

# The Metallographer's Role in Damage Analysis

## *Die Rolle der Metallographen in der Schadensuntersuchung*

G. Weilhhammer

*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.

### 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".

### 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 Schliiffuntersuchung 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. 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.

## 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.

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 Schlifften an allen denkbaren Werkstoffen enthalten, sondern auch alle weiteren Untersuchungsmethoden wie Spektralanalysen, Rasterelektronenmikroskopuntersuchungen, Härteprüfungen und alle Arten von zerstörungsfreien und zerstörenden Werkstoffprüfungen.

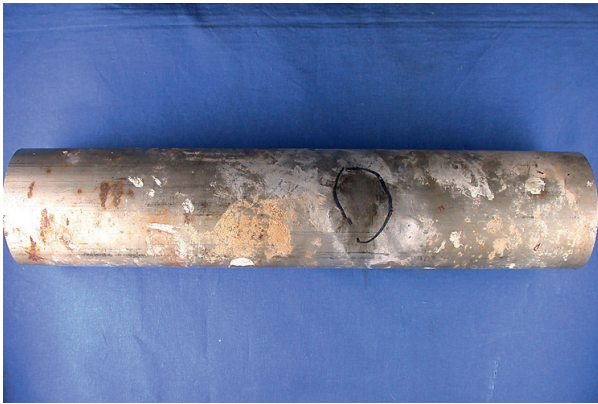
Darüber hinaus sind die meisten erfahrenen Metallographen in der Lage, übergreifende Zusammenhänge im Hinblick auf die Schadensentstehung zu beurteilen und den erforderlichen Prüfumfang festzulegen.

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

## 2. 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. 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. 2:** Detail from image 1: place of damage with crack field  $\approx 3:1$

**Bild 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 Rohrabchnitte angeliefert (Bilder 1-4), bei denen nach dem ersten Augenschein die Risse geöffnet



**Fig. 4:** Detail from image 3: place of damage with crack field  $\approx 3:1$

**Bild 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 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 Emissionsspektalanalyse
- 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.

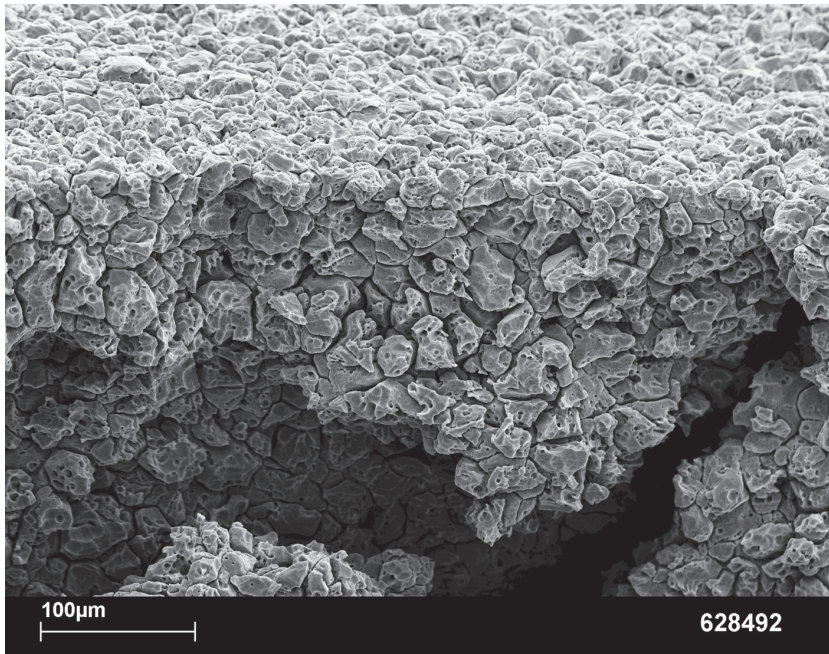
| Element       | C     | Si   | Mn   | P      | S      | Cr          | Ni         | Mo   | Ti    | Cu   |
|---------------|-------|------|------|--------|--------|-------------|------------|------|-------|------|
| Wt.%          | 0,04  | 0,67 | 1,48 | 0,034  | 0,007  | 17,30       | 9,27       | 0,34 | 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).

Es handelt sich dabei um interkristalline Spannungsrissskorrosion, ausgehend von der Rohraußen-seite. 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).

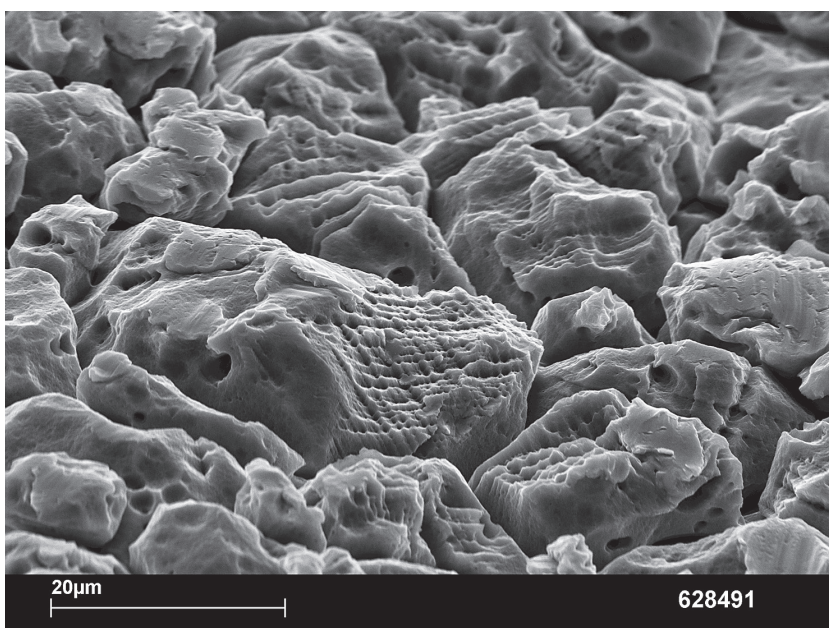
The coatings on the crack area and on the outer surface of the pipe have been examined by electron

