Andreas Neidel

Schadensfallanalysen metallischer Bauteile

Eine Sammlung von 31 realen Beispielen aus der Praxis



HANSER

Neidel Schadensfallanalysen metallischer Bauteile

Schadensfallanalysen metallischer Bauteile

Eine Sammlung von 31 realen Beispielen aus der Praxis

HANSER

Der Herausgeber: *Prof. Dr.-Ing. Andreas Neidel,* Leiter Werkslaboratorien Gasturbinenwerk Berlin/Laboratory Manager Gas Turbine Plant Berlin, Honorarprofessor an der TU Berlin

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

ISBN: 978-3-446-44572-7 E-Book-ISBN: 978-3-446-44609-0

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Verfahren und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Verfahren oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© Carl Hanser Verlag, München 2015 www.hanser-fachbuch.de Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg Herstellung: Cornelia Rothenaicher Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell Coverrealisierung: Stephan Rönigk Druck und Bindung: FIRMENGRUPPE APPL, aprinta druck GmbH, Wemding Printed in Germany

Foreword *Vorwort*

This book is a collection of case studies in failure analysis that were published, in the course of three and a half years, in the journal "Praktische Metallographie" that is also published by Hanser Verlag. In the 48th year of its existence, Practical Metallography received a facelift. The first issue with modernized layout was published in September 2011, just in time for the Metallography Conference in Karlsruhe. One of the new features was the inauguration of a separate "Failure Analysis" section. The publication of papers on this subject was by no means new to PM. In the 50 years since its foundation, several hundred articles on failure analysis were published. Between 1973 and 1997, very few issues appeared without a case study on the subject. The reasons for this are obvious. Fractographic and other investigations related to failure analysis are, essentially, performed using equipment that is available in materialographic laboratories. Fracture surfaces, if there are any, usually contain the most important data on the failure case. It therefore does not come as a surprise that papers on failure analysis were always an integral part of PM and continue to receive much attention. The latter fact manifests itself in the Top Ten Downloads listing in each issue of PM. What is more, the failure analysis sessions at the Metallography Conferences draw large audiences every year. That said, it should be emphasized that what is new about the "Failure Analysis" section is not innovation in the field, but the commitment that no issue except for the special ones shall be published without a case study on a failure. In the new section's initial phase, when there were not yet enough regular authors available, this was ensured by reprinting suitable chapters from the textbook Handbuch Metallschäden, from the same publisher as PM. These are less complex Das vorliegende Buch enthält eine Sammlung von Schadensfällen, die im Verlauf von dreieinhalb Jahren im monatlich erscheinenden und aus demselben Verlag stammenden Fachjournal "Praktische Metallographie" abgedruckt wurden. Im 48. Jahr ihres Bestehens erhielt die Praktische Metallographie ein Facelift. Das erste Heft mit modernisiertem Lavout erschien im September 2011, pünktlich zur Metallographietagung in Karlsruhe. Eine der Neuerungen war die Einführung einer separaten Rubrik "Failure Analysis". Die Veröffentlichung von Aufsätzen zur Schadensanalvse war für die PM nicht neu. In den 50 Jahren ihrer Existenz sind mehrere hundert Beiträge zum Thema erschienen. Zwischen 1973 und 1997 gab es nur wenige Ausgaben ohne eine Schadensfallstudie. Die fachlichen Gründe dafür liegen auf der Hand. Fraktographische und Schadensfalluntersuchungen erfolgen im Wesentlichen mit den Mitteln des materialographischen Laboratoriums. Die Bruchflächen, so vorhanden, sind in den meisten Fällen der wichtigste Datenträger des Schadensfalles. Es ist deshalb wenig überraschend, dass Aufsätze über Schadensfallanalysen schon immer ihren festen Platz in der PM hatten und jederzeit auf reges Interesse stießen. Dies ist u.a. an der Resonanz bei den Top Ten Downloads abzulesen und äußert sich nicht zuletzt im großen Zulauf, den die Schadensanalyse-Sitzungen jedes Jahr auf den Metallographietagungen haben. Das eigentlich Neue an der Rubrik "Failure Analysis" ist also nicht die fachliche Innovation, sondern die Garantie, dass keine Ausgabe außer den Themenheften ohne eine Schadensfall Studie erscheinen wird. In der Anlaufzeit der neuen Rubrik, solange noch keine ausreichende Anzahl von Beiträgen zur Verfügung stand, wurde dies durch den Nachdruck geeigneter Fallstudien aus dem im gleichen Verlag erschienenen "Handfailure cases, aimed primarily at newcomers in the field.

All of us members of the materialographer community are proud of the high regard the field of materialography in Germany is held in worldwide. Likewise, the field of failure analysis in Germany is highly regarded in the scientific community all over the world. It is an integral part of German engineering and is proud of a tradition almost as long-lasting as that of metallography. By the way, engineering failure analysis is, as the name suggests, a field of engineering and not of the insurance companies. In 1975, the founding fathers of systematic engineering failure analysis in Germany began to network, held workshops, organized conferences, exchanged knowledge and thus established and developed this field of engineering. What is more, guidelines for failure analysts were published. Everybody in the failure analysis community knows VDI-RL 3822. This guide provides order and systematic knowledge for the wide field of engineering failure analysis. Like all VDI guidelines, it is updated every five years. Because of that, not only is it current but grew with the field of engineering failure analysis. Only recently new failure mechanisms and materials were added to this important document. Consequently, the case studies are categorized according to VDI-Richtlinie 3822 "Schadensanalyse", which is an important basis for failure analysis in the German-speaking community.

The focus of discussion of the failure cases in this book is the metallurgical evaluation of failure causes. This is the approach taken in many small and industrial laboratories. A holistic approach of a failure case, which includes calculation and simulation methods such as finite element analysis, and which also implies a knowledge of the service stresses intended by design as well as the actual loading situation of the failed part, is not the aim of this book, *buch Metallschäden"* sichergestellt. Es handelt sich um einfachere Schadensfälle geringer Komplexität, die sich vor allem auch an unerfahrenere, sich noch einarbeitende Fachkolleg(inn)en richten.

Wir alle, die wir dieser Fachgemeinde angehören, sind stolz darauf, dass die Materialographie in Deutschland weltweit hohes Ansehen genießt. Ebenso hohes Ansehen genießend und in fast ebenso langer Tradition stehend ist die Schadensanalyse ein integraler Bestandteil der deutschen Ingenieurwissenschaften und nicht etwa bei den Versicherungen angesiedelt, wie mancher annehmen mag. Auch die Querschnittsdisziplin der Schadensanalyse genießt weltweit hohe Anerkennung und dies vor allem auch deshalb, weil sich die Väter der systematischen Schadensanalyse 1975 in Arbeitskreisen zusammengefunden haben, um das Gebiet zu etablieren und weiterzuentwickeln. Tagungen wurden organisiert, Wissen ausgetauscht und Richtlinien herausgegeben. Alle mit dem Gebiet Vertrauten kennen die VDI-RL 3822. die Ordnung und Systematik in das so vielfältige Gebiet der systematischen Beurteilung technischer Schadensfälle gebracht hat. Die Richtlinie wird, wie alle VDI-RL, alle 5 Jahre überarbeitet und ist so hochaktuell geblieben und mit dem Wissensgebiet gewachsen. Erst vor kurzem sind eine Reihe neuer Werkstoffe und Schadensmechanismen hinzugetreten. Um der Sammlung von Beispielen eine nachvollziehbare Ordnung zu verleihen, wurden deshalb die Kapitel nach werkstofftechnischen Schadensursachen in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3822 "Schadensanalyse" gegliedert, die eine wichtige Grundlage der Schadensanalytik im deutschen Sprachraum ist. Das Kapitel "Fallstudien" wird man deshalb mit besonderem Gewinn in Verbindung mit jener VDI-Richtlinie lesen.

