

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Schadensanalyse
Flüssigmetallinduzierte Rissbildung
Failure analysis
Liquid-metal-induced crack formation

VDI 3822
Blatt 1.6 / Part 1.6
Ausg. deutsch/englisch
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Inhalt	Seite
Vorbemerkung.....	2
Einleitung.....	2
1 Anwendungsbereich.....	6
2 Normative Verweise.....	6
3 Mechanismus der flüssigmetallinduzierten Rissbildung.....	6
3.1 Systeme mit Mischungslücke.....	9
3.2 Eutektische Systeme.....	10
3.3 Auswirkungen der Mehrstoffsysteme.....	12
4 Verfahrenstechnische Einflussgrößen.....	12
4.1 Einflussbereich Werkstoff.....	12
4.2 Einflussbereich Konstruktion/Fertigung.....	13
4.3 Einflussbereich Verzinkerei.....	13
4.4 Einfluss der Zinkbadtemperatur.....	14
5 Schadensbild der flüssigmetallinduzierten Rissbildung.....	14
5.1 Schadensbild bei aggressiver Schmelze.....	18
5.2 Schadensbild bei sehr hohen Bauteileigenstressen.....	20
5.3 Schadensbild bei Kerbwirkung.....	22
5.4 Schadensbild bei langen Tauchzeiten.....	24
5.5 Folgeschaden durch feine Anrisse aus dem Verzinkungsprozess.....	26
5.6 Folgeschaden durch feine Anrisse aus dem Lötprozess.....	28
5.7 Folgeschaden durch Anriss beim Lötprozess.....	30
5.8 Folgeschaden aus Reibprozess.....	32
5.9 Schaden aus Turbine.....	34
5.10 Anrisse beim Schweißprozess.....	36
5.11 Anrisse beim Vergütungsprozess.....	38
5.12 Verzinkungsschaden an Haltestange.....	40
5.13 Verzinkung von Blankstahl.....	42
5.14 Verzinkungsschaden an groß dimensionierten Schrauben.....	44
5.15 Verzinkungsschaden nach dem Kaltbiegen.....	46
5.16 Verzinkungsschaden durch dickere Dimensionierung und höherfesten Werkstoff.....	48
Schrifttum.....	50

Contents	Page
Preliminary note.....	2
Introduction.....	2
1 Scope.....	6
2 Normative references.....	6
3 Liquid-metal-induced cracking mechanism.....	6
3.1 Systems with a miscibility gap.....	9
3.2 Eutectic systems.....	10
3.3 Effects of multi-element systems.....	12
4 Process-related factors.....	12
4.1 Materials involved as a factor.....	12
4.2 Design/manufacturing as factors.....	13
4.3 Hot-dip galvanising plant as a factor.....	13
4.4 Effect of the zinc bath temperature.....	14
5 Failure pattern of liquid-metal-induced cracking.....	14
5.1 Failure pattern due to aggressive melt.....	19
5.2 Damage characteristics with very high residual stress in component.....	21
5.3 Damage characteristics with notch effect.....	23
5.4 Damage characteristics after long immersion times.....	25
5.5 Subsequent damage due to nascent cracks resulting from the galvanisation process.....	27
5.6 Subsequent damage due to fine nascent cracks resulting from the brazing process.....	29
5.7 Subsequent damage due to nascent crack development during the brazing process.....	31
5.8 Subsequent damage due to reaming.....	33
5.9 Damaged turbine parts.....	35
5.10 Nascent crack development during welding process.....	37
5.11 Nascent crack development during quenching and tempering.....	39
5.12 Hot-dip galvanisation damage to handrail.....	41
5.13 Hot-dip galvanising of bright steel.....	43
5.14 Galvanisation damage to large bolts.....	45
5.15 Galvanisation damage after cold bending.....	47
5.16 Galvanisation damage due to larger dimensions and higher-strength materials.....	49
Bibliography.....	50

VDI-Gesellschaft Materials Engineering (GME)
Fachbereich Werkstofftechnik

VDI-Handbuch Werkstofftechnik
VDI-Handbuch Fabrikplanung und -betrieb, Band 1: Betriebsüberwachung/Instandhaltung
VDI-Handbuch Produktentwicklung und Konstruktion
VDI-Handbuch Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Band 3: Verfügbarkeit/Schadensanalyse

Frühere Ausgaben: 11/10; 08/17 Entwurf, deutsch
Former editions: 11/10; 08/17 Draft, in German only

Zu beziehen durch / Available at Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin – Alle Rechte vorbehalten / All rights reserved (a) © Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2019

Vervielfältigung – auch für innerbetriebliche Zwecke – nicht gestattet / Reproduction – even for internal use – not permitted

Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen (www.vdi.de/richtlinien), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Einleitung

Produkte werden unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten für einen funktionssicheren und gefahrlosen Einsatz während der vorgesehenen Betriebsdauer hergestellt. Trotz sorgfältiger Konstruktion und Fertigung sowie eingehender Erprobung gelingt es auch bei Einhalten der vorgesehenen Betriebsweise nicht immer, Fehler und Schäden an derartigen Erzeugnissen zu vermeiden. Schadensfälle verursachen im Allgemeinen wirtschaftliche Verluste durch Produktionsausfall, Folgeschäden sowie notwendige Reparaturmaßnahmen und können darüber hinaus Menschen gefährden.