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



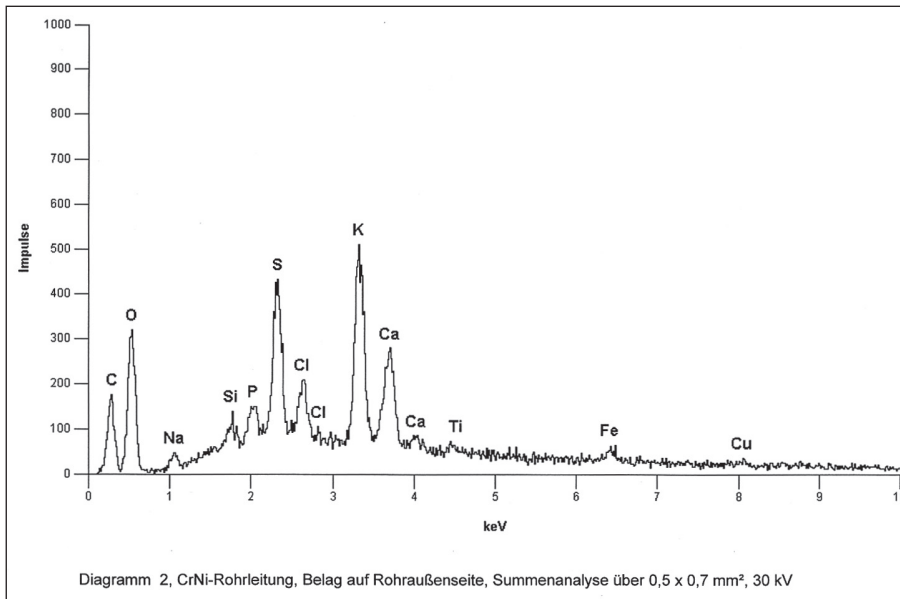
**Fig. 5:** Detail from crack area, surface intergranular pickled image: 250:1

**Bild 5:** Ausschnitt Rissbereich, Oberfläche interkristallin angebeizt Aufn.: 250:1



**Fig. 6:** Intergranular pickled surface with slip lines in the grains image: 2000:1

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



**Fig. 7:** EDX analysis of the coatings on the outer surface of the pipe

**Bild 7:** EDX-Analyse des Belages auf der Rohraußenseite

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).

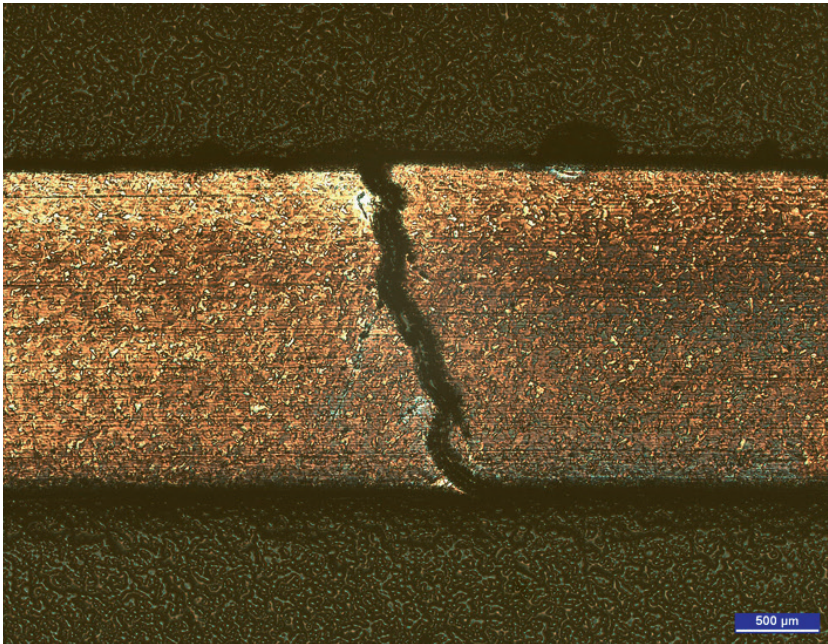
Microsections have been taken of the crack fields from the boundary areas in longitudinal pipe direction for metallographic examination.

The microstructure of the pipe materials consists of austenite with isolated  $\delta$ -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).

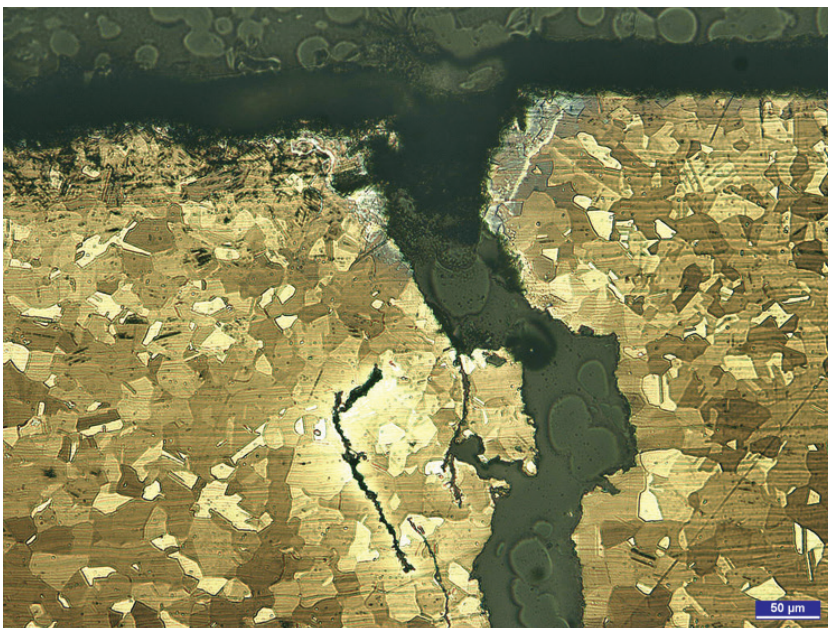
Aus den Endbereichen der Rissfelder wurden Mikroschliffe in Rohrlängsrichtung zur metallographischen Untersuchung entnommen.

Das Gefüge der Rohrwerkstoffe besteht aus Austenit mit vereinzelt  $\delta$ -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).



