

Multiple Fractures of Used In-Service Disc Springs in a Stationary Gas Turbine Engine

Multiple Brüche an betriebsbeanspruchten Tellerfedern für stationäre Gasturbinen

A. Neidel, E. Cagliyan

Translation: E. Engert

Abstract

Multiple cracking was observed in disc springs made from an austenitic stainless steel and used in large stationary gas turbine engines. It was determined that they failed in service by bending overload. The metallurgical cause of the cracking was found to be grain boundary embrittlement by secondary chromium carbide precipitates. They formed upon heat treatment during manufacture of the components. It was recommended to either alter heat treatment parameters to avoid embrittlement, or to select a different spring steel that does not require heat treatment.

Kurzfassung

In aus austenitischem rostfreiem Stahl gefertigten und in stationären Großgasturbinen eingesetzten Tellerfedern wurden multiple Brüche beobachtet. Es wurde festgestellt, dass sie während des Betriebs durch Biegeüberbeanspruchung versagten. Als metallurgische Ursache für die Rissbildung konnte Korngrenzenversprödung durch Ausscheidungen sekundärer Chromcarbide erkannt werden. Die Ausscheidungen bildeten sich während der Wärmebehandlung bei der Herstellung der Bauteile. Es wurde zur Vermeidung der Versprödung empfohlen, entweder die Parameter der Wärmebehandlung zu ändern oder einen anderen Federstahl auszuwählen, der keine Wärmebehandlung erforderlich macht.

1. Introduction

Disc springs are extensively used in mechanical engineering. They are also employed in multiple applications throughout large industrial stationary gas turbine engines, particularly in fasteners and connecting elements of all sorts. Exemplarily, their use

1. Einleitung

Tellerfedern werden umfangreich im Bereich Maschinenbau eingesetzt. Sie werden außerdem in vielfältigen Anwendungen rund um stationäre industrielle Großgasturbinen eingesetzt, insbesondere in Befestigungs- und Verbindungselementen. Exem-



Fig. 1: Levers of variable inlet guide vanes of a gas turbine compressor (right)
[Source: Siemens Media Database]

Bild 1: Verdichterleitschaufelverstellung einer Großgasturbine (rechte Bildseite)
[Quelle: Siemens Media Database]

in actuators of variable inlet guide vanes of a gas turbine compressor is shown in Fig. 1 [1].

In the case at hand, conical spring washers, so-called Belleville springs [2], manufactured by a European supplier, were found to be cracking in engine service. They were made of the austenitic stainless spring steel X7CrNiAl 17-7 (1.4568), a material commonly used in elevated-temperature applications up to 350 °C.

2. Austenitic Spring Steels

The high-alloy, metastable austenitic stainless spring steel X7CrNiAl17-7 is a rather common spring steel and specified in Germany as Werkstoff-Nr. 1.4568, in the European Standard system as EN 10088-2, the Aerospace Material Specification knows it as AMS 5528, the American Institute for Steels and Iron lists it as AISI 631, the Unified Numbering System as UNS S17700, and the American Society for Testing and Materials as ASTM A693 grade 631, a.k.a. 17-7 PH. It is a precipitation-hardenable, corrosion and heat resistant material. It is processed in a solution

plärisch wird ihre Verwendung in Stellantrieben verstellbarer Eintrittsleitschaufeln eines Gasturbinenverdichters in Bild 1 gezeigt [1].

Im vorliegenden Fall kam es im Betrieb zu einer Rissbildung an Tellerfedern, sogenannten Belleville-Federn [2], die von einem europäischen Anbieter hergestellt wurden. Sie wurden aus austenitischem rostfreiem Federstahl X7CrNiAl 17-7 (1.4568), einem häufig für Anwendungen bei erhöhten Temperaturen bis zu 350 °C eingesetzten Werkstoff, gefertigt.