Gezielte Maßnahmen zur Schadensabhilfe und -verhütung können nur dann eingeleitet werden, wenn die Schadensursachen und Fehlereinflüsse durch systematische Untersuchungen aufgeklärt werden. Schadensanalysen können zu Verbesserungen bei der Werkstoffentwicklung, der Werkstoffauswahl, der Konstruktion, der Fertigung und der Betriebsweise führen. Darüber hinaus können die gewonnenen Erkenntnisse sofort in die Qualitätssicherung eingehen, der Schadensprävention dienen und Entwicklungen einleiten, beispielsweise bei der Werkstoffproduktion und -entwicklung, Ver- und Bearbeitung, Prüfung und Anwendung von Werkstoffen. Schadensanalysen dienen dazu, für ein technisches Erzeugnis ein Optimum aus Werkstoff-, Konstruktions-, Fertigungs- und Bauteileigenschaften unter Kostengesichtspunkten zu finden.

Der Erfolg einer Schadensanalyse hängt weitgehend von der Sorgfalt ihrer Planung, von der Art und dem Umfang der einzelnen Untersuchungsschritte sowie der Qualität ihrer Durchführung ab. Um Erfahrungen aus Schadensanalysen systematisch auswerten und zugänglich machen zu können, sind Vereinheitlichungen erforderlich. Demnach ist Zweck der Richtlinie,

Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions (www.vdi.de/richtlinien) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

Introduction

Products are manufactured with the intention of ensuring functionally reliable and safe utilisation throughout their intended service life, taking economic considerations into account. However, despite diligent design and manufacturing, followed by extensive trials, it is not always possible to avoid faults and damage, even when the products are used and operated as intended. Generally speaking, damage leads to economic losses due to production down-times, consequential loss and damages and required repair measures, and also endangers life and limb.

It is only possible to introduce targeted measures to prevent damage and to remedy faults if the causes of the damage and the effects of the faults are determined through systematic investigations. Damage analysis can lead to improvements in material developments and material selection, as well as in the design, production and mode of operation of the products. Furthermore, the findings made and conclusions drawn can be included in quality assurance measures, can serve to prevent further damage and can promote further developments, e.g. in material production, research, processing, testing and utilisation. Damage analysis is used to determine the ideal combination of material, design, production and component characteristics from a financial point of view.

The success of a damage analysis procedure largely depends on how carefully this is planned, on the type and extent of individual investigation steps and on how well the procedure is conducted. Standardisation and conventions are needed in order to systematically evaluate and disseminate the findings of damage analysis. In view of this, the purposes of this standard are to

- Begriffe zu definieren,
- Schadensarten einheitlich zu benennen und zu beschreiben,
- zur systematischen Vorgehensweise bei der Schadensanalyse anleiten,
- die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Untersuchungsstellen zu gewährleisten und
- Voraussetzungen zur nachvollziehbaren Dokumentation zu schaffen.

Dem Benutzer der Richtlinie werden kennzeichnende Schadensbilder, Schadensbeschreibungen und Schadensmechanismen zum Vergleich mit dem zu untersuchenden Schadensfall zur Verfügung gestellt. Die Blätter folgen in ihrer Gliederung der Situation bei der Schadensanalyse: Ausgehend von einem Schadensbild unterstützen sie bei der Findung potenzieller Schadenshypothesen und -mechanismen, um anschließend Hinweise zur Feststellung der Schadensursachen zu geben. Dabei berücksichtigt die Richtlinie nicht nur individuelle Schadensfälle (das heißt singuläre Schäden an einzelnen Produkten), sondern auch Serienschäden (das heißt Schäden, die in gleicher Art an vielen Produkten aufgetreten sind).