Im Zentrum der Diskussion der in diesem Buch besprochenen Schadensfälle steht die metallkundliche Bewertung der Schadensursachen, so wie sie in vielen kleineren industriellen Laboratorien routinemäßig im Tagesgeschäft durchgeführt wird. Die ganzheitliche Betrachtung eines Schadensfalles, die u. a. die Anwendung von Berechnungsverfahren (z. B. Methode der finiten Elemente) und die genaue Kenntnis der konstruktiv vorgesehenen sowie der even though only the latter elements bring failure analysts near to their ultimate target, which is the determination of primary causes of a failure, called root cause failure analysis. The reader is referred to the literature to learn about holistic approaches to failure analysis, about case studies in other areas of mechanical engineering, and about materials and failure causes that are not covered in this book.

Mistranslation is not completely avoidable in a book like this. The translated column is marked by the heading "Translation". In case of doubt, the original text is applicable. This is the column opposite the translated one.

You may read this book as a sequel to "Handbuch Metallschäden", whose second edition was published in 2012, also by Hanser Verlag. The focus of that book, too, were case studies in failure analysis. The novel approach of this new book is its bilingual presentation. This will facilitate studies in this field for newcomers. This is all the more important, because today it is mandatory in almost all fields of industry, all the more so in education and research, to master English vocabulary, without which it is impossible to read international scientific journals. What is more, English is the lingua franca today in many international businesses. For these situations, this book may be a trustworthy companion and a regularly used textbook.

tatsächlich vorhandenen Beanspruchungen des zu Schaden gekommenen Bauteils mit einschließt und sich erst dadurch dem eigentlichen Ziel jeder Schadensanalytik, nämlich der Ermittlung der primären Schadensursache (Root Cause Analyse) nähern kann, ist ausdrücklich nicht das Ziel der vorliegenden Sammlung von Fallstudien, obwohl in Einzelfällen auch auf diese Aspekte eingegangen wird. Für ein weiterführendes Studium aller Fragen zur ganzheitlichen Herangehensweise an Schadensfallanalysen, zu Schadensfällen in anderen Branchen des Maschinenbaus als den hier besprochenen und zu Schadensfällen mit anderen Werkstoffen und Ursachen als den hier diskutierten sei auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen.

Übersetzungsfehler sind in einem Werk wie diesem nicht ganz zu vermeiden. Die übersetzte Kolumne ist jeweils gekennzeichnet durch die Überschrift "Translation". Im Zweifelsfall gilt der Wortlaut des Originaltextes, der in der jeweils gegenüberliegenden Spalte steht.

Das vorliegende Buch kann als Fortsetzung des 2012 im gleichen Verlag in zweiter Auflage erschienenen "Handbuch Metallschäden" verstanden werden. Auch im Zentrum jenes Buches standen die Schadensfallstudien. Das Neue in dieser Neuerscheinung ist ihre Zweisprachigkeit, die insbesondere neuen Kolleg(inn)en im Fachgebiet die Einarbeitung erleichtern werden, da es heute in fast allen Industriebereichen, erst Recht in Forschung und Lehre, zwingend erforderlich ist, sich auch das englische Fachvokabular anzueignen, ohne das die Auswertung der internationalen Fachliteratur nicht möglich ist. Zudem ist in international tätigen Firmen der interne Schriftverkehr heute ausschließlich in Englisch vorgeschrieben. Für diese Anwendungsfälle möge dieses Buch ein treuer Begleiter und ein gerne genutztes Nachschlagewerk sein.

Berlin, July 2015

Andreas Neidel

Berlin, im Juli 2015

Andreas Neidel

Table of Contents Inhaltsverzeichnis

Foreword Vorwort	V
About the Editor <i>Über den Herausgeber</i>	XIII
List of Co-authors Autorenverzeichnis	XV

TEIL 0 Introduction | *Einleitung*

The Metallographer's Role in Damage Analysis	
Die Rolle der Metallographen in der Schadensuntersuchung	 3

TEIL IMechanical Failures | Schäden durch mechanischeBeanspruchungen

1	Fracture Investigation of an HPC Rotor Drum Bruchuntersuchung am HPC Rotor Drum	17
2	Intercrystalline and Transcrystalline Vibration Fatigue Failure in the Inconel 718 Nickel- Based Alloy <i>Inter- und transkristalliner Schwingbruch in der Nickelbasis-Legierung</i> <i>Inconel 718</i>	33
3	Fracture Investigation on a "Rotating Air Seal" of an Aircraft Engine Bruchuntersuchung an einem "Rotating-Air-Seal" eines Flugzeugtriebwerkes	47
4	Forced Fracture of "Witch Hat" Fuel Oil Filters of a Gas Turbine Engine Test Rig Gewaltbruch bei "Hexenhut"-Heizölfiltern eines Gasturbinenprüfstands	61
5	Metallurgical Failure Investigation of Minor Leakage in a Fuel Oil Return Line of a Combined Cycle Gas Turbine Engine <i>Metallurgische Fehleruntersuchung einer</i> <i>kleinen Leckage an einer Heizölrückleitung einer Kombizyklus-Gasturbine</i>	71
6	Failure Analysis of a Hydraulic Manifold Plate Schadensanalyse an einer Hydraulikverteilerplatte	89

1

15

TEIL IICorrosion Failures | Schäden durch Korrosion in Elektrolyten . . 99

1	Pitting Corrosion Induced Fatigue Fracture on a Gas Turbine Compressor Blade Durch Lochkorrosion induzierter Schwingbruch einer Gasturbinen-Verdichterschaufel	101
2	Fracture Analysis of HPT Shroud Retaining Clips <i>Bruchuntersuchung an</i> <i>HPT Shroud Retaining Clips</i>	117
3	Moving Blade Failure in the Low-Pressure Turbine of a Steam Turbo Set Schaufelschaden in der Niederdruckteilturbine eines Dampfturbosatzes	127
4	Fracture of a Compressor Stator Blade in a Gas Turbine Engine <i>Bruch einer</i> Verdichterleitschaufel im Vorleitrad einer Gasturbine	139
5	Multiple Fractures of Used In-Service Disc Springs in a Stationary Gas Turbine Engine Multiple Brüche an betriebsbeanspruchten Tellerfedern für stationäre Gasturbinen	149
6	Chloride-Induced Stress Corrosion Cracking in 316Ti Fuel Oil Pipes of a Gas Turbine Power Plant <i>Chloridinduzierte Spannungskorrosionsrisse in 316Ti Heizölrohren eines</i> <i>Gasturbinenkraftwerks</i>	159
7	Intergranular Corrosion in Retaining Rings Made of X39CrMo17-1 and X39Cr13 Interkristalline Korrosion in Sicherungsringen aus X39CrMo17-1 und X39Cr13	173
8	Examples of Damage: Fractures and Crack Formation in Zinc Die Casting Components Schadensbeispiele: Brüche und Rissbildung an Bauteilen aus Zink-Druckguss	187

TEIL IIIFailures due to Thermal Overload | Schäden durchthermische Beanspruchungen

1	Liquation Cracks in Hot Upset Low Alloy Steel Screw Heads <i>Wiederaufschmelzungs-</i> risse in warmangestauchten Schraubenköpfen aus einem niedriglegierten Stahl	209
2	High-Temperature Corrosion on Turbine Rotor Blades <i>Hochtemperaturkorrosion an Turbinenlaufschaufeln</i>	219
3	Thermal Fatigue Cracks in Gas Turbine Heat Shield Plates <i>Thermoermüdungsrisse in Hitzeschildplatten von Gasturbinen</i>	231
4	Metallurgical Failure Investigation of Overheated and Fractured Investment Cast Nickel-base Bolts Made of Inconel 939 <i>Metallurgische Schadensuntersuchung an</i> <i>überhitzten und gebrochenen Bolzen aus Nickelbasis-Feinguss aus Inconel 939</i>	241

205

5	Embrittlement of Fuel Gas Piping Made of Wrought Nickel-Based Superalloy Due to Inadequate Heat Treatment <i>Versprödung von Brenngasleitungen aus Nickelbasis-</i> <i>knetlegierung durch ungeeignete Wärmebehandlung</i>	255
6	Transformation of Delta Ferrite Into Sigma Phase in Metastable Austenitic Stainless Steels After Long-Term High-Temperature Service Exposure <i>Umwandlung von</i> <i>Deltaferrit in Sigma-Phase in metastabilen rostfreien austenitischen Stählen nach</i> <i>Langzeitbeanspruchung durch Hochtemperaturen</i>	267
7	Seizing of Gas Turbine Vane Fixing Bolts Made of X22CrMoV12-1 Festsitzende Gasturbinenschaufel-Fixierbolzen aus X22CrMoV12-1	291
8	Selective Laser Melting – Additive Manufacturing's "New Kid on the Block"; TMF Failure of a Y-shaped Pipe in a Burner Test Rig <i>Selektives Laserschmelzen – die neue Technik</i> <i>unter den additiven Fertigungsverfahren; TMF-Versagen eines Y-Rohrs in einem</i> <i>Brennerversuchsstand</i>	307
9	Metallurgical Failure Investigation of Quench Cracking in Hexagonal Bolt Head Fasteners <i>Metallurgische Schadensanalyse von Härterissen in Innensechskant-</i> <i>Schrauben</i>	321
10	Uncharacteristic Circumferential TMF Cracking in a Heavy-duty Stationary Gas Turbine Engine Burner Outlet <i>Ungewöhnliche Temperaturwechselrisse in Umfangsrichtung</i> <i>des Brenneraustritts einer Großgasturbine</i>	335
11	LCF Coupling Failure in a Two-Feet Light Railway <i>Niederzyklischer Kupplungsbruch einer Parkeisenbahn</i>	347

TEIL IV Failures due to Tribological Loading | Schäden durch tribologische Beanspruchung

1	An Analysis of the Failure of a Wheel Hub Schadensanalyse an einer Radnabe	363
2	Adhesive Wear on the Combination Shaft/Bearing Bush of a Valve Actuator	
	Adhäsionsverschleiß der Welle-Lagerbuchse-Paarung eines Ventilantriebes	371

TEIL VHydrogen Embrittlement | Wasserstoffversprödung383

1	Failure of Large High-strength Fasteners by Hydrogen Embrittlement Versagen großer	
	hochfester Verbindungselemente infolge Wasserstoffversprödung	385

361

TEIL VI Material Defects | Werkstofffehler 397

1	The Metallurgical Causes of Structural Inhomogeneities in Hot Rolled Bars of Martensitic 12% Chromium Steels <i>Gefügeinhomogenitäten in warmgewalzten Stäben aus martensitischen 12%-Chromstählen und ihre metallkundlichen Ursachen</i>	399
2	Metallurgical Failure Investigation of Cracked Hook Nuts Used for Upending Gas Turbine Rotors on Site <i>Metallkundliche Schadensuntersuchung gebrochener Hakenmuttern,</i> <i>die dem Aufrichten von Gasturbinenläufern vor Ort dienen</i>	415
Index	x Sachregister	427

About the Editor *Über den Herausgeber*

Prof. Dr.-Ing. Andreas Neidel was born in 1961 and studied mechanical engineering at IH Berlin. He got his doctorate there in 1991 with a thesis on high speed heat treatment of low alloy steel. In 1992 he joined Siemens' Energy Sector. Having worked ever since in quality management functions, he has been manager of the metallography laboratory and later the entire materials testing laboratory. Since May of 2007 he heads the laboratories on the premises of the Berlin Gas Turbine Plant. From October 2015 on he has worked as a Senior Key Expert on Failure Analysis of Siemens Power and Gas Division. In 2012 he was appointed member of the expert workgroup on failure analysis of the society of materials engineering of the German society of engineers (Expertenkreis Schadensanalyse der Gesellschaft Materials Engineering des Vereins Deutscher Ingenieure). In July 2015 Dr. Neidel was appointed Honorary Professor for Metallic Materials of the Berlin Institute of Technology (Technische Universität Berlin).

Prof. Dr.-Ing. Andreas Neidel, Jahrgang 1961, studierte Maschinenbau an der damaligen IH Berlin. Dort wurde er 1991 mit einer Arbeit über die Hochgeschwindigkeitswärmebehandlung niedriglegierter Vergütungsstähle im Fach Werkstofftechnik promoviert. 1992 trat er der Siemens AG bei. Seitdem bekleidet er dort verschiedene Funktionen im Qualitätsmanagement. Nachdem er zunächst das Metallographielabor und später das gesamte Werkstoffprüflabor leitete, ist er seit Mai 2007 Laborleiter der Werkslabore am Standort Berlin Huttenstraße. Seit Oktober 2015 ist er Fachexperte für Schadensanalyse. 2012 wurde er in den Expertenkreis Schadensanalyse der VDI-Gesellschaft Materials Engineering berufen. Im Juli 2015 wurde Dr. Neidel zum Honorarprofessor für das Fachgebiet metallische Werkstoffe der TU Berlin bestellt.

List of Co-authors *Autorenverzeichnis*

List of Co-authors with the Siemens Berlin materials testing laboratory in alphabetical order | *Liste der Koautoren aus dem Berliner Siemens-Werkstoffprüflabor in alphabetischer Reihenfolge*

Cagliyan, Erhan, Berlin Fischer, Boromir, Berlin Gädicke, Tobias, Berlin Giller, Madeleine, Berlin Leggemann, Stefan⁺, Berlin Matijasevic-Lux, Biljana, Berlin Riesenbeck, Susanne, Berlin Scholz, Andreas, Berlin Ullrich, Thomas, Berlin Wallich, Sebastian, Berlin

With full paper contributions by | Autoren anderer in diesem Buch enthaltener Aufsätze

Fruhner, Annett, Hamburg Gartner, Thomas M., PhD, Hamburg Herz, Manfred, Denklingen Dr.-Ing. Hoche, Holger, Darmstadt Triesch, Gordon, Denklingen Wanzek, Horst, Hamburg Weilhammer, Gabriele, München

TEIL O

Introduction *Einleitung*

The Metallographer's Role in Damage Analysis Die Rolle der Metallographen in der Schadensuntersuchung

G. Weilnhammer

Translation: E. Engert

Abstract

The metallographer's role is of extraordinary importance when clarifying cases of damage. This statement is documented by means of an example of corrosion damage on a brewery pipe.

Several different methods have been applied in order to provide for a final result, such as emission spectroscopy analysis, examination of damage areas under the scanning electron microscope including an examination of coatings by means of EDX analysis and examination of the metallographic section.

The comprehensive formation of a metallographer allows for a responsible examination and a summary of results that provides for an overall picture to clarify beyond doubt the cause of the damage.

Kurzfassung

Bei der Klärung von Schadensfällen ist die Rolle der Metallographen außerordentlich wichtig. Dies wird dokumentiert am Beispiel eines Korrosionsschadens an einer Rohrleitung einer Brauereianlage.

Hier wurden verschiedene Methoden wie Emissionsspektralanalyse, Untersuchung der Schadensbereiche am Rasterelektronenmikroskop mit Überprüfung der Beläge mittels EDX-Analyse und Schliffuntersuchung angewandt, um zu einem abschließenden Ergebnis zu kommen.

Die umfassende Ausbildung der Metallographen erlaubt es, eine solche Untersuchung verantwortlich durchzuführen und die Ergebnisse zu einem Gesamtbild zusammenzufassen, um die Schadensursache zweifelsfrei zu klären.

1. Preliminary Remark

In times in which production processes have to be more and more low-priced in order to withstand a constant competitive pressure, more cases of damage occur. These events of damage are caused by low quality materials, improper processing or insufficient formation of the "qualified personnel".

1. Vorbemerkung

Gerade heute, da immer preisgünstiger gefertigt werden muss, um dem ständigen Konkurrenzdruck standzuhalten, ereignen sich immer mehr Schadensfälle durch minderwertiges Material, unsachgemäße Verarbeitung oder unzureichende Ausbildung des "Fachpersonals". That is why it is of particular importance to employ qualified and well formed personnel for damage analysis in order to quickly achieve comprising and realistic results and thus avoid/prevent further events of damage.

A metallographer's formation does not just comprise the examination of metallographic sections of various materials. It also comprises all other examination methods such as spectral analyses, analyses by means of scanning electron microscopes, hardness tests and all types of non-destructive and destructive material testing.

In addition to that, most of the experienced metallographers are able to assess larger contexts of damage causes and to determine the necessary extent of examinations.

The following event of damage is an example for a comprehensive examination aiming at identifying the cause of the damage and at preventing further damage.

Deshalb ist es besonders wichtig, im Rahmen der Schadensuntersuchung qualifiziertes und gut ausgebildetes Personal einzusetzen, um möglichst schnell zu einem umfassenden und realitätsnahen Ergebnis zu gelangen und damit weitere Schadensfälle zu vermeiden bzw. solchen vorzubeugen.

In der Ausbildung der Metallographen ist nicht nur die Untersuchung von metallographischen Schliffen an allen denkbaren Werkstoffen enthalten, sondern auch alle weiteren Untersuchungsmethoden wie Spektralanalysen, Rasterelektronenmikroskopuntersuchungen, Härteprüfungen und alle Arten von zerstörungsfreien und zerstörenden Werkstoffprüfungen.

Darüber hinaus sind die meisten erfahrenen Metallographen in der Lage, übergreifende Zusammenhänge im Hinblick auf die Schadensentstehung zu beurteilen und den erforderlichen Prüfumfang festzulegen.

Der folgende Schadensfall ist ein Beispiel für eine umfassende Untersuchung zur Klärung der Schadensursache und zur Vermeidung weiterer Schäden.

2. Case of Damage: Corrosion Damage on a Brewery Pipe

The present damage caused leakages on a brewery pipe. After visual inspection, the leakage can be attributed to ramified cracks in transverse direction.

The medium in the pipe was beer and a cleaning agent consisting of a 2-2.5% caustic soda NaOH at temperatures of up to 85 °C and 1-1.5% phosphoric acid at temperatures up to 30 °C.

2. Schadensfall: Korrosionsschaden an Rohrleitung aus Brauereianlage

Bei dem vorliegenden Schaden waren an einer Rohrleitung im Bereich einer Brauereianlage Undichtigkeiten aufgetreten. Nach dem äußeren Augenschein sind die Undichtigkeiten zurückzuführen auf quer verlaufende, verästelte Risse.

Das Medium in der Rohrleitung war Bier bzw. Reinigungsmittel, bestehend aus Natronlauge NaOH 2-2,5%ig bei bis zu 85°C und Phosphorsäure 1-1,5%ig bei bis zu 30°C.



Fig. 1: Outer surface of the pipe with coatings and place of damage (encircled) $\approx 1:3$

Bild 1: Rohraußenseite mit Belägen und Schadensstelle (eingekreist) ca. 1:3

The medium around the pipe can be described as follows:

- damp cellar
- possible contact with rust from steel girder S235 (St37)
- Cleaning agent: alkaline and acid foam (containing chloride up to the year 2008).

The client specified 1.4301 (X5CrNi18-10) as material of the pipe.

Two pipe sections with cracks have been delivered for an examination in the laboratory (Figs. 1-4). After a first visual check, the cracks have been



Fig. 2: Detail from image 1: place of damage with crack field ≈ 3:1Bild 2: Ausschnitt aus Bild 1: Schadensstelle mit Rissfeld ca. 3:1

Das Medium außen war wie folgt:

- feuchter Keller
- möglicher Kontakt auch mit Rost aus Stahlträger S235 (St37)
- Reinigungsmittel alkalischer und saurer Schaum (bis 2008 chlorhaltig).

Als Werkstoff für die Rohrleitung war vom Auftraggeber 1.4301 (X5CrNi18–10) angegeben.

Zur Untersuchung im Labor wurden zwei rissbehaftete Rohrabschnitte angeliefert (Bilder 1–4), bei denen nach dem ersten Augenschein die Risse geöffnet



Fig. 3: Another location on the outer surface of the pipe with coatings and places of damage (circle) \approx 1:3

Bild 3: Andere Stelle der Rohraußenseite mit Belägen und Schadensstelle (Kreis) ca. 1:3



Fig. 4: Detail from image 3: place of damage with crack field ≈3:1Bild 4: Ausschnitt aus Bild 3: Schadensstelle mit Rissfeld ca. 3:1

opened and the corrosion products have been secured for subsequent electron beam microanalysis by means of a scanning electron microscope.

After a first visual check of the damage on the presented pieces by the specialist department in cooperation with a leading metallographer the following extent of examinations has been determined:

- Material test by means of emission spectral analysis
- Examination of crack areas under the scanning electron microscope in order to clarify damage characteristics including examination of the corrosion products by means of EDX analysis
- Metallographic examination of different locations in the damage area

3. Examination Results

The pipe material has spectrometrically been analyzed by a qualified materials tester. Here, the device had to be standardized beforehand by means of calibration samples in order to guarantee for the measurement results to be unambiguous and correct.

The result of the complete emission spectrometry analysis of the pipe material in wt.% can be found in the following table.

One of the two crack fields has been split open and the crack area has been examined under the scanning electron microscope (SEM). For this case, the examination has been carried out and evaluated by an experienced metallographer with long-term experience in using SEM. und die Korrosionsprodukte gesichert wurden, um sie später am Rasterelektronenmikroskop mittels Elektronenstrahlmikroanalyse zu untersuchen.

Nach der ersten Sichtung des Schadens an den vorgelegten Schadensteilen durch die Fachabteilung unter Mitwirkung der leitenden Metallographin wurde folgender Untersuchungsumfang festgelegt:

- Werkstoffüberprüfung mittels Emissionsspektralanalyse
- Untersuchung der Rissflächen am Rasterelektronenmikroskop zur Klärung der Schadenscharakteristik einschließlich der Überprüfung der Korrosionsprodukte mittels EDX-Analyse
- Metallographische Untersuchung im Schadensbereich an verschiedenen Stellen

3. Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen

Der Rohrwerkstoff wurde durch einen ausgebildeten Werkstoffprüfer spektrometrisch analysiert, wobei im Vorfeld das Gerät mittels Eichproben standardisiert werden musste um sicherzustellen, dass die Messergebnisse eindeutig und richtig sind.

Das Ergebnis der emissionsspektrometrischen Vollanalyse des Rohrwerkstoffes in Gew.-% ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Eines der beiden Rissfelder wurde aufgebrochen und der Rissbereich am Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Die Untersuchung wurde in diesem Fall durch eine ausgebildete Metallographin mit langjähriger Erfahrung am REM durchgeführt und ausgewertet.

Element	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Мо	Ti	Cu
Wt.%	0,04	0,67	1,48	0,034	0,007	17,30	9,27	0,34	0,023	0,41
Target 1.4301	≤0,07	≤ 1,0	≤2,0	≤0,045	≤0,015	17,5 - 19,5	8,0 - 10,5	_	-	_

The damage is attributed to intergranular stress corrosion originating from the outer surface of the pipe. It was noticeable that also the pipe surface was affected by severe intergranular damages (Fig. 5). Here, individual grains also exhibit needle-shaped deformation structures (Fig. 6).

The coatings on the crack area and on the outer surface of the pipe have been examined by electron Es handelt sich dabei um interkristalline Spannungsrisskorrosion, ausgehend von der Rohraußenseite. Es fiel dabei auf, dass auch die Rohroberfläche bereits stark interkristallin geschädigt war (Bild 5). Hier waren in einzelnen Körnern auch nadelförmige Verformungsstrukturen zu erkennen (Bild 6).

Die Beläge auf der Rissfläche und auf der Rohroberfläche wurden mittels Elektronenstrahlmikroana-









Bild 6: Interkristallin angebeizte Oberfläche mit Gleitlinien in den Körnern Aufn.: 2000:1





beam microanalysis (EDX). Besides relatively high K, S, O, Ca and C content values, proportions of Cl, P and S as well as traces of Na, Ti, Fe and Cu could be found (Fig. 7).

Microsections have been taken of the crack fields from the boundary areas in longitudinal pipe direction for metallographic examination.

The microstructure of the pipe materials consists of austenite with isolated δ -ferrite cells (Fig. 14). On the outer surface of the pipe cold deformed areas with deformation martensite are locally visible (Figs. 11, 12, and 13). The cracks can partially be attributed to transgranular and intergranular stress corrosion, originating from the outer surface of the pipe (Figs. 8, 9 and 10). lyse (EDX) überprüft. Es waren dabei neben relativ hohen K-, S-, O-, Ca- und C-Anzeigen Anteile von Cl, P und S sowie Spuren von Na, Ti, Fe und Cu festzustellen (Bild 7).

Aus den Endbereichen der Rissfelder wurden Mikroschliffe in Rohrlängsrichtung zur metallographischen Untersuchung entnommen.

Das Gefüge der Rohrwerkstoffe besteht aus Austenit mit vereinzelten δ -Ferritzeilen (Bild 14). An der Rohraußenseite sind örtlich kaltverformte Bereiche mit Verformungsmartensit erkennbar (Bilder 11, 12 und 13). Bei den Rissen handelt es sich um teilweise trans-, teilweise interkristalline Spannungsrisskorrosion, ausgehend von der Rohraußenseite (Bilder 8, 9 und 10).





Beraha II



Fig. 9: Detail crack area outer surface of the pipe, Image 100:1, Etchant: Beraha II Bild 9: Ausschnitt Rissbereich Rohraußenseite Aufnahme 100:1, Ätzmittel: Beraha II





Bild 10: Weiterer Ausschnitt Rissbereich, trans- und interkristalline Risse, Aufnahme 100:1, Ätzmittel: Beraha II



Fig. 11: Punctiform cold deformation on the outer surface of the pipe, Image 100:1 Etchant:, Beraha II

Bild 11: Punktförmige Kaltverformung an der Rohroberfläche außen, Aufnahme 100:1, Ätzmittel: Beraha II





Bild 12: Großflächige Kaltverformung an der Rohroberfläche außen, Aufnahme 100:1, Ätzmittel: Beraha II



Fig. 13: Detail from image 11: deformation martensite on the surface, needle-shaped, Image 500:1, Etchant: Beraha II

Bild 13: Ausschnitt aus Bild 11: Verformungsmartensit an der Oberfläche, nadelförmig, Aufnahme 500:1, Ätzmittel: Beraha II



Fig. 14: Microstructure of the pipe material austenite with low δ -ferrite content, Image 200:1, Etchant: Beraha II

Bild 14: Gefüge Rohrwerkstoff Austenit mit wenig δ -Ferrit, Aufnahme 200:1, Ätzm.: Beraha II

4. Summary and Evaluation

The present damage can mainly be attributed to intergranular stress corrosion, originating from the outer surface of the pipe, whereby local cold deformations have probably promoted the damage formation.

The damage has been caused by media containing S and Cl, which have concentrated on the pipe surface in the area of mineral coatings containing K and Ca. These could possibly be residuals of cleaning agents and other harmful substances in humid atmosphere.

No residuals of foreign metal, e.g. rust from steel girder, were visible.

The present pipe material is – as specified – a 1.4301 (X5CrNi18–10) according to DIN EN 10088, whereby the Cr content was lower than the requested nominal value.

4. Zusammenfassung und Beurteilung

Bei dem vorliegenden Schaden handelt es sich um vorwiegend interkristalline Spannungsrisskorrosion, ausgehend von der Rohraußenseite, wobei örtliche Kaltverformungen die Schadensentstehung begünstigt haben dürften.

Der Schaden wurde ausgelöst durch S- und Cl-haltige Medien, die sich an der Rohroberfläche im Bereich von K- und Ca-haltigen, mineralischen Belägen aufkonzentriert haben. Dabei könnte es sich um Rückstände von Reinigungsmitteln und anderen Schadstoffen in feuchter Atmosphäre gehandelt haben.

Rückstände von Fremdmetall, z.B. Rost aus einem Stahlträger waren nicht erkennbar.

Bei dem vorliegenden Rohrwerkstoff handelt es sich – wie angegeben – um einen 1.4301 (X5CrNi18–10) nach DIN EN 10088, wobei der Cr-Gehalt etwas unter dem geforderten Sollwert lag. A material of this kind is not optimally suited for the given application. In this case, a Mo containing CrNi steel such as the type 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2) or a 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2) can be recommended.

5. Closing Remark

Beside the engineering approach to the damage examination presented here, several evaluation aspects – particularly in microstructural analysis – require a qualified metallographer. The cold deformation, for example, which affects the damage formation on the pipe's surface is only recognizable by means of a metallographic section. Ein Werkstoff dieser Art ist für den gegebenen Anwendungszweck nicht optimal geeignet. Hier ist ein Mo-haltiger CrNi-Stahl etwa der Art eines 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2) oder eines 1.4404 (X2CrNi Mo17-12-2) zu empfehlen.

5. Abschließende Bemerkung

Neben den durchaus ingenieursmäßigen Tätigkeiten im Zusammenhang mit der geschilderten Schadensuntersuchung gibt es – gerade in der Gefügeauswertung – einige Punkte, deren Auswertung eine/n versierte/n Metallographen/in verlangt. So ist z.B. die schadensbeeinflussende Kaltverformung an der Rohroberfläche nur durch den metallographischen Schliff erkennbar.

TEILI

Mechanical Failures Schäden durch mechanische Beanspruchungen

1	Fracture Investigation of an HPC Rotor Drum Bruchuntersuchung am HPC Rotor Drum	17
2	Intercrystalline and Transcrystalline Vibration Fatigue Failure in the Inconel 718 Nickel-Based Alloy Inter- und transkristalliner Schwingbruch in der	
	Nickel Basis Legierung Inconel 718	33
3	Fracture Investigation on a "Rotating Air Seal" of an Aircraft Engine <i>Bruchuntersuchung an einem</i>	
	"Rotating-Air-Seal" eines Flugzeugtriebwerkes	47
4	Forced Fracture of "Witch Hat" Fuel Oil Filters of a Gas Turbine Engine Test Rig <i>Gewaltbruch bei</i>	
	"Hexenhut"-Heizölfiltern eines Gasturbinenprüfstands	61

5	Metallurgical Failure Investigation of Minor Leakage	
	in a Fuel Oil Return Line of a Combined Cycle Gas	
	Turbine Engine <i>Metallurgische Fehleruntersuchung</i>	
	einer kleinen Leckage an einer Heizölrückleitung	
	einer Kombizyklus-Gasturbine	71
6	Failure Analysis of a Hydraulic Manifold Plate	
	Schadensanalyse an einer Hydraulikverteilernlatte	89

1

Fracture Investigation of an HPC Rotor Drum Bruchuntersuchung am HPC Rotor Drum

T. Gartner, H. Wanzek

Translation: P. Tate

1. Introduction

A dovetail blade seat in stage 6 of the rotor drum of a high pressure compressor of an aircraft turbine fractured causing the rotor blade to be spun out resulting in considerable damage to other parts of the compressor stage.

A "Service Bulletin" from the engine manufacturer had reported the susceptibility to cracking of such components with high numbers of service hours and advised the appropriate action to be taken to identify any such cracked components to prevent failure.

It was established that all such engines in service with more than 4,000 flight cycles (1 flight cycle = $1 \times$ take-off and landing) were affected and should be inspected. It was recommended that all of the critical areas susceptible to cracking should be individually inspected after each series of 500 flight cycles. The inspection was to be carried out with the engine remaining installed on the wing of the aircraft. The affected sections were to be visually inspected using a boroscope, which because of the construction of the engine made it possible to inspect only the rear face of the blade seat, the contact area between the rotor blade and the blade seat and the front face of the blade seat both being inaccessible and therefore unable to be inspected visually.

1. Einführung

Die 6. Stufe der Schaufelaufnahme einer Rotor Drum (Trommel) im Hochdruckkompressor eines Triebwerkes war gebrochen. Die in dieser Schaufelaufnahme sitzende Laufschaufel wurde herausgeschleudert und verursachte an weiteren Komponenten des Hochdruckkompressors einen erheblichen Sachschaden.

In einem "Service Bulletin" des Triebwerkherstellers wurde auf die Rissanfälligkeit hochstundiger Bauteile hingewiesen und Maßnahmen angeordnet, um angerissene Komponenten rechtzeitig erkennen zu können.

Von dieser Maßnahme sind alle Triebwerke, die mehr als 4000 Flugzyklen (1 Zyklus = 1× Start und Landung) in Betrieb waren, betroffen. Jeweils nach 500 Flugzyklen ist eine Überprüfung des risskritischen Bereiches erforderlich. Das Triebwerk bleibt bei dieser Kontrolle an der Tragfläche des Flugzeuges. Mit einem Boroskop wird die betroffene Sektion inspiziert, aus bautechnischen Gründen ist es jedoch nur möglich die hintere Stirnseite des Schaufelsitzbereiches zu kontrollieren, der Kontaktbereich zwischen der Laufschaufel und dem Schaufelsitz sowie die vorderseitige Stirnseite können nicht eingesehen werden. Should no cracks be found on the rear face, it was recommended that the engine be allowed to be operated for a further 500 flight cycles. Dismantlement and replacement of the drum being required only once cracks had been found or the service life drum achieved.

The damaged drum had last been inspected using a boroscope 50 flight cycles prior to failure without any cracks having been found, the engine having been consequently released for further flight operations. Sind an der hinteren Stirnseite keine Risse zu erkennen, wird das Triebwerk weitere 500 Flugzyklen betrieben. Ein Ausbau oder Austausch der Trommel wird erst bei Rissbefund oder Erreichen der zeitlimitierten Betriebsdauer erforderlich.

Die schadhafte Trommel wurde das letzte Mal vor 50 Flugzyklen mit dem Boroskop untersucht und ohne Rissbefund für den weiteren Einsatz im Flugbetrieb freigegeben.



Fig. 1: Damaged compressor rotor blades Bild 1: Beschädigte Kompressor Laufschaufeln



Fig. 2: Fractured 6th. row blade seat Bild 2: Gebrochene 6. Stufe Schaufelaufnahme

Once the failure had occurred it became imperative to the owner of the engine that not only the cause of the cracking be established, but also that an estimate be made of the rate of progress of the cracking. First observations revealed that it could not be excluded that an existing crack in the key-slot might have been overlooked.

Those active in failure analysis are often confronted with the problem of establishing the age of a particular crack or fracture. This is often very difficult or impossible to say due to the poor condition of the fracture surface due to subsequent mechanical damage or to the fracture surface being obscured by corrosion products. In the case of a fatigue fracture it is possible to gain an indication of the minimum number of load cycles prior to failure by counting the number of fatigue striations (beach marks). This however assumes knowledge of the load and stress conditions responsible for the formation of the fatigue striations. Only in very few exceptional instances do failure analysts have such information. Nach dem Auftreten des Schadens war es neben der Klärung der Rissursache für den Eigner dieses Triebwerkes von hoher Bedeutung eine zeitliche Abschätzung über den Rissfortschritt zu erhalten. Bei erster Betrachtung erschien es nicht ausgeschlossen, dass ein Anriss in der Schaufelaufnahme übersehen worden war.

Wer in der Schadensanalytik tätig ist, wird oft mit dem Problem konfrontiert, eine Angabe über das Alter eines Risses oder Bruches machen zu müssen. Oftmals ist dies aufgrund des schlechten Zustandes einer Bruchfläche durch nachträglich erfolgte Beschädigungen oder durch Belegung der Oberfläche mit Korrosionsprodukten nur schlecht möglich. Im Falle eines Schwingbruches wäre es über das Auszählen von Schwingungsstreifen möglich, eine Aussage über die Mindestanzahl erfolgter Lastwechsel zu treffen. Dies setzt allerdings voraus, dass Kenntnis über die Last- und Spannungszustände, die für das Entstehen von Schwingungsstreifen maßgeblich sind, vorliegt. Nur in wenigen Ausnahmefällen verfügen Schadensanalytiker über diese Daten.

6.STG Laufschaufel / 6th stage rotor/blade Vordere Stirnseite / Front facing side 6.STG Rotor Drum / 6 Stage/otor drum

oroskop / Boroscope

Fig. 3:Boroscope inspection techniqueBild 3:Boroskopier Aufbau-Skizze



Fig. 4: Section through such an engine showing the section in questionBild 4: Schnittzeichnung eines Triebwerkes und Kennzeichnung der betroffenen Sektion

2. Description of Operation

The rotor drum of this type of engine consists of a number of forged discs which are friction welded together to form a drum. Mounted on this drum are the rotor blades of stages 5 to 7 of the high pressure compressor. The entire high pressure compressor consists of 15 interchanging rows of rotor and stator blades. The high pressure compressor rotates at a speed of 1,100 rpm and is driven by the "N2 shaft" of the high pressure turbine.

2. Funktionsbeschreibung

Die Rotor Drum (Trommel) dieses Triebwerksmusters besteht aus mehreren, im Schmiedeverfahren hergestellten Drehscheiben, die im Reibschweißverfahren zu einer Trommel verschweißt sind. Auf dieser Trommel befinden sich die Laufschaufeln der 5. bis 7. Stufe. Der gesamte Hochdruckkompressor besteht aus 15 abwechselnd hintereinander aufgereihten Lauf- und Leitschaufeln. Der Hochdruckkompressor dreht mit einer Drehzahl von 1100 U/min und wird über die "N2 Welle" von der Hochdruckturbine angetrieben.

3. Material Specification

The drum is manufactured from an α/β -Titanium alloy containing 6% Aluminium and 4% Vanadium (TiAl6V4).

3. Werkstoffspezifikation

Die Trommel wird aus einer α/β -Titanlegierung, mit 6% Aluminium und 4% Vanadium (TiAl6V4) hergestellt.

4. Visual Inspection

Once the engine had been dismantled the full extent of the damage became visible. On the out diameter of the damaged drum it could be seen that one of the 40 circumferentially arranged dovetail blade seats had fractured. The rotor blade it had once held was released and spun outwards causing considerable secondary damage. The whole of the drum together with the remaining rotor blades were then tested non-destructively for the presence of cracks. Nothing further was found in the drum, but one of the remaining 39 rotor blades was found to be cracked in the region of the blade seat. This rotor blade was positioned ca. 110° from the broken blade seat. Although part of the failure investigation this damage is however of secondary importance and for the purposes of this article will therefore not be dealt with further.

4. Sichtprüfung

Nach der Zerlegung des Triebwerkes wurde das ganze Ausmaß der Beschädigungen sichtbar. Auf dem Außendurchmesser der schadensursächlichen Trommel war eine der 40 umlaufend formgeschmiedeten Schaufelaufnahmen gebrochen. Die ursprünglich darin eingesetzte Laufschaufel verlor ihren Halt, wurde herausgeschleudert und richtete einen erheblichen Folgeschaden an. Die gesamte Trommel sowie die restlichen Laufschaufeln wurden einer zerstörungsfreien Rissprüfung unterzogen. Die Trommel war ohne weiteren Befund, eine der noch vorhandenen 39 Laufschaufeln war im Schaufelsitzbereich gerissen. Diese Laufschaufel steckte zirka 110° versetzt zu dem gebrochenen Schaufelsitz. Sie war Teil der Schadensuntersuchung, ist aber für diese Veröffentlichung nur von sekundärer Bedeutung und wird deswegen nicht weiter behandelt.



Fig. 5: Fractured 6th. Stage dovetail blade seat Bild 5: Gebrochene 6. Stufe Schaufelaufnahme



Fig. 6: The broken segment removed for investigationBild 6: Herausgetrenntes, gebrochenes Segment

A macroscopic examination of the fracture surface clearly shows the blade seat to have failed by a mechanism of fatigue.

The main characteristics of a fatigue fracture are the macroscopically visible fatigue striations or "beach marks". Fatigue striations are formed each time a change in the condition of loading of the component occurs whenever the rate of crack growth changes or stops momentarily. The surface of the crack may oxidise at this point causing the fatigue striations on the fracture surface to appear in differing colours (1).

In the case investigated here, the different concentric arrangements of fatigue striations indicate that the crack initiated at a number of different points on the contact surface between the foot of the blade and the blade seat.

In order to be able to make some estimate of the rate of progress of the fracture, the fatigue striations were counted in the classical way. The number of fatigue striations visible proved to be at least 90. The small surface area of residual fracture is an indication that the nominal stresses involved were quite low. Bei makroskopischer Betrachtung der Bruchfläche wird deutlich, dass der Schaufelsitz im Modus eines Schwingbruches versagt hat.

Hauptmerkmal für einen Schwingbruch sind die makroskopisch erkennbaren Rastlinien. Rastlinien entstehen, wenn sich durch eine Änderung des Belastungszustandes (z.B. durch Stillstand) die Rissfortschrittsgeschwindigkeit ändert oder der Riss zum Stillstand kommt. Dabei kann die Rissfläche oxidieren, was sich in einem unterschiedlichen Farbton als Rastlinie auf der Bruchfläche darstellt (1).

Im vorliegenden Fall überlagern sich verschiedene konzentrisch ausgebildete Rastlinienkollektive und weisen auf mehrere Rissausgangsbereiche an der Anlagefläche zwischen Laufschaufel und der Schaufelaufnahme hin.

Um eine Aussage über den zeitlichen Ablauf des Bruches machen zu können, wurden die Rastlinien in klassischer Methode ausgezählt. Die Anzahl nachweisbarer Rastlinien lag bei mindestens 90. Der geringe Restbruchanteil ist ein Indiz für eine niedrige Nennspannung.



Fig. 7: Arrangement of the fatigue striations on the fracture surface of the 6th. Stage blade seatBild 7: Rastlinienformation auf der Bruchfläche der 6. Stufe Schaufelaufnahme

The 90 fatigue striations were distributed in the following proportions across the different regions of the fracture surface:

- At least 10 of the fatigue striations end at the contact surface of the blade seat.
- At least 35 of the fatigue striations end at the rear face of the blade seat.
- At least 45 of the fatigue striations end at the front face of the blade seat.

5. Microfractographic Investigation

The segment of the blade seat which caused the failure was cut out and prepared for microfractographic examination in the Scanning Electron Microscope (SEM) Die 90 Rastlinien treten in folgenden Bereichen der Bauteiloberfläche aus:

- mindestens 10 Rastlinien enden an der Anlagefläche
- mindestens 35 Rastlinien enden an der hinteren und
- mindestens 45 Rastlinien an der vorderen Stirnseite der Schaufelaufnahme.

5. Mikrofraktographische Untersuchung

Das schadensursächliche Segment wurde herausgetrennt und für die mikrofraktographische Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop (REM) vorbereitet. Signs of extremely high plastic deformation are visible on the region of contact between the blade and the blade seat. This indicates a high degree of fretting between the two components. A number of the plastically deformed structures probably occurred as a result of the release of the rotor blade and as such are considered to be secondary damage (Fig. 8).

Very fine fatigue striations were observed in the area of the edge to the back of the surface, in this region the crack grew in accordance with the predominant crystallographic orientation of the microstructure (Fig. 9). The fan shaped trans-crystalline crack growth observed across the rest of the fracture is typical of the brittle type of fatigue fracture seen in Titanium alloys (Fig. 10, 11 und 12).

The small area of rest fracture exhibits the shear dimples characteristic of fracture in a ductile material.

Im Kontaktbereich zwischen der Laufschaufel und dem Schaufelsitz sind extrem hohe plastische Verformungen erkennbar. Dies deutet auf hohe Reibkräfte zwischen den beiden Bauteilen hin. Einige der plastisch verformten Strukturen entstanden sehr wahrscheinlich erst durch das Ausbrechen der Laufschaufel und sind demnach als Folgeschäden einzustufen (Bild 8).

Im unmittelbaren Bereich der Kante hinter der Oberfläche sind sehr feine Schwingungsstreifen vorhanden, die Rissausbreitung erfolgte hier noch kristallographisch orientiert (Bild 9). Die im weiteren Rissfortschritt fächerförmige transkristalline Ausbreitung des Risses ist typisch für eine spröde Form des Schwingbruches in Titanlegierungen (Bild 10, 11 und 12).

Der schmale Restbruchbereich zeigt die für einen duktilen Werkstoff charakteristischen Scherzugwaben.





Bild 8: Reibverschleiß an der Kante zur Bruchfläche



25.0 kV 13.1 mm 2453x ETD ---



Fig. 9: Crystallographically orientated crack growth

Bild 9: Kristallographisch orientierter Rissfortschritt



Bild 10: Fächerförmiger, transkristalliner Schwingbruch





I

Bild 11: Fächerförmiger Schwingbruch bei höherer Vergrößerung





Fig. 13: Shear dimples giving an indication of ductility in the rest fracture

Bild 13: Scherzugwaben als Indiz für ein duktiles Verhalten im Restbruchbereich



Fig. 14:Fractured blade seatBild 14:Gebrochene Schaufelaufnahme

The exceptionally good condition of the fracture surface and the absence of any corrosion products or mechanical damage indicate the fracture to have occurred comparatively recently.

In the BSE-mode (Back Scattered Electron detector) dark areas of shading in various different shades of grey were seen on the surface of the fracture which proved to be wear residue from the thermally sprayed Der ungewöhnlich gute Zustand der Bruchfläche, die fehlenden Korrosionsprodukte und die fehlenden mechanischen Beschädigungen weisen auf einen "jungen" Bruch hin.

Im BSE-Mode (Rückstreuelektronendetektor) waren auf der Bruchfläche in unterschiedlichen Graustufen dunkle Schattierungen zu erkennen, die sich als Abrieb einer thermisch gespritzten tribologischen



Fig. 15: In BSE-contrast dark areas of shading can be seen on the surface of the fracture Bild 15: Im BSE Kontrast sind dunkle Schattierungen auf der Bruchfläche zu erkennen



Fig. 16: In the EDX element distribution map, the elements Cu, Ni, S and Mo are differentiated in different colours from the base Titanium base material (Magenta)

Bild 16: In einem EDX Elementverteilungsbild unterscheiden sich die Elemente Cu, Ni, S und Mo farblich vom Basismaterial Titan (Magenta)

tribological coating. As a protection against wear, a Copper–Nickel–Indium coating is plasma sprayed onto the metal to metal contact surfaces of the rotor blades, on top of which an additional film of dry lubricant (Sulphur-Molybdenum-based) is applied.

In contrast to the base material (Titanium), the EDX element distribution map reveals an irregular distribution of the elements Copper, Nickel, Sulphur and Molybdenum. The identification of residues from the plasma coating allows the conclusion to be made that at the time of initiation of the cracks a high pressure was acting on the blade seat. The plasma coating, which is applied only to the metal to metal contact surfaces of the rotor blade had been worn away and the wear residues become trapped and squashed between the edges of the crack in the blade seat. Schicht erwiesen. Auf der Anlagefläche der Laufschaufeln wird als Reibschutz eine Kupfer-Nickel-Indium Schicht aufgespritzt, auf der zusätzlich noch ein Trockenschmierfilm (Schwefel-Molybdän-Basis) aufgetragen wird.

Das EDX Elementverteilungsbild zeigt im Kontrast zum Basismaterial (Titan) eine ungleichmäßige Verteilung der Elemente Kupfer, Nickel, Schwefel und Molybdän. Der Nachweis von Resten der Plasmabeschichtung erlaubt den Rückschluss, dass zum Zeitpunkt der Riss-Initialisierung hoher Druck auf den Schaufelsitz gewirkt hat. Die Plasmabeschichtung, die nur auf den Kontaktflächen der Laufschaufel aufgetragen wurde, hatte sich abgerieben und zwischen die Rissflanken der Schaufelaufnahme gequetscht.

6. Metallographical Investigation

Both the damaged area and undamaged areas were cut from the blade seat for metallographic investigation.

In the metallographic cross-section prepared through the point of initiation of the crack, plastically de-



Fig. 17: Cross-section through the point of initiation of the crack showing secondary cracking beneath the fracture surface

Bild 17: Querschnitt durch den Rissausgangsbereich zeigt Sekundärrisse unterhalb der Bruchebene

6. Metallographische Untersuchung

Für die metallographische Untersuchung wurden das schadensursächliche sowie weitere unbeschädigte Schaufelsitzbereiche herausgetrennt.

Im metallographischen Querschliff durch den Bruchausgang waren an der Oberfläche dicht unterhalb



Fig. 18: Oxidised fatigue crack Bild 18: Oxidierter Schwingungsriss



Fig. 19: Fretting on the surface and extreme plastic deformation of the microstructure

Bild 19: Reiboxidation auf der Oberfläche und extrem plastisch verformtes Gefüge

formed areas of microstructure, fretting and secondary fatigue cracking were apparent at the surface immediately beneath the main plane of fracture. The unaffected microstructure of the Titanium alloy shows the globular (α + β)-structure typical of this alloy.

The metallographic investigation of the unbroken and un-cracked blade seats do not exhibit these features. As a result of this, particular conditions must have existed between the components in contact in the failed blade seat which caused the fretting and resulting failure.

Geometrical deviations or material defects were not found in the drum itself.

7. Conclusion

The blade seat of the drum failed through a mechanism of fatigue.

The cause of the damage was fretting which occurred as a result of high frequency reciprocating wear between the contacting surfaces of the rotor blade and the blade seat. As a result of the high reciprocating loading of the surfaces cracks initiated which finally resulted in a fatigue fracture.

The plasma coating applied to the contact surfaces of the rotor blade to prevent fretting and the film of dry lubricant applied both proved to be ineffective.

The overall picture of the failure with the well preserved condition of the fracture surface and absence of corrosion products indicate that failure occurred over a comparatively short period of time with rapid crack growth.

An attempt was made to answer the question regarding the time frame over which the fracture occurred der Hauptbruchebene plastisch verformtes Gefüge, Reiboxidation sowie weitere Schwingungsrisse festzustellen. Das unbeeinflusste Gefüge der Titanlegierung zeigt die typische globulare (α + β)-Struktur.

Die metallographische Untersuchung der nicht gebrochenen oder gerissenen Schaufelaufnahmen zeigte diese Befunde nicht. Demzufolge müssen zwischen den Komponenten am schadensursächlichen Schaufelsitz Bedingungen vorgelegen haben, die ursächlich für Reiboxidation und deren Folge waren.

Geometrische Abweichungen oder werkstofftechnische Fehler waren an der Trommel nicht festzustellen.

7. Ergebnis

Der Schaufelsitz der Trommel hat im Modus eines Schwingbruches versagt.

Schadensursächlich ist Reibkorrosion (Reiboxidation), die infolge hochfrequenten Schwingungsverschleißes an der Kontaktfläche zwischen der Laufschaufel und dem Schaufelsitz entstanden ist. Durch hohe mechanische Oberflächenbelastung kommt es unter der Wechselbeanspruchung zu Anrissen und letztlich zum Schwingbruch.

Die auf der Anlagefläche der Laufschaufel zum Schutz gegen Reiboxidation präventiv aufgebrachte Plasmabeschichtung und der aufgetragene Trockenschmierfilm erwiesen sich als unzureichend.

Das gesamte Schadensbild, der sehr gut erhaltene Zustand der Bruchfläche sowie die fehlenden Korrosionsprodukte deuten auf ein kurzzeitiges Schadensereignis mit schnellem Rissfortschritt hin.

Die Fragestellung hinsichtlich eines zeitlichen Ablaufes dieses Bruches wurde über die Anzahl der