2. Austenitische Federstähle

Der rostfreie hochlegierte metastabile austenitische Stahl X7CrNiAl17-7 ist ein eher häufig vorkommender Federstahl, der in Deutschland mit Werkstoff-Nr. 1.4568, im System der Europäischen Norm mit EN 10088-2 und in der Aerospace Material Specification (Werkstoffspezifikationsnorm für den Bereich Luft- und Raumfahrt) als AMS 5528 bezeichnet wird. Das Amerikanische Institut für Stähle und Eisen führt ihn als AISI 631 auf, das Unified Numbering System (in den USA gebräuchliches einheitliches Klassifizierungssystem) als UNS S17700 und die Amerika-

annealed condition and obtains its strength from a two-step ageing heat treatment. The first precipitation hardening step is performed at 760 °C. At this temperature, chromium carbide precipitates are being formed, primarily at the grain boundaries, thus increasing heat resistance, strength and hardness, but decreasing ductility and toughness at the same time. This expected condition, i.e. grain boundary carbides, was found in the microstructure of the examined fractured Belleville springs (rf. para 3). It was also confirmed by EDX-mapping (rf. para 3.3).

Austenitic spring steels are selected if corrosion and/or heat resistance is required. Spring steels need to be relatively hard and strong to serve their intended function. However, austenitic steels are generally neither particularly strong nor hard. What is more, they are not hardenable by martensitic transformation since they do not undergo allotropic modifications with temperature changes. In order to strengthen them, they are either strain hardened or precipitation hardened (aged) or both [2]. The subject steel of the failed springs is aged. Brinell hardness was measured at 481 HBW 2,5/187,5 on average.

In order to give 1.4568 the intended combination of mechanical properties required for spring steel, the described ageing heat treatment at 760 °C intentionally precipitates grain boundary carbides, something that is usually carefully avoided in the processing of austenitic stainless steels. The trade-off is a drop in corrosion resistance. What is often forgotten in this context is the fact that grain boundary carbides might not only diminish the corrosion resistance, but also the toughness of the material. Once a crack has initiated in a component made out of such a steel, it can travel more easily along grain boundaries weakened by secondary chromium carbide pre-

nische Gesellschaft für Werkstoffprüfung als ASTM A693 Grade 631, auch bekannt als 17-7 PH. Er ist ein ausscheidungshärtbarer, korrosions- und hitzebeständiger Werkstoff, der in lösungsgeglühtem Zustand verarbeitet wird und seine Festigkeit über eine zweistufige Auslagerungswärmebehandlung erhält. Der erste Schritt der Ausscheidungshärtung wird bei 760 °C durchgeführt. Bei dieser Temperatur bilden sich in erster Linie Chromcarbidausscheidungen an den Korngrenzen und somit eine erhöhte Hitzebeständigkeit, Festigkeit und Härte, allerdings kommt es gleichzeitig auch zu abnehmender Duktilität und Zähigkeit. Die Korngrenzencarbide, also der erwartete Zustand, traten in der Mikrostruktur der untersuchten gebrochenen Belleville-Federn auf (siehe Kap. 3). Sie wurden ferner mittels EDX-Mapping bestätigt (siehe Kap. 3.3).

Austenitische Federstähle werden gewählt, wenn Korrosions- und/oder Hitzebeständigkeit erforderlich sind. Federstähle müssen relativ hart und fest sein, damit sie sich für ihre vorgesehene Funktion eignen. Allerdings sind austenitische Stähle grundsätzlich weder fest noch hart. Darüber hinaus sind sie nicht durch eine martensitische Umwandlung härtbar, da sie bei Temperaturänderungen keine allotrope Modifikationen durchlaufen. Um ihre Festigkeit zu erhöhen, werden sie entweder kaltverfestigt oder ausscheidungsgehärtet (ausgelagert) oder beides [2]. Der vorliegende Stahl der gebrochenen Federn wurde ausscheidungsgehärtet. Die Brinellhärte wurde mit durchschnittlich 481 HBW 2,5/187,5 gemessen.

Um 1.4568 die gewünschte Kombination aus mechanischen Eigenschaften zu verleihen, die für Federstahl erforderlich ist, führt die Aushärtung bei 760 °C gewollt zu einer Ausscheidung von Korngrenzencarbiden, was bei der Verarbeitung von austenitischen rostfreien Stählen normalerweise sorgfältig vermieden wird. Im Gegenzug dazu kommt es zu einem Rückgang der Korrosionsbeständigkeit. Oftmals wird in diesem Zusammenhang vergessen, dass die Korngrenzencarbide nicht nur die Korrosionsbeständigkeit verringern können, sondern ebenso die Zähigkeit des Werkstoffs. Sobald ein Riss in einem aus diesem Stahl gefertigten Bauteil ent-

cipitates. The resultant intergranular cracking is generally considered to be unacceptable in engineering components.

steht, kann er leichter entlang der durch sekundäre Chromcarbidausscheidungen geschwächten Korngrenzen verlaufen. Die daraus resultierende interkristalline Rissbildung wird in technischen Komponenten im Allgemeinen als inakzeptabel angesehen.

3. Materials Testing Results

3.1 General Remarks

Two broken Belleville springs (Fig. 2) were delivered to the gas turbine engine manufacturer's laboratory in order to determine the reason of the cracking (Fig. 3). Dimensional measurements, verification of chemical composition, hardness testing, metallographic sectioning, scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX), and fractography were all employed to find the root cause of the cracking.

3.2 Checks of Dimensions and Chemical Composition

As could be expected, a certain amount of vertical displacement of the mating fracture surfaces occurred after the springs completely cracked through



Fig. 2: Fractured disc springs in as-received condition

Bild 2: Gebrochene Tellerfedern im Anlieferungszustand

3. Ergebnisse der Materialprüfung

3.1 Allgemeine Anmerkungen

Zwei gebrochene Belleville-Federn (Bild 2) wurden dem Labor des Gasturbinenherstellers geliefert, um die Bruchursache zu bestimmen (Bild 3). Zur Bestimmung der Ursache des Bruches wurden folgende Verfahren durchgeführt: Maßprüfung, Überprüfung der chemischen Zusammensetzung, Härteprüfung, metallographische Schliffe, Rasterelektronenmikroskopie (REM), energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) und Fraktographie.

3.2 Überprüfung der Abmessungen und der chemischen Zusammensetzung

Wie zu erwarten, trat in einem gewissen Umfang eine vertikale Verschiebung der Gegenflächen des Bruchs (Verspringen der Rissufer) auf, nachdem



Fig. 3: Closer view of Fig. 2

Bild 3: Detail aus Bild 2

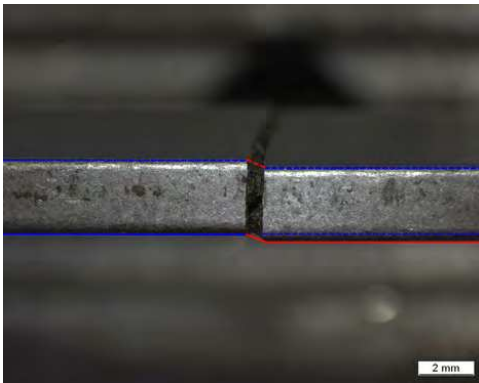


Fig. 4: Vertical displacement after fracture

Bild 4: Verspringen der Rissufer nach dem Bruch

(Fig. 4), this due to the high residual stresses present in such components. The geometric dimensions were checked according to [3] and no deviations were found. The material of the fractured Belleville springs was checked by means of X-ray fluorescence analysis and also found to be within the specified limits of the pertinent internal purchasing specification for X7CrNiAl17-7, Werkstoff-Nr. 1.4568 [3].

3.3 Microstructure

The subject steel of the failed springs is aged. Brinell hardness was measured at 481 HBW 2,5/187,5 on average of five indentations. Fig. 5 shows an overview of the very fine-grained microstructure. In the closer view of Fig. 6, secondary grain boundary chromium carbide precipitates formed upon heat treatment can clearly be seen. These secondary phases are large enough to be imaged in the back-scattered electron mode (elemental contrast) of the scanning electron microscope (Fig. 7), and can be seen even in an EDX map (Fig. 8).

die Federn aufgrund der in solchen Komponenten auftretenden hohen Eigenspannungen vollständig durchrissen (Bild 4). Die geometrischen Abmessungen wurden gemäß [3] überprüft und es wurden keine Abweichungen gefunden. Der Werkstoff der gebrochenen Belleville-Federn wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse überprüft und als innerhalb der vorgegebenen Grenzen der entsprechenden internen Einkaufsspezifikation für X7CrNiAl17-7, Werkstoff-Nr. 1.4568 ermittelt [3].

3.3 Mikrostruktur

Der vorliegende Stahl der gebrochenen Federn wurde ausscheidungsgehärtet. Eine Brinellhärte von 481 HBW 2,5/187,5 wurde bei durchschnittlich fünf Eindrücken gemessen. Bild 5 zeigt einen Überblick der sehr feinkörnigen Mikrostruktur. In einer Detailansicht in Bild 6 sind durch die Wärmebehandlung gebildete sekundäre Chromcarbidausscheidungen an den Korngrenzen klar erkennbar. Diese sekundären Phasen sind groß genug, um im Rückstreuungselektronenmodus (Elementkontrast) des Rasterelektronenmikroskops abgebildet zu werden (Bild 7). Sie sind sogar in einem EDX-Mapping zu erkennen (Bild 8).

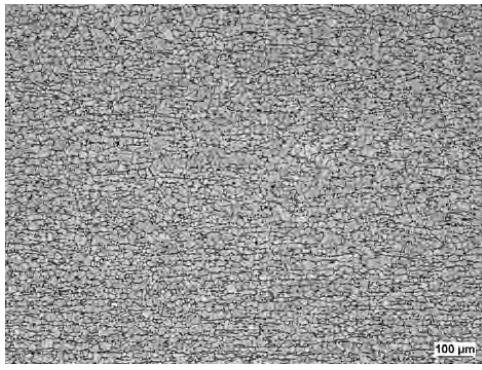


Fig. 5: Microstructure of failed disc spring. Overview, 100x

Bild 5: Gefügeübersicht einer der gebrochenen Tellerfedern, ca. 100:1



Fig. 6: Detail of Fig. 5. Note secondary grain boundary carbide precipitates, and primary titanium carbonitride precipitates (orange), 500x

Bild 6: Detail aus Bild 5. Sekundäre Korngrenzencarbide und primäre Titancarbonitride (orange), ca. 500:1

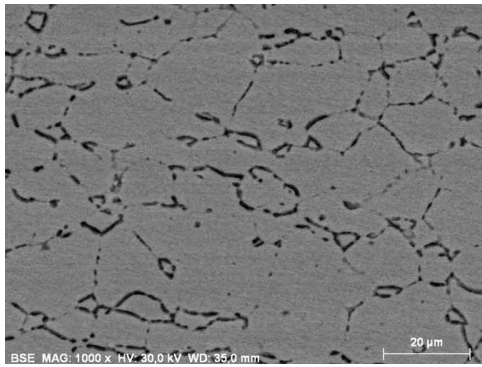


Fig. 7: Detail of Fig. 6. Scanning electron micrograph, backscattered electron image

Bild 7: Detail aus Bild 6, rasterelektronenmikroskopische Aufnahme, Rückstreuelektronenbild

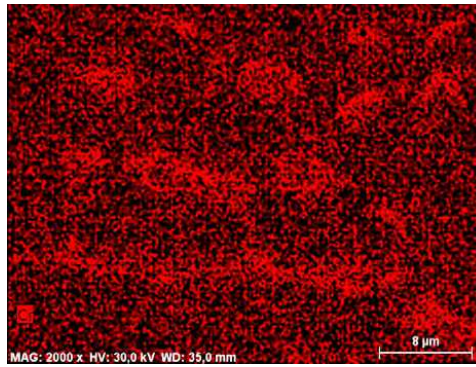


Fig. 8: EDX chromium map. Secondary grain boundary chromium carbide precipitates

Bild 8: Chrom-Mapping (EDX). Sekundäre Chromcarbidausscheidungen auf den Korngrenzen

3.4 Macro- and Microfractography

Fig. 9 shows a photomacrograph of one of the subject disc springs taken in the as-received, uncleaned condition. A dark seam is visible around the edges. It is caused by residues from lubricants used in service. Obviously, there was a pre-existing crack taking on lubricant, before final fracture by bending overload. Fig. 10 clearly demonstrates the predominant intergranular fracture caused by grain boundary

3.4 Makro- und Mikrofraktographie

Bild 9 zeigt eine Makroaufnahme einer der vorliegenden Tellerfedern im ungereinigten Anlieferungszustand. An den Rändern ist ein dunkler Saum erkennbar. Er wird durch Rückstände von während des Betriebs verwendeten Schmiermitteln verursacht. Offensichtlich gab es vor dem endgültigen Bruch durch Biegeüberbeanspruchung einen bereits vorhandenen Riss, der Schmiermittel aufnahm.