Bei der Berührung von Metallschmelzen mit einem festen Metall, wie es beispielsweise beim Löten oder Schweißen sowie beim Verzinken von Stahlkonstruktionen stattfindet, besteht die Gefahr der Rissbildung durch interkristallines Eindringen des flüssigen Metalls. Der Mechanismus kann bei verschiedensten Werkstoffkombinationen auftreten. Am häufigsten betroffen von Schädigungen durch flüssigmetallinduzierte Rissbildung sind jedoch Stähle. Für den Stahlbau gibt deswegen die Richtlinie DAST 022 Hinweise zur sicheren Fertigung bei der Herstellung feuerverzinkter Bauteile. Bei den Schäden beim Stückverzinken handelt es sich teilweise um offensichtliche Schäden, wie beispielsweise das Aufreißen von Rohren oder Trägern. Diese Fälle sind noch verhältnismäßig harmlos, da solche Teile aufgrund der sichtbaren Risse kaum zum Einsatz kommen. Wenn feine Anrisse, z.B. verursacht bei Hartlötprozessen oder Schweißverbindungen, jedoch unerkant bleiben, ergibt sich eine potenzielle Gefahr. Sie können Startstellen für Schwingungsrisse bilden. Oder es kommt unter Lasteinwirkung plötzlich zum Bauteilversagen.

Die Schädigung findet sich in der Literatur unter verschiedenen Bezeichnungen:

- flüssigmetallinduzierte Rissbildung oder flüssigmetallinduzierte Spannungsrisskorrosion
- Lotbruch oder Lötbruch (Lötrissigkeit)

- define associated terms,
- use uniform designations and descriptions for the various types of damage,
- provide instructions for a systematic damage analysis procedure,
- ensure comparability of the results obtained by different investigative bodies, and
- create conditions which enable traceable documentation.

This standard provides its users with exemplary illustrations, descriptions and mechanisms of damage to enable comparison with the damage case under investigation. The structure of its individual parts corresponds to the respective damage analysis situations: Based on the particular type of damage, they provide assistance in formulating potential hypotheses and mechanism descriptions in order to provide subsequent indications on the causes of the damage. The standard, in this context, does not simply discuss individual damage cases (i.e. singular damage to individual products) but also deals with serial damage (i.e. damage which has affected many products in a similar manner).

When molten metal comes into contact with a solid metal surface, for instance during soldering or brazing or when welding and hot-galvanizing steel assemblies, there is a risk that cracks will develop due to intergranular penetration by the molten metal. This mechanism can occur in a wide variety of material combinations. Steel, however, is the material which is most frequently affected by liquid-metal-induced cracking. For this reason, guideline DAST 022 contains notes on the safe manufacturing of hot-dip zinc-coated prefabricated steel components. Some of the damage occurring during hot-dip zinc coating is obvious, e.g. the rupturing of pipes and girders. Such cases are relatively harmless since the visible cracks render these parts virtually useless. However, when very tiny cracks occur, e.g. due to brazing or welding processes, and remain undetected, this creates a potential hazard. Such cracking can form the starting points of vibration-induced cracks or may lead to sudden component failure when loads are applied.

In relevant literature, this type of damage has a number of different designations:

- liquid-metal induced cracking (LMIC) or liquid-metal induced stress corrosion cracking
- soldering brittleness

- Flüssigmetallversprödung
- Liquid Metal Embrittlement (LME)

Die Problematik der flüssigmetallinduzierten Rissbildung ist seit Langem bekannt und gut dokumentiert. Zahlreiche Einflussgrößen wurden bereits untersucht und/oder sind nach wie vor Gegenstand von Forschungsarbeiten.

Einteilung der Richtlinienreihe VDI 3822

In der Richtlinie VDI 3822 werden Grundlagen, Begriffe und Definitionen, der Ablauf einer Schadensanalyse und ihre Dokumentation behandelt. Sie ist für die verschiedenen Werkstoffgruppen anwendbar:

VDI 3822 Schadensanalyse; Grundlagen, Begriffe, Ablauf einer Schadensanalyse, Dokumentation

In den werkstoffspezifischen Blättern werden Schadensarten, Schadensmerkmale, Schadensabläufe und Schadensmechanismen beschrieben. Dabei werden – die Realität stark vereinfachend – verschiedene Beanspruchungsarten in den Blättern separat behandelt. Dem Schadensanalytiker ist damit die Möglichkeit gegeben, nachzuschlagen, welche Wirkungen die verschiedenen Beanspruchungen auf ein Produkt haben können. Ihm obliegt aber weiterhin die Verantwortung, durch Abgleich mit dem Schadensumfeld die Eintrittswahrscheinlichkeit der einzelnen Beanspruchungsarten zu bewerten und die Wirkung kollektiver Beanspruchungen zu berücksichtigen.