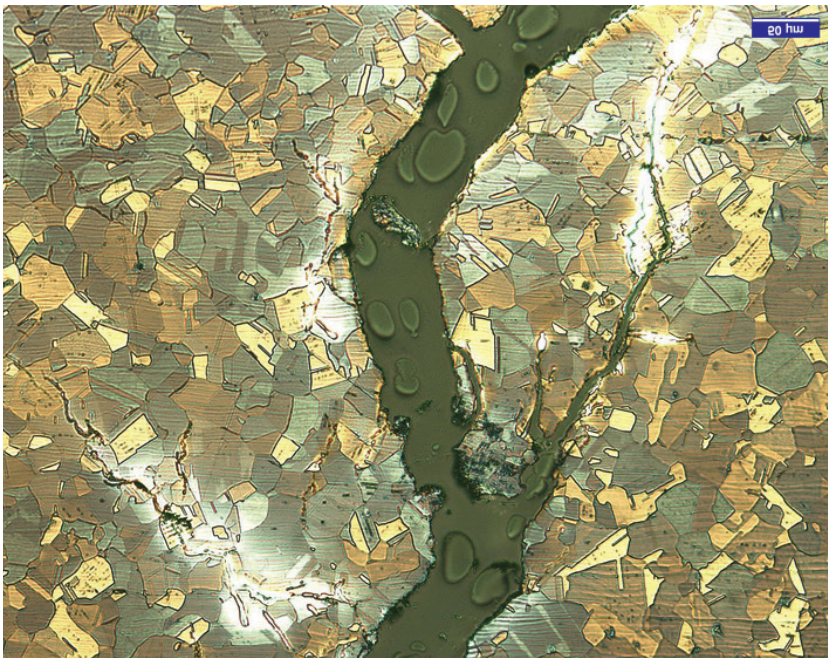
**Fig. 8:** Crack area in longitudinal section, overview, Image 12,5:1, Etchant: Beraha II

**Bild 8:** Rissbereich im Längsschliff, Übersicht, Aufnahme 12,5:1, Ätzmittel: Beraha II



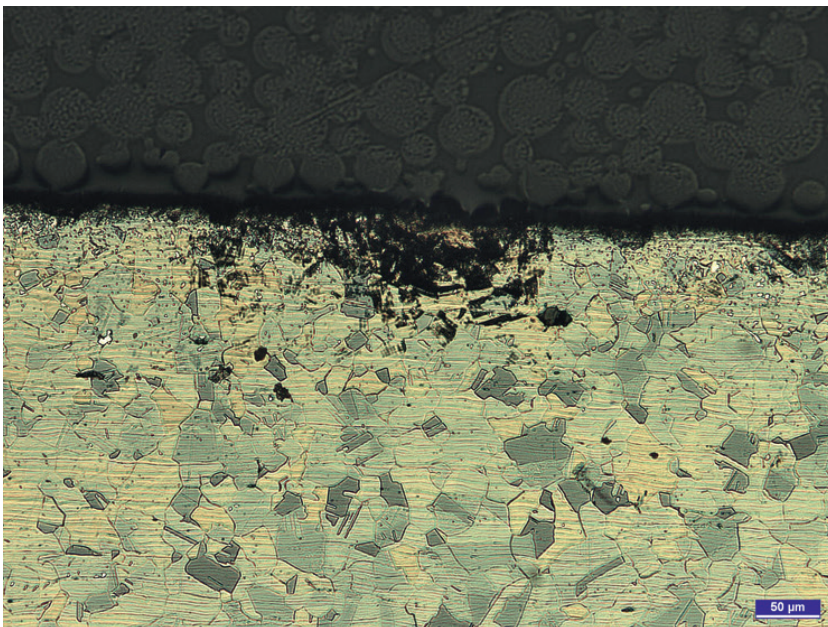
**Fig. 9:** Detail crack area outer surface of the pipe, Image 100:1, Etchant: Beraha II

**Bild 9:** Ausschnitt Rissbereich Rohraußenseite Aufnahme 100:1, Ätzmittel: Beraha II



**Fig. 10:** Additional detail crack area, transgranular and intergranular cracks, Image 100:1, Etchant: Beraha II

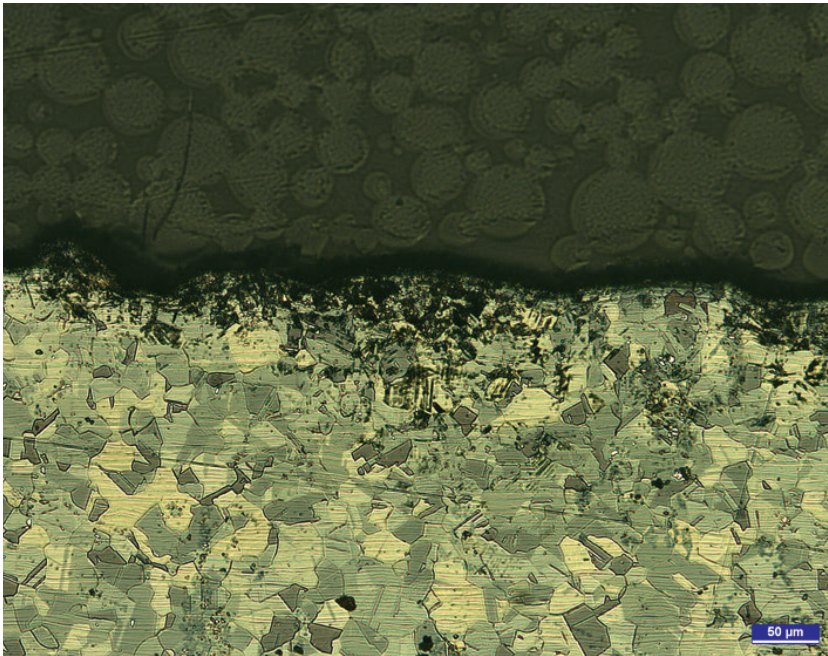
**Bild 10:** Weiterer Ausschnitt Rissbereich, trans- und interkristalline Risse, Aufnahme 100:1, Ätzmittel: Beraha II



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

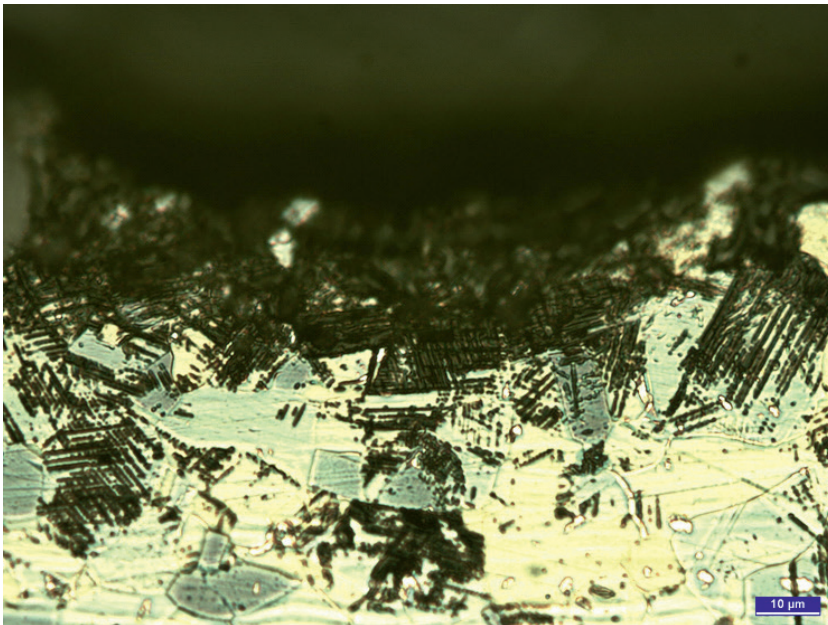
**Bild 11:** Punktförmige Kaltverformung an der Rohroberfläche außen, Aufnahme 100:1, Ätzmittel: Beraha II





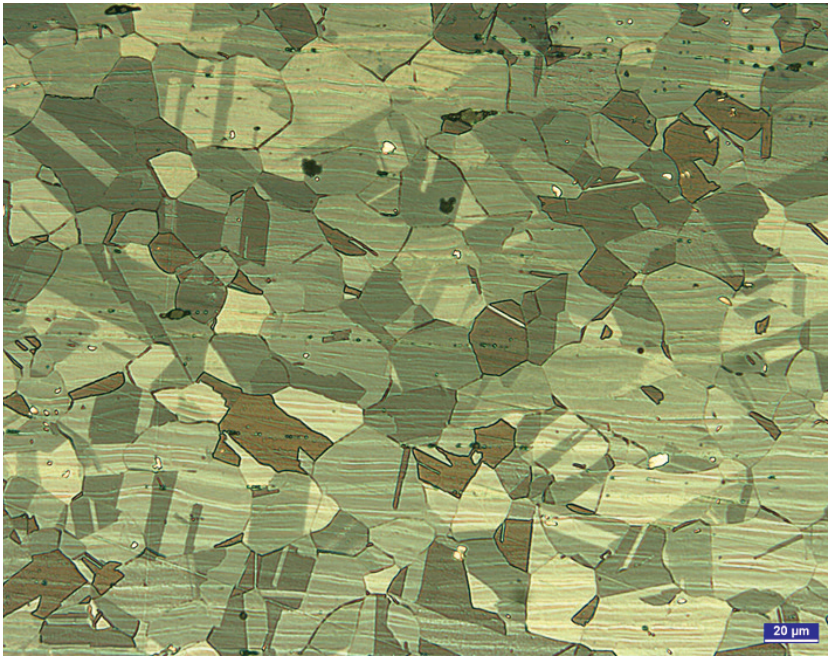
**Fig. 12:** Extensive cold deformation on the outer surface of the pipe, Image 100:1, Etchant: Beraha II

**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  $\delta$ -ferrite content, Image 200:1, Etchant: Beraha II

**Bild 14:** Gefüge Rohrwerkstoff Austenit mit wenig  $\delta$ -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 (X2CrNiMo17-12-2) zu empfehlen.

## 5. Abschließende Bemerkung

Neben den durchaus ingenieurmäßigen 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.

# Index

## Sachregister

### Symbols

1.0503 81  
1.4005 191  
1.4031 392, 396  
1.4122 392, 395  
1.4301 5, 12, 148, 155, 172, 200  
1.4404 13  
1.4539 159, 180  
1.4541 109, 111, 172, 392  
1.4571 13, 40, 76, 204  
1.4923 221, 338, 345  
1.5415 97, 333, 401  
1.6541 35  
1.6582 352  
1.7231 333  
2.4630 263  
2.4632 262  
2.4663 348  
2.4665 316  
2.4668 131, 270  
2.4856 308, 348  
2.4952 88  
3d microscope 364  
3D printing 399  
16Mo3 97, 401  
23MnNiCrMo5-2 35  
34CrNiMo6 352  
316Ti 40, 204

### A

additive manufacturing 307, 398  
ageing 24  
Ageing Tests 281  
agent after Fry 27  
AISI 304 148, 172  
AISI 321 109, 111, 172, 200, 392  
AISI 904L 180  
Alloy 247 LC CC 298  
Alloy 617 281, 348  
Alloy 625 308, 348

### Symbole

1.0503 81  
1.4005 191  
1.4031 392, 396  
1.4122 392, 395  
1.4301 5, 12, 148, 155, 200  
1.4404 13  
1.4539 159, 180  
1.4541 109, 111, 172, 392  
1.4567 172  
1.4571 13, 40, 76, 204  
1.4923 221, 338, 345  
1.5415 97, 333, 401  
1.6541 35  
1.6582 352  
1.7231 333  
2.4630 263  
2.4632 262  
2.4663 348  
2.4665 316  
2.4668 131, 270  
2.4856 308, 348  
2.4952 88  
3D-Druck 399  
3D-Mikroskop 364  
16Mo3 97, 401  
23MnNiCrMo5-2 35  
34CrNiMo6 352  
316Ti 40, 204

### A

Ablagerungen 272  
additive Fertigung 269, 398  
additives Herstellungsverfahren 307  
AISI 304 148  
AISI 304Cu 172  
AISI 321 109, 111, 172, 200, 392  
AISI 904L 180  
Alitierung 101  
Alloy 247 LC CC 298  
Alloy 617 281, 348

Alloy 718 270, 349  
 Alloy 904L 159, 180  
 Alloy X-750 349  
 alternating bending stress 47, 77  
 alternating-stress phenomenon 43  
 aluminizing layer 101  
 AM 307  
 AM-built burner tip 269  
 AM see additive manufacturing  
 angle irons 19  
 as-built condition 277  
 ASTM A 48 Class 30 119  
 austenite 8  
 austenitic steels 293

## B

bainite 34  
 beach marks 43, 84, 214, 222, 365, 391  
 bending strength 70  
 bending stress 73  
 Bolt 169  
 Brackets 255  
 brazing process 313  
 break-ups 57  
 brewery pipe 3f.  
 brittle fracture morphology 33  
 brittle overload failure 182  
 Bulk Analysis 22  
 bulk melting 322  
 Burner Feeder Line 95  
 burnt hole 274  
 burn-through area 273

## C

C45 81  
 case-hardening 69  
 casting defect 127  
 cast iron 119  
 cathodic SCC 197  
 Center Guide Bolt Supporting 219  
 check for surface cracks 209

Alloy 625 308, 348  
 Alloy 718 270, 349  
 Alloy 904L 159, 180  
 Alloy X-750 349  
 Allzweckgreifer 67  
 Alterung 24  
 AM 269  
 AM siehe additive Fertigung  
 Anhebepoller 327  
 Anschmelzung der Außenoberfläche 322  
 As-built-Zustand 277  
 ASTM A 48 Class 30 119  
 Ätzmittel nach Fry 27  
 Aufreißungen 57  
 Aufstickung 167  
 Auslagerungsversuche 281  
 Auslegungsfehler 128  
 Austenit 8  
 austenitische Stähle 293

## B

Bainit 34  
 Befestigungselemente 255  
 Biegefestigkeit 70  
 Biegeschwellbeanspruchung 47, 73  
 Biegeüberbeanspruchung 37  
 Biegewechsel 43  
 Biegewechselbeanspruchung 39, 153  
 Biegewechselbelastung 77  
 Blechwerkstoff 321  
 Brandloch 274  
 Brauereianlage 3f.  
 Brennerkopf 269  
 Brennerzuführung 95  
 Brennkammer 256  
 Bruchbahnen 99  
 Bruchfläche 56  
 Bruchlastspielzahl 155  
 Bruchmerkmale 44, 99  
 Bruchmorphologie 33  
 Bruchoberflächen 364  
 Bruchverhalten 45  
 Bulk-Analyse 22

## C

C45 81  
 Charpy V-notch 282  
 Chromcarbidausscheidungen 281, 288, 319  
 Chromcarbidausscheidung 395  
 Chromverarmung 394  
 Collars 110  
 Computertomographie 375

chromium carbide precipitates 288, 319  
 chromium carbide precipitation 281, 395  
 chromium depletion 394  
 cleaning process 167  
 cleavage fracture 186, 190  
 Coal Gasification Burner 269  
 coarse grain 60  
 coefficient of friction 228  
 coefficient of thermal expansion 401  
 cold deformation 10, 12 f.  
 cold forming 179  
 collars 110  
 combined action of sources 128  
 combustion chamber 256  
 Compressor Disk 245, 403  
 Computed Tomography 375  
 contact corrosion 349, 396, 398  
 contact fatigue 229  
 cooling passages 276  
 cooling system 278  
 cooling water system 269  
 Corrosion Cracking 337  
 corrosion damage 3  
 corrosion failures 157  
 corrosion performance 155  
 corrosion resistance 397  
 corrosive agent 398  
 crack initiation 43, 70  
 crack initiation sites 140  
 crack propagation 127, 229  
 creep damage 261, 265  
 creep strength 400  
 crow feet 357  
 CVN 282  
 CVN impact test 25  
 CVN specimen 89

## D

dampening pins 388  
 DDC 294  
 decarbonization 57  
 decarburization 105  
 defects 133  
 deformation martensite 11, 110  
 deformation of microstructure  
 34  
 $\delta$ -ferrite 8  
 deposits 272  
 design error 73, 397  
 Design Flaw 128  
 DIN 17223 139  
 DIN 17440 191  
 DIN EN 10088 12  
 dry friction 217

CTE siehe Wärmeausdehnungskoeffizient  
 CVN-Probe 89

## D

Dämpfungsbolzen 388  
 Dauerfestigkeit 105  
 DDC 294  
 Dehnungsbehinderung 301  
 Dehnungstoleranz 278  
 Dekohäsion  
 – wasserstoffinduzierte 346  
 $\delta$ -Ferritzeilen 8  
 Designfehler 397  
 Dichtblechnut 211  
 DIN 17223 139  
 DIN 17440 191  
 DIN EN 10088 12  
 Drahtseile 143  
 Drehvorrichtung 119  
 Druckpulsationsdämpfer 51

ductility 24  
Ductility Dip Cracking 294

## E

EBSD 115  
EDS chromium map 292  
EDS molybdenum map 293  
EDS spectrum 135, 178, 344  
EDX analysis 3, 8  
EDX spot analysis 36  
electric mobility 143  
Electron Backscatter Diffraction 115  
electron microscope 6  
embrittlement 335  
- by age hardening 29  
embrittling mechanism 287  
emission spectral analysis 6  
EN 10088-3 191  
EN 10293 333  
EN 25817-B 41  
Engineering Model 272  
EN-GJS-400 128  
Erosion Damage 237  
excessive dynamic service loading 104  
Exhaust Casing 107  
experimental part 297

## F

FAI 110  
failure mechanism 227, 230, 264, 293  
failures due to Thermal Overload 253  
failures due to Tribological Loading 207  
Fastener 351  
fatigue 106  
fatigue crack 51  
fatigue cracking 119  
fatigue failure 391  
fatigue fracture 45, 73, 364  
- low cycle 137  
fatigue fracture surface 213  
fatigue strength 105  
fatigue striations 45, 100, 365, 368  
field emission guns 370  
field emission SEM 44  
Fillet Pieces 107

Ductility dip cracking 294  
Duktilität 24  
Durchbrandbereich 273

## E

EBSD 115  
EDX-Analyse 3, 8  
EDX-Elementverteilungsbild 292  
EDX-Punktanalyse 36  
EDX-Spektrum 135, 178, 344  
EDX-Stickstoff-Mapping 165  
Eigenspannungen 294, 313, 325, 400, 402  
Eindringprüfung 53  
Einsatzhärtung 69  
Elektromobilität 143  
Elektronenrückstreubeugung 115  
Elektronenstrahlmikroanalyse 6  
Emissionsspektralanalyse 6  
EN 10088-3 191  
EN 10293 333  
EN 25817-B 41  
EN-GJS-400 128  
Entkohlung 57, 105  
Entlüftungsstutzen 51  
Erdgasverdichter 51, 73  
Ermüdung 39, 44, 125  
- thermomechanische 264  
Ermüdungsbruch 45, 391  
Ermüdungsrissbildung 119  
Erosionsschaden 237  
Erstarrungsrissbildung 312  
Erstarrungsrisse 62, 307, 372  
Erstmusterprüfung 110

## F

Farbeindringprüfung 41, 202  
Fehldeutung 131  
Fehlmaterial 246  
Fehlstellen 133  
Feldemissionsquellen 370  
Feldemissions-REM 44  
Fixiernut 211  
Flankenbindefehler 62  
Fluchtungsfehler 142  
Flüssigmetallversprödung 313  
Flyerkette 67  
FOD 384  
Fraktographie 363  
Fremdkörperbeschädigung 384  
Führungsbolzen 219

fillet radii 108  
 fillet radius 126, 129  
 first article inspection 110  
 First Stage Vane 297  
 fixing groove 211  
 flawed material 246  
 FOD 384  
 forced final rupture 391  
 Foreign Object Damage 384  
 fractography 363  
 fracture behavior 45  
 fracture features 44, 99  
 fracture surface 56, 364  
 fretting damage 228  
 Fretting Fatigue Cracking 209, 219  
 fretting zone 211, 223  
 fusion line 41

## G

G16Mo3 333  
 G42CrMo4 333  
 GB shrinkage pores 322  
 GG20 119  
 Gland Seal 181  
 grain boundary liquation 323  
 grain growth 102, 105

## H

hammering patterns 217  
 hardness gradient 25  
 hardness test 4  
 HASCC 191  
 Hastelloy Alloy X 316  
 Hastelloy X 348  
 HCF 219  
 HCF cracking 47  
 HCF failure 44, 100  
 heat shields 255  
 heat treatment 89, 395  
 heat treatment operations 315  
 heat treatments 118  
 heavy-duty Gas Turbine Engine 95  
 HEDE 346  
 Helical Tension Spring 137  
 HELP 346  
 hematite 276  
 high cycle fatigue 76

## G

G42CrMo4 333  
 Gefügeverformung 34  
 Gehäuseauskleidung 107  
 Gewaltbruch 182  
 Gewaltbrüche 364  
 Gewindebolzen 79  
 GG20 119  
 Gleitbänder 113  
 Glimmentladungsspektroskopie 35  
 Grobkorn 60  
 Großgasturbine 39  
 Gusseisen 119  
 Gussfehler 127

## H

Härteprüfung 4  
 Haftvermittlerschicht 302  
 Haltering 392  
 Hämatit 276  
 Härteverlauf 25  
 Hartlötverbindungen 307  
 Hartlötverfahren 313  
 Hartmetall-Wendeschneidplatte 135  
 HASCC 191  
 Hastelloy Alloy X 316  
 Hastelloy X 348  
 HCF 219  
 HEDE-Mechanismus 346  
 Heißbriss 62  
 Heizölvormischbrennerdüsen 337  
 HELP 346  
 HISCC 345  
 Hitzeschild 255  
 Hochtemperaturkorrosion 257



high cycle fatigue cracking  
39  
high temperature alloys 262  
HISCC 345  
hoop stress 401  
hot corrosion 257  
hot crack 62  
hot cracking mechanism 331  
hydrogen embrittlement 188, 191  
Hydrogen Enhanced Decohesion 346  
Hydrogen Enhanced Local Plasticity 346  
hydrogen miscellaneous 361

Impeller 237  
Impingement Cooling Plates 315  
incubation period 231  
indexable carbide insert 135  
industrial steam turbine engine 88  
In situ Engine Diagnostics 367  
inter-crystalline network of cracks 161  
Intergranular Attack 190  
intergranular corrosion 159, 393  
intergranular stress corrosion 7  
ISO 3677 308

Hochtemperaturlegierungen 263  
hochzyklische dynamische Beanspruchung 76  
hochzyklisches Ermüdungsversagen 100

Industriedampfturbine 88  
Industriegasturbine 95  
Inkubationszeit 231  
In-situ Messtechnik 367  
interkristalline Korrosion 393  
interkristalline Spannungsrisskorrosion 7  
Interkristallines Rissnetzwerk 161  
ISO 3677 308

## K

Kaltumformung 179  
Kaltverformung 10, 12 f.  
Kerbeffekt 401  
Kerbschlagbiegeversuch 25  
Kerbwirkung 47, 57  
Kohlevergasungsbrenner 269  
Kompressorscheibe 403  
Konstruktionsfehler 73  
Kontaktermüdung 229  
Kontaktkorrosion 349, 396, 398  
Korngrenzenoxidation  
- spannungsunterstützte 259  
Kornrenzfilme 323  
Kornwachstum 102, 105  
Kornzerfall 159, 190  
Korrosionsbeständigkeit 397  
Korrosionsschaden 3  
Korrosionsschaden an Rohrleitung 4  
Korrosionsverhalten 155  
korrosiver Wirkstoff 398  
Krähenfüße 357  
Kriechfestigkeit 400  
Kriechporen 261  
Kriechschäden 265  
Kühlkanäle 276

**L**

Laboratory Fractures 189  
 lack of side fusion 62  
 lamellar tearing 182, 187  
 lashing-load ring of a heavy-duty gas turbine 31  
 LCF 122, 139, 143, 146  
 LCF fracture 83  
 Lifting Lugs 327  
 liquation crack 321, 371  
 liquid metal embrittlement 313  
 LOM 112  
 longitudinal tests 23  
 low-cycle fracture 83  
 Lubrication 154

**M**

Macrofractography 55  
 magnetic particle surface crack inspection 328  
 material damage 161  
 material embrittlement 294  
 material fatigue 82  
 material mix-up 396  
 material selection 127, 397  
 material separation 209  
 material testing 4  
 mechanical failures 15  
 metallic bond coating 302  
 metallographer 3  
 microcavities 261  
 microductility 356  
 microfractography 44, 57  
 Microhardness Testing 113  
 micro shrinkage 329  
 misalignment 142  
 misinterpretation 131  
 mixed grain size 91  
 mixed microstructures 93  
 mix-up of material 257  
 MnS stringers 186  
 Mock-up 272  
 MT 328  
 MT testing 209

Kühlsystem 278  
 Kühlwassersystem 270

**L**

Laborbrüche 189  
 Längserprobung 23  
 LCF 139, 143, 146  
 LCF-Bruch 83  
 LCF siehe low-cycle fracture  
 Lebensdauererweiterung 245  
 Lochkorrosion 174, 204  
 LOM 112, 365  
 Low Cycle Fatigue 122  
 Lüfterrad 237

**M**

Makrofraktographie 55  
 Materialauswahl 397  
 Materialermüdung 82, 106  
 Metallographen 3  
 Mikroduktilität 356  
 Mikrofraktographie 44, 57  
 Mikrohärteprüfung 113  
 Mikroschrumpfungen 329  
 Mischgefüge 93  
 Mischkornausbildung 91  
 MnS-Zeilen 186  
 Mock-up-Modell 272  
 MT-Prüfung 209  
 Mutter 88

**N**

natural gas compressor 51, 73  
 NDT 132  
 nickel base superalloys 293, 298, 348  
 NiCr19NbMo 131  
 NiCr20Co18Ti 262  
 NiCr20Ti 263  
 NiCr20TiAl 88  
 NiCr22Fe18Mo 316  
 Nimonic alloy 90 255  
 nital etching 25  
 Nitride Segregations 26  
 nitriding 167  
 non-destructive 4  
 non-destructive testing 132  
 notch effect 47, 57, 401  
 nut 88

**O**

optical emission spectrometer 35  
 optical emission spectrometry 22  
 overload failure 125  
 overload fractures 364  
 over-torqueing 178  
 oxide scaling 302

**P**

P235 52  
 P265 52  
 pantograph 144  
 parallel cracks 57  
 penetrant testing 41, 53, 202  
 pipe connector 73  
 Pipes  
 - austenitic 159  
 Piping System 199  
 pitting corrosion 174  
 pitting resistance 204  
 Pitting Resistance Equivalent Number 165  
 plate material 321  
 post-SLM 402  
 power towers 19  
 PPQ 110  
 Premix Burner Nozzles 337  
 PREN 165  
 Pressure Pulsation Dampener 51  
 primary carbide precipitates 287  
 primary microstructure 248  
 Product and Process Qualification 110

**N**

Nassreinigung 396  
 Nickelbasis-Knetlegierungen 281, 293  
 Nickelbasis-Superlegierung 298, 348  
 Nickel-Chrom-Kobalt-Knetlegierung 262  
 NiCr19NbMo 131  
 NiCr20Co18Ti 262  
 NiCr20Ti 263  
 NiCr20TiAl 88  
 NiCr22Fe18Mo 316  
 niederzyklischer Schwingbruch 83  
 Nimonic 75 263  
 Nimonic 90 255  
 Nitalätzung 25  
 Nitridausscheidungen 26

**O**

Oberflächenfehler 59  
 Oberflächenrauigkeit 392  
 Oberflächenreinigung 305  
 Oberflächenrissprüfung 209, 328  
 Oberflächenschaden 152  
 Ölverteiler 39  
 optische Emissionsspektrometrie 22  
 Oxidzunder 302

**P**

P235 52  
 P265 52  
 Pantograph 144  
 Parallelriss 57  
 PPQ 110  
 Prallkühlbleche 315  
 Primärcarbidausscheidungen 287  
 Primärgefüge 248  
 Produkt- und Prozessqualifikation 110  
 Punktanalyse 135, 259, 393

**Q**

quality management processes 129

**R**

Ratchet marks 99  
 RC 293  
 recrystallisation 93  
 reference laboratory fractures 192  
 Reheat Cracking 293  
 relaxation cracking 281  
 repair process 315  
 replica technique 328  
 residual forced fracture 83  
 - artificial 212  
 residual stresses 294, 313, 325, 400, 402  
 restraint 301  
 retaining rings 392  
 reversed bending 39, 43  
 Reversed Transferred Arc 305  
 RHC 293  
 ridge lines 75  
 Room Temperature Charpy V-notch Impact Test 291  
 Room Temperature Tensile Test 291  
 RTA 305  
 rusty residues 272

**S**

S 235 22  
 S31635 40  
 SAGBO 259, 265  
 sausage grain 92  
 scale residues 57  
 scanning electron microscope 3  
 SCC 174, 191, 199, 346  
 sealing plate 211  
 secondary carbide precipitates 295  
 selective laser melted 307

**Q**

Qualitätsmanagement 129

**R**

Rasterelektronenmikroskop 3  
 Rastlinien 43, 75, 84, 214, 222, 365, 391  
 Raumdrehprinzip 256  
 Raumtemperatur-Kerbschlagbiegeversuch 291  
 Raumtemperatur-Zugversuch 291  
 Reckalterung 19  
 Referenzlaborbrüche 192  
 Reiboxidation 209, 219, 228  
 Reiboxidationszone 211, 223  
 Reibungskoeffizient 228  
 Reinigungsprozesse 167  
 Rekristallisation 93  
 Relaxationsrisse 281, 293  
 REM 365  
 Reparaturprozess 315  
 Replika-Technik 328  
 Restgewaltbruch 83, 391  
 - künstlicher 212  
 Rissausbreitung 127, 229  
 Rissausgangsort 43  
 Risseinleitung 70  
 Risseinleitungsstellen 140  
 Rissverlauf  
 - interdentritischer 311  
 Rohre  
 - austenitische 159  
 Rohrleitungssystem 199  
 Rohrverschraubung 73  
 Röntgen-Computertomographie 375  
 Röntgenfluoreszenzanalyse 40  
 Röntgenspektroskopie 35, 393  
 Rostrückstände 272  
 RTA 305  
 Rundungsradien 108

**S**

S 235 22  
 S31635 40  
 SAGBO 259, 265  
 SCC 191  
 Schäden durch Korrosion in Elektrolyten 157  
 Schäden durch mechanische Beanspruchungen 15  
 Schäden durch thermische Beanspruchung 253  
 Schäden durch tribologische Beanspruchung 207  
 Schadensmechanismus 293  
 Scherlippen 104

selective laser melting 269, 398  
SEM 365, 367  
Service Embrittlement 281  
service life extension 245  
shear lips 104  
Siemens-Martin steel 28  
slip bands 113  
SLM 269, 307  
solidification crack 62  
solidification cracking 307, 311, 312  
solidification cracks 372  
Space Shuttle Principle 256  
spot analysis 135, 259, 393  
SS321 200  
St 37 22  
stacking faults 116  
strain ageing 19  
Strain-Assisted Grain Boundary Oxidation 259  
strain tolerance 278  
Stranded Ropes 143  
stress corrosion 8  
stress corrosion cracking 176, 199  
stress relief cracks 293  
Striations 76  
sulfuric acid 345  
superalloys 262  
surface cleaning 305  
surface damage 152  
surface defects 59  
surface roughness 392  
swirlers 308  
Swivel Arm 119

## T

tensile/bending overload 37  
tensile specimen 35  
tensile test 24  
thermal-mechanical fatigue 264, 402  
thermal-mechanical fatigue cracking 398  
Thomas process 20  
Threaded Bolt 79  
TIG-Brazed T/C Installations 307  
TMF 264  
TMF cracking 269  
TMF cracks 273  
TMF Failure 398  
tool breakage 135  
toughness 24  
trans-granular SCC 177

Schmierung 154  
Schrauben 169, 351  
Schwankungen in Herstellprozessen 129  
Schwefelsäure 345  
Schweißnaht 41, 52  
Schweißnahtfehler 61  
Schweißrauchabsaugung 239  
Schweißverfahrensprüfung 160  
Schwenkarm 119  
Schwindungslunker 322  
Schwingbruch 47, 73, 219, 364  
– niederzyklische 137  
Schwingbruchfläche 213  
Schwingriss 51  
Schwingstreifen 44, 76, 100, 365, 368  
Sekundärcarbidausscheidungen 295  
Selective Laser Melting 269  
selektive Laserschmelze 307, 398  
SEM 367  
Siemens-Martin-Stahl 28  
SLM 269  
Spaltbruch 186, 190  
Spannungsarmglühen 277  
Spannungsrisskorrosion 8, 176, 199, 337  
Spiralzugfeder 137  
SpRK 175, 197, 199, 346  
SRC 293  
SS321 200  
St 37 22  
Stahlgittermast 19  
Stapelfehler 116  
Stereomikroskop 42  
Stopfbuchse 181  
Stoßbelastungen 325  
Stress Corrosion Cracking 191  
Superlegierungen 262  
Swirler 308

## T

Terrassenbruch 187  
Terrassenbruchbildung 182  
Thermal-Mechanical Fatigue 399  
thermisch-mechanische Ermüdung 402  
Thermoelementbefestigungen 307  
Thermo-Mechanical Fatigue 269  
Thomasverfahren 20  
TMF 269  
TMF-Risse 273  
TMF-Schaden 398  
TMF siehe thermal-mechanical fatigue  
Transkristalline SpRK 177  
tribologisches System 154  
Trockenreibung 217

tribological system 154  
tungsten hairpin cathode 367  
turbine engine 31  
turbine wheel disk 209  
Turning Gear Assembly 119

## U

ultimate tensile strength 282  
ultrasonic testing 328  
UNS32100 200  
UNS N06002 316  
UNS N06075 263  
UNS N06625 308  
UNS N07090 262  
UNS N07718 131, 270  
UNS N08904 180  
UNS S30400 148  
UNS S32100 111, 172  
UTS 282

## V

VDI guideline 3822 245, 387  
Vent Nozzle 51  
vibration 52, 228

## W

wall thickness 129, 305  
wear 242  
wear-resistance 69  
weld defect 61  
welding fume extraction system 239  
weld procedure testing 160  
wet cleaning 396  
white etching layers 230

Turbinenleitschaufel 297  
Turbinenradscheibe 209

## U

Überdrehmoment 178  
Übergangsformstücke 107  
Übergangsradius 126, 129  
Überlast 125  
- dynamische 104  
Ultraschallprüfung 328  
Umfangspannung 401  
UNS32100 200  
UNS N06002 316  
UNS N06075 263  
UNS N06625 308  
UNS N07090 262  
UNS N07718 131, 270  
UNS S30400 148  
UNS S30430 172  
UNS S32100 109, 111, 172  
UT 328  
UTS 282

## V

VDI-Richtlinie 3822 245, 387  
Verbindungselemente 351  
Verdichterradscheibe 245  
Verformungsmartensit 11, 110  
Verhämmerung 217  
Versagensmechanismus 227, 230, 264  
Verschleiß 242  
Verschleißbeständigkeit 69  
Versprödung 281  
- durch age hardening 29  
Versprödungsmechanismus 287  
Versuchsbauteil 297  
Vibrationen 52, 228

## W

Wandstärke 129, 305  
Wärmeausdehnungskoeffizient 401  
Wärmebehandlung 89, 118, 395  
Wärmebehandlungsvorgänge 315  
Warmrisse 331  
Wasserstoffversprödung 188, 191, 335  
Wechselbelastung 43  
Wendeschneidplattenbruch 131

**X**

X1NiCrMoCu25-20-5 159, 180  
 X2CrNiMo17-12-2 13  
 X5CrNi18-10 5, 12, 172  
 X5CrNiMoTi17-12-2 40  
 X5CrNiMoTi17-12-2 AISI 316Ti 76  
 X6CrNiMoTi17-12-2 13  
 X6CrNiMoTi17-12-2 204  
 X6CrNiTi18-10 109, 111, 172, 392  
 X6CrNiTi18-10 200  
 X12CrS13 191  
 X22CrMoV12-1 221  
 X22CrMoV12-1 338, 345  
 X39Cr13 392, 396  
 X39CrMo17-1 392  
 X39CrMo17-1 395  
 XCT 375  
 X-ray computed tomography 375  
 X-ray fluorescence analysis 40  
 X-ray spectroscopy 35, 393

**Y**

yield strength 282  
 YS 282  
 Y-shaped Pipe 398

Werkstoffauswahl 127  
 Werkstoffprüfung 4  
 Werkstoffschädigung 161  
 Werkstofftrennung 209  
 Werkstoffversprödung 281, 294  
 Werkstoffverwechslung 257, 396  
 Werkzeugbruch 135  
 white etching layers 230  
 Wiederaufschmelzungsriss 321, 371  
 Wirksumme 165  
 Wolfram-Haarnadelkathode 367  
 Wurstkorn 92

**X**

X1NiCrMoCu25-20-5 159, 180  
 X2CrNi Mo17-12-2 13  
 X3CrNiCu18-9-4 172  
 X5CrNi18-10 5, 12, 148  
 X5CrNiMoTi17-12-2 40  
 X5CrNiMoTi17-12-2 AISI 316Ti 76  
 X6CrNiMoTi17-12-2 13  
 X6CrNiMoTi17-12-2 204  
 X6CrNiTi18-10 109, 111, 172, 392  
 X6CrNiTi18-10 200  
 X12CrS13 191  
 X22CrMoV12-1 221  
 X22CrMoV12-1 338, 345  
 X39Cr13 392, 396  
 X39CrMo17-1 392  
 X39CrMo17-1 395  
 XCT 375

**Y**

Y-förmiges Gaszufuhrrohr 398  
 YS 282

**Z**

- Zähigkeit 24
- Zeitstandschäden 261
- zerstörungsfreie Prüfungen 4, 132
- ZfP 132
- Zugbänder 19
- Zugfestigkeit 282
- Zugöse einer Großgasturbine 31
- Zugprobe 35
- Zugüberbeanspruchung 37
- Zugversuch 24
- Zuleitungsrohrbruch 98
- Zunder 36
- Zunderreste 57
- Zusammenwirken von Fehlerquellen 128