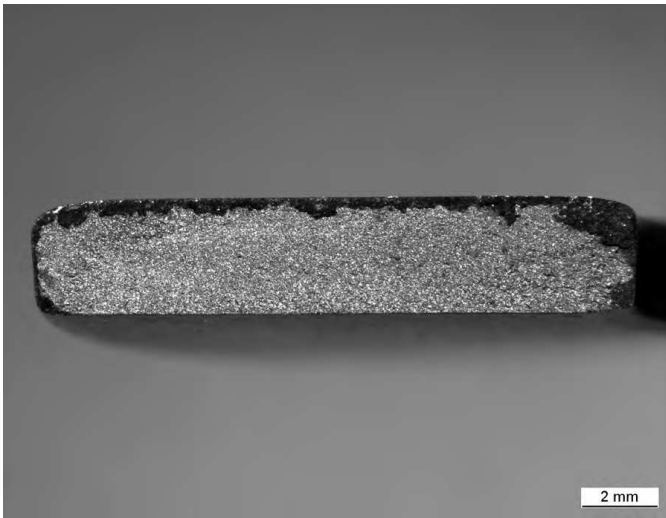


Fig. 9: Macrofractograph of cracked-through Belleville spring

Bild 9: Bruchfläche der durchgerissenen Tellerfeder

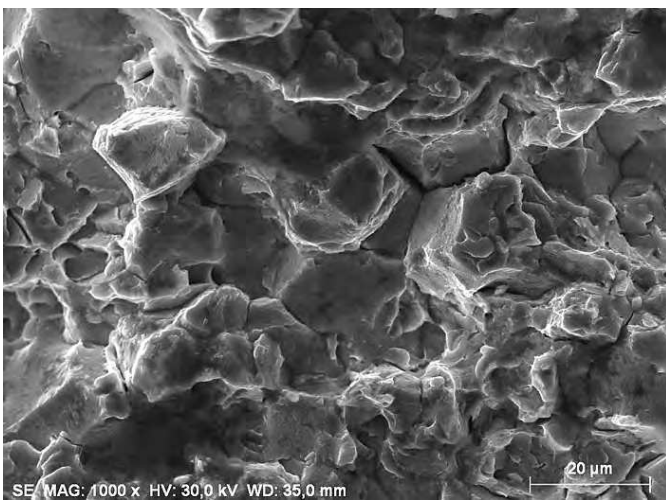


Fig. 10: Scanning electron microfractograph of disc spring's fracture surface, Secondary electron image. Note predominant intergranular fracture.

Bild 10: Mikrofraktographische Aufnahme der Bruchfläche der durchgerissenen Tellerfeder (REM). Sekundärelektronenbild. Überwiegend interkristalliner Bruch

embrittlement. Interestingly, the backscattered electron imaging mode is better suited to show this (Fig. 11).

Bild 10 demonstriert deutlich den überwiegend interkristallinen Bruch, der durch Korngrenzenversprödung verursacht wurde. Der Rückstreu-elektronenmodus eignet sich für die Darstellung interessanterweise besser (Bild 11).

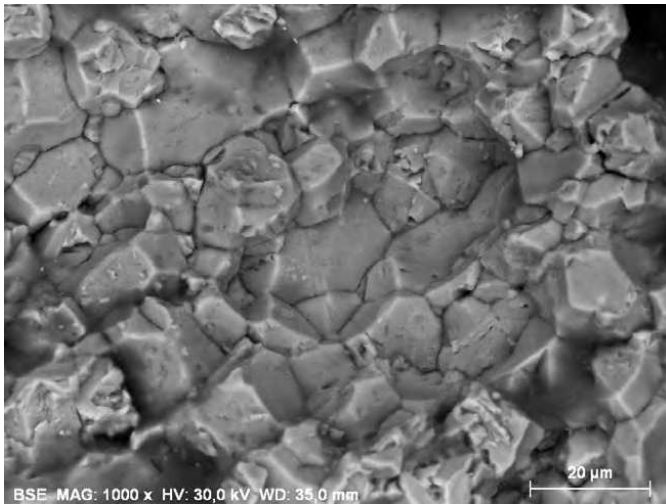


Fig. 11: Like Fig. 10, backscattered electron image

Bild 11: Wie Bild 10, aber Rückstreuungselektronenbild

4. Discussion and Conclusions

The subject Belleville springs failed by bending overload in an intergranular fracture mode. No evidence of fatigue failure was found on the fracture surfaces. Also, no material defects such as imperfections or machining marks were detected.

The heat treatment condition of the spring steel is considered to be a strong contributing factor. The root cause of the failure is a non-optimal material selection [4 - 10].

Even though no evidence of fatigue failure could be found in the subject disc springs, fatigue cracking by reversed bending and final bending overload cannot be excluded as the metallurgical root cause of the failure.

4. Diskussion und Schlussfolgerungen

Die vorliegenden Belleville-Federn versagten bei einer Biegeüberbeanspruchung als interkristalliner Bruch. Auf den Bruchoberflächen konnten keine Anzeichen eines Versagens durch Ermüdung gefunden werden. Es wurden auch keine Materialfehler wie Fehlerstellen oder auf die Bearbeitung zurückgehende Narben gefunden.

Der Wärmebehandlungszustand des Federstahls wird als wesentlich beeinflussender Faktor angesehen. Die Ursache des Versagens ist eine nicht optimale Werkstoffauswahl [4 - 10].

Auch wenn in den vorliegenden Tellerfedern keine Anzeichen für ein Versagen durch Ermüdung gefunden werden konnten, kann Ermüdungsrisssbildung durch Biegewechsel- und schließliche Biegeüberbeanspruchung nicht als metallurgische Ursache des Versagens ausgeschlossen werden.

5. Recommendations

It is recommended to use a different austenitic stainless spring steel that does not require the ageing heat treatment at the chromium carbide precipitation temperature of 760 °C. For the intended application in the variable guide vane control of a stationary gas turbine engine, heat resistance up to 350 °C, which would warrant 1.4568 in the precipitation hardened condition, is not required. 1.4310 or 1.4401 should be used instead. They are strengthened by strain hardening only (possible up to 2.5 mm thickness). Alternatively, 1.4568 with a one-step ageing at 480 °C may be considered (possible up to 3.0 mm thickness). Should the thickness requirement be restrictive, it is recommended to re-design the disc spring blocks and use a larger number of thinner springs, or to select higher-strength martensitic steels such as 1.4122 or 1.4923 instead. Their lack of corrosion resistance should not be a problem in the intended application.

5. Empfehlungen

Es wird empfohlen, einen anderen austenitischen rostfreien Federstahl einzusetzen, der keine Auslagerungswärmebehandlung bei der Temperatur der Chromcarbidausscheidung von 760 °C erfordert. Für die vorgesehene Anwendung in der verstellbaren Leitschaufelregulierung einer stationären Gasturbine ist eine Hitzebeständigkeit bis zu 350 °C, die 1.4568 in ausscheidungsgehärtetem Zustand rechtfertigen würde, nicht erforderlich. Stattdessen sollte 1.4310 oder 1.4401 verwendet werden. Diese werden lediglich kaltverfestigt (möglich bis zu einer Dicke von 2,5 mm). Alternativ dazu kann 1.4568 mit einer einstufigen Auslagerung bei 480 °C in Betracht gezogen werden (möglich bis zu einer Dicke von 3,0 mm). Sollten die Anforderungen an die Dicke zu Einschränkungen führen, wird empfohlen, die Tellerfederblöcke umzugestalten und eine größere Anzahl von dünneren Federn einzusetzen oder stattdessen martensitische Stähle höherer Festigkeit wie beispielsweise 1.4122 oder 1.4923 einzusetzen. Ihr Mangel an Korrosionsbeständigkeit sollte in den vorgesehenen Anwendungen kein Problem darstellen.



References | Literatur

- [1] Seume, J.; Lechner, C. (Ed.): Stationäre Gasturbinen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Deutschland, 2003.
- [2] <http://www.christianbauer.com/seiten/englisch/Tellerfedern/tellerfedern-1.htm>, last accessed October 17, 2012, 20:20
- [3] DGSLV 850099, Siemens AG, internal purchasing specification
- [4] Rapatz, F.: Die Edelmetalle. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1962
- [5] Lange, G. (Hrsg.): Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle. 3. Auflage, DGM, 1992.
- [6] Grosch, J.: Schadenskunde im Maschinenbau. 4. Auflage, Expert Verlag, 2004.
- [7] ASM Handbook, Volume II: Failure Analysis and Prevention. 6. Auflage, ASM International, 1998.
- [8] Engel, L.; Klingele, H.: Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschäden, Gerling Institut für Schadensforschung und Schadensverhütung, 1974.
- [9] Neidel, A. (Hrsg.): Handbuch Metallschäden. 2. Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien 2012
- [10] Neidel, A.; Yao, C.: Practical Failure Analysis 2003, Volume 3(6), pgs. 41–46.