In den folgenden Blättern werden die verschiedenen Schadensarten, die Schadensmerkmale, die Schadensursachen und die Schadensabläufe im Fall von Schäden an Metallprodukten beschrieben:

- Blatt 1.1 Schäden an Metallprodukten durch mechanische Beanspruchungen (bisher: Blatt 2; in Vorbereitung)
- Blatt 1.2 Schäden an Metallprodukten durch Korrosion in wässrigen Medien (bisher: Blatt 3)
- Blatt 1.3 Schäden an Metallprodukten durch tribologische Beanspruchungen (bisher: Blatt 5)
- Blatt 1.4 Schäden an Metallprodukten durch thermische Beanspruchungen (bisher: Blatt 4)
- Blatt 1.5 Schäden an geschweißten Metallprodukten
- Blatt 1.6** Flüssigkeitsmetallinduzierte Rissbildung

In den folgenden Blättern werden die verschiedenen Schadensarten, die Schadensmerkmale, die

- liquid-metal-assisted cracking (LMAC)
- liquid metal embrittlement (LME)

The problem of crack development induced by liquid metal has been known for a long time and is well documented. Numerous determining factors have already been studied and/or are still the subject of research.

Structure of the series of standards VDI 3822

Standard VDI 3822 deals with the fundamentals, terms and definitions, the damage analysis procedure and associated documentation. It is applicable to diverse groups of materials:

VDI 3822 Failure analysis; Fundamentals, terms, failure analysis procedure, documentation

The material-specific parts of the standard describe the type of damage, damage characteristics, damage development and mechanisms. The various types of loads and stresses are dealt with separately in the individual parts – although in greatly simplified form in comparison to real situations. The damage analyst can therefore find out how the product is affected by various loads and stresses. Nevertheless, the analyst is still responsible for evaluating the probability of individual loads and stresses by comparison with the overall damage situation and taking into account the effects of collective loads and stresses.

The following parts of the standard describe various types of damage, damage characteristics, causes and damage development affecting metal products:

- Part 1.1 Failures of metallic products caused by mechanical working conditions (up to now: Part 2; in preparation)
- Part 1.2 Failures of metallic products caused by corrosion in aqueous media (up to now: Part 3)
- Part 1.3 Failures on metal products caused by tribology working conditions (up to now: Part 5)
- Part 1.4 Failures caused by thermal loading (up to now: Part 4)
- Part 1.5 Failures on welded metal products
- Part 1.6** Liquid metal induced crack growth by hot dip galvanization

The following parts of the standard describe various types of damage, damage characteristics, caus-

Schadensursachen und die Schadensabläufe im Fall von Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten beschrieben:

- Blatt 2.1.1 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch fehlerhafte Konstruktion
- Blatt 2.1.2 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch fehlerhafte Verarbeitung
- Blatt 2.1.3 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch fehlerhafte Werkstoffauswahl und Fehler im Werkstoff
- Blatt 2.1.4 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch mechanische Beanspruchung
- Blatt 2.1.5 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch thermische Beanspruchung
- Blatt 2.1.6 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch tribologische Beanspruchung
- Blatt 2.1.7 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch mediale Beanspruchung
- Blatt 2.1.8 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch Witterungsbeanspruchung
- Blatt 2.1.9 Schäden an thermoplastischen Kunststoffprodukten durch mikrobielle Beanspruchung
- Blatt 2.1.10 Bedeutende Analysemethoden für die Schadensanalyse an thermoplastischen Kunststoffprodukten

In den folgenden Blättern werden die verschiedenen Schadensarten, die Schadensmerkmale, die Schadensursachen und die Schadensabläufe im Fall von Schäden an Elastomerprodukten beschrieben:

- Blatt 2.2.1 Schäden an Elastomerprodukten durch Alterung (in Vorbereitung)
- Blatt 2.2.2 Schäden an Elastomerprodukten durch fehlerhafte Werkstoffauswahl und Fehler im Werkstoff (in Vorbereitung)
- Blatt 2.2.3 Schäden an Elastomerprodukten durch fehlerhafte Fertigung
- Blatt 2.2.4 Schäden an Elastomerprodukten durch fehlerhafte Konstruktion
- Blatt 2.2.5 Schäden an Elastomerprodukten durch mechanische Beanspruchung
- Blatt 2.2.6 Schäden an Elastomerprodukten durch tribologische Beanspruchung

es and damage development affecting thermoplastic material products:

- Part 2.1.1 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by faulty design
- Part 2.1.2 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by faulty processing
- Part 2.1.3 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by an unfavourable choice of material and by defects in the material
- Part 2.1.4 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by mechanical stress
- Part 2.1.5 Defects of thermoplastic products caused by thermal stress
- Part 2.1.6 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by tribology-induced stress
- Part 2.1.7 Defects of thermoplastic products caused by chemical stress
- Part 2.1.8 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by weather-induced stress
- Part 2.1.9 Defects of thermoplastic products made of plastics caused by microbial stress
- Part 2.1.10 Significant instrumental analysis methods for failure analysis of elastomeric products

The following parts of the standard describe various types of damage, damage characteristics, causes and damage development affecting elastomer products:

- Part 2.2.1 Defects on elastomeric products caused by aging (in preparation)
- Part 2.2.2 Defects on elastomeric products caused by faulty compounding (in preