davon ausgegangen werden, daß die Auslösung des Bruches mit der vorbestandenen Werkstoffschädigung in ursächlichem Zusammenhang steht. Eine ebenso angeordnete, feinere Trennung ist an einer anderen Stelle des Wellenumfanges festgestellt worden.

Visual Examination

The fracture surface, inclined at ca. 45° to the axis of the shaft, was situated at the point of transition from the shaft to one of the two crown wheels mounted on it, at a diameter of 20.5 mm. The macroscopic appearance of the fracture indicated it to have been the result of torsional fatigue. Figure 1 shows the fracture surface, at approximately the center of which can be seen a gaping slot at the continuation of which in the shaft material is an axial defect (arrowed). It was thus assumed that the cause of the fracture must have been linked to the existence of this material defect. Another such similarly orientated, but much finer defect was found on another part of the circumference of the shaft.

Fraktographische Untersuchung

Obwohl sowohl die Bruch- als auch die Gegenbruchfläche durch erhebliche Reibspuren gekennzeichnet sind, konnten in den auswertbaren

Fractographic Examination

Although both sides of the fracture were heavily damaged mechanically, in undamaged areas the typical striations so characteristic of fatigue

Fig. 1. Ansicht der Schadensstelle (Pfeil: Axiale Werkstofftrennung in der Welle). 1 x

Fig. 1. Appearance of the damaged area. The axial crack in the shaft is marked with an arrow. 1x

Partien bereits makroskopisch die typischen Merkmale eines Ermüdungsbruches in Form von Rastlinien festgestellt werden. Die Makroaufnahme in Figur 2 zeigt dieses am Beispiel einer Bruchpartie. Anhand der Orientierung der Rastlinien auf der Gesamtbruchfläche konnte die Reißausbreitungsrichtung ermittelt werden, welche auf der Makroaufnahme des kürzeren Bruchstückes in Figur 3 mit einem Pfeil gekennzeichnet ist. Der Bruch ist von der vorbestehenden Werkstofftrennung, welche in Bildmitte erkennbar ist, ausgegangen und dann teilweise in terrassenförmigen Abstufungen bis zum rechts oben im Bild erscheinenden Bruchbereich weitergewachsen. Diese Bruchtopographie ist als typisches Merkmal eines Torsionsermüdungsbruches anzusehen.

Die Untersuchung der Bruchfläche im Rasterelektronenmikroskop bestätigte innerhalb der fraktographisch auswertbaren Zonen den makroskopischen Befund, indem in den weitaus größten Bereichen die Charakteristik eines Ermüdungsbruches nachzuweisen war (siehe Figur 4). Lediglich in einer relativ schmalen Zone, und zwar in Figur 3 rechts oben im Bild, liegen die Merkmale eines duktilen Gewaltbruches mit feinen Grübchen vor. Aus dem Verhältnis von Ermüdungsbruchanteil und Restbruch kann geschlossen werden, daß der Bruch unter einer kleinen Nennspannung gewachsen ist.

fractures could be found. The macrophotograph shown in Fig. 2 shows one such area of the fracture. From the orientation of the striations over the whole of the fracture surface the direction of cracking was able to be determined. This is marked with an arrow in the macrophotograph of the shorter piece of the shaft shown in Fig. 3. The fracture initiated at the existing material separation, at the center of the picture, and then grew in a series of partially terraced steps to the area of fracture shown at the top right hand corner of the picture. This type of topography is typical of one caused by torsional fatigue.

Examination of the fracture surface in the scanning electron microscope confirmed that in the areas of the fracture surface which could be examined, the main characteristics apparent were those of a fatigue fracture mechanism (see Fig. 4). Only in a relatively narrow zone, shown in the top right hand corner of Fig. 3, was the fine dimpled structure of ductile fracture observed. From the relative proportions of fatigue fracture and the rest fracture, it was apparent that fracture had taken place under the action of a relatively low applied load.

Fig. 2. Makroaufnahme einer Bruchzone mit deutlichen Rastlinien. 6 x

Fig. 2. Macro photograph of an area of the fracture surface showing clearly defined fatigue striations. 6x

Fig. 3. Makroaufnahme der Bruchfläche mit terrassenförmigen Abstufungen, Pfeil: Bruchausbreitungsrichtung. 3 x

Fig. 3. Macro photograph of an area of the fracture surface with terraced steps. The direction of growth of the crack is arrowed. 3x

Fig. 4. Charakteristik eines Ermüdungsbruches im Mikrobereich. 1000 x

Fig. 4. Characteristic microscopic features of fatigue fracture. 1000x

Metallographische Untersuchungen

An einem Querschliff etwa 5 mm unterhalb des Bruchauslaufes wurden folgende Feststellungen gemacht: Wie die Makroaufnahme in Figur 5 zeigt, dehnt sich der Hauptriß über etwa 2/3 des Wellenquerschnitts aus und zeigt am Reißauslauf deutliche Verästelungen. Ein derartiger Rißcharakter deutet bereits im Makrobereich auf eine Schädigung infolge Korrosionseinflüssen hin. Das gleiche gilt für die auf dieser Aufnahme erkennbaren weiteren Anrisse.

Deutlicher noch zeigt sich der Schädigungscharakter bei der mikroskopischen Untersuchung,

Metallographical Examination

The following information was obtained from an examination of a cross section of the shaft taken about 5 mm from the position of fracture: As is shown in Fig. 5, the main crack extended over some 2/3 of the cross section of the shaft and at its end, exhibited a clear tendency to branch. This type of cracking, observed even macroscopically, indicated that corrosion must have contributed to the damage observed. This is also the case for the other incipient cracks visible in this picture.

The nature of the damage became much clearer in the microscopic examination in which nume-

Fig. 5. Makroaufnahme des Querschliffes ca. 5 mm unterhalb des Bruchauslaufes. 3,5 x
Fig. 5. Macro photograph of a cross section taken ca. 5 mm below the position of fracture. 3.5x

Fig. 6. Mit Korrosionsprodukten angefüllte Rißverzweigungen. 100 x
Fig. 6. Branches of the crack filled with corrosion products. 100x

bei der zahlreiche, feinste Verzweigungen festgestellt wurden, welche bevorzugt an Stellen mit geringer Rißöffnung mit Korrosionsprodukten angefüllt sind (Figur 6). Als wichtigster Hinweis für die Art des Schädigungsmechanismus jedoch sind diejenigen äußerst feinen Risse anzusehen, welche von zahlreichen über den gesamten Wellenumfang angeordneten Korrosionsnarben ausgehen. In Figur 7 ist einer dieser lichtmikroskopisch kaum erfaßbaren Risse mit Pfeilen

Fig. 7. Feinste, von Lochfraßstellen ausgehende Rißkeime (Pfeil). 200 x
Fig. 7. Very fine cracks initiating from corrosion pits (arrowed). 200x

rous very fine branched cracks could be seen, which when very narrow were found to be filled with corrosion products (Fig. 6). The most important indication of the damage mechanism however were the extremely fine cracks, all of which were observed to have initiated in corrosion pits distributed around the whole of the circumference of the shaft. In Fig. 7, one of these cracks which can only just be seen by optical light microscopy, is shown marked with an arrow. The

markiert. Diese von Korrosionsnarben ausgehenden Risse, welche in der Entstehungsphase in der Regel frei von Korrosionsprodukten und mit geringster Öffnungsweite meist geradlinig in den Werkstoff verlaufen, sind gemäß zahlreicher Literaturhinweise [2 bis 4] als charakteristisches Merkmal einer Schädigung infolge wasserstoffinduzierter Spannungsrißkorrosion (HISRK) anzusehen.

Das Mikrogefüge besteht aus fein ausgebildeten Martensitnadeln. Eine Anlaßwirkung, welche sich im Gefüge durch feinste Karbide zeigen würde, ist lichtoptisch nicht zu erfassen. Daraus ist abzuleiten, daß der Anlaßprozeß bei sehr niedriger Temperatur erfolgt sein muß, woraus auf eine höchstfeste Werkstoffqualität geschlossen werden kann.

Die mikroanalytische Untersuchung der Korrosionsprodukte in den Rißausläufern ergab keinerlei Hinweise auf korrosiv wirkende Medien wie z. B. Chlorverbindungen u. a.

Die Härtemessung nach Vickers ergab zwischen 480 und 490 HV10 schwankende Werte. Damit bestätigt sich die bei der Gefügeuntersuchung gemachte Feststellung, daß es sich um einen höchstfest vergüteten Stahl handelt, was insbesondere zur Fertigung von Wellen als ungewöhnlich anzusehen ist. Gemäß Umwertungstabelle DIN 50150 entspricht dies einer Zugfestigkeit von 1555 bis 1595 MN/m².

Schlußfolgerungen

Es wurde festgestellt, daß die Welle einen unter relativ geringer Nennspannung gewachsenen Torsionsermüdungsbruch aufweist, welcher durch einen Längsriß in der Welle ausgelöst worden ist. Als Rißursache konnte eindeutig eine Schädigung infolge wasserstoffinduzierter Spannungsrißkorrosion nachgewiesen werden. Hierfür sind als charakteristische Merkmale in erster Linie die von zahlreichen Lochfraßstellen ausgehenden feinen Anrisse mit äußerst geringer Öffnungsweite anzusehen [5], welche neben Spaltkorrosion als Voraussetzung für diese Schädigungsart anzusehen sind. Darüber hinaus muß sowohl die starke Verästelung der Hauptrisse sowie auch das Fehlen korrosiv wirkender Me-

cracks, which start at corrosion pits are in general initially free from corrosion products and run with low aperture linearly through the material. In the literature this type of crack, which is well known, is reported to be characteristic of damage caused by hydrogen induced stress corrosion cracking (HISCC) [2 to 4].

The microstructure of the material was seen to consist of fine needles of martensite, however without the optically visible fine carbides which would have indicated the material to have undergone an annealing treatment. From this it can be deduced that the annealing process must have been carried out at a very low temperature indicating this to be a very high strength material.

Micro-analysis of the corrosion products in the subsidiary cracks gave no indication of the action of corrosive media, eg. of chlorides.

Vickers hardness measurements produced results of between 480 and 490HV10. This confirmed the result of the metallographical examination that the steel must be a high strength quenched and tempered variety. This must be seen as somewhat unusual for shafts. According to DIN 50 150 this corresponds to a tensile strength of between 1555 and 1595 MN/m².

Conclusions

It was found that the shaft fractured under a relatively low nominal stress, by a mechanism of torsional fatigue initiated by the presence of a longitudinal crack in the shaft. The cause of the crack was shown to be clearly the result of hydrogen induced stress corrosion cracking. This was proven by the presence of the characteristically fine, narrow cracks initiating at the base of corrosion pits [5], which together with crevice corrosion is the main cause of this mechanism of cracking. In addition, the marked branching of the main crack and absence of any corrosive media are both typical of this type of damage. A further factor is the well known particular susceptibility of this type of material, a high strength steel,

dien innerhalb der Korrosionsprodukte als typisches Anzeichen für diesen Schädigungsmechanismus gewertet werden. Als weiteres Indiz ist die Anfälligkeit des Werkstoffs anzusehen. Es ist hinreichend bekannt, daß hochfeste Stähle in besonderem Maße gegenüber HISRK gefährdet sind. Da es sich im vorliegenden Falle um einen für die Fertigung von Wellen eher ungewöhnlich höchstfesten Stahl handelt, fällt diese Anfälligkeit besonders in Betracht.

Der Schädigungsmechanismus läßt sich wie folgt beschreiben: Im Rahmen von Korrosionsprozessen (Lochfraß) wird bei kathodischen Teilreaktionen Wasserstoff frei und führt hier zur Schädigung. Die als Ionen (d.h. Protonen) vorliegenden Wasserstoffatome können lokal in das Metallgitter eindringen und Dekohäsionserscheinungen bewirken, was zur Rißbildung führt [1]. Beim weiteren Rißfortschritt ist zu berücksichtigen, daß die Wasserstofflöslichkeit an der Rißspitze wegen des dort aufgeweiteten Gitters wesentlich erhöht ist und daß beim Erreichen kritischer Konzentrationen die Bruchzähigkeit drastisch herabgesetzt wird. Als Elektrolyt reicht bei diesem Prozeß Wasser und in vielen Fällen auch Luftfeuchtigkeit.

Bezüglich der Bildung der in axialer Richtung verlaufenden Längsrisse muß davon ausgegangen werden, daß dort die unter Torsionsbeanspruchung auftretenden Schubspannungen am größten sind.

Um Schäden vorliegender Art zu vermeiden, wird dringend empfohlen, artgleiche Teile einer periodischen Rißkontrolle zu unterziehen.

Zusammenfassung

Bei dem Bruch an der Helikopterwelle handelt es sich um einen Torsionsermüdungsbruch, welcher durch eine Werkstoffschädigung infolge wasserstoffinduzierter Spannungsrißkorrosion ausgelöst worden ist.

Angenommen: 9. März 1994

Accepted: March 9, 1994

Translation: Ph. Tate

Anschrift der Verfasserin/Author's address:

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Überlandstraße 129, CH-8600 Dübendorf

to HISCC. Since in this case the use of such a high strength steel must be considered somewhat unusual, this susceptibility is of particular relevance.

The damage mechanism may be explained as follows. In the course of pitting corrosion, nascent hydrogen is produced as part of the cathodic reaction. The hydrogen atoms, present as ions (ie. protons) diffuse locally into the metal lattice causing decohesion leading to cracking [1]. As the crack grows, the solubility of hydrogen at the tip of the crack increases considerably due to the tensile strain in the lattice at this point. On reaching a certain critical concentration the fracture toughness of the material at this point becomes drastically reduced. In this process, pure water or even the humidity of the air may be sufficient to act as electrolyte.

The formation of the axial longitudinal cracks must be assumed to be the result of shear forces generated by the torsional loading of the shaft.

To avoid damage of this type it is urgently recommended that all other similar types of shaft be subjected to periodic non-destructive crack testing.

Summary

The fracture of the helicopter driveshaft examined was found to be a result of torsional fatigue initiated by damage to the shaft caused by hydrogen induced stress corrosion cracking.

Literatur/References

1. B. Stellwag, H. Kaesche, Kinetik der wasserstoffinduzierten Spannungsrißkorrosion, Teil 1 und 2, Werkstoffe und Korrosion 33 (1982) 274/280 und 323/333
2. R. Pöppertling et al., Arten und Formen der wasserstoffinduzierten Rißbildung an Stählen, VDI-Berichte Nr. 365 (1980)
3. W. Muster, Ch. Hochhaus, Wasserstoffschäden in metallischen Bauteilen, Technische Rundschau 25 (1984)
4. H. Kaesche, Die Korrosion der Metalle, Springer-Verlag Berlin (1979)
5. E. Rieke, B. Johnen, Wasserstoffinduzierte Spannungskorrosion an unverzinkten und verzinkten Baustählen, Werkstoffe und Korrosion 37 (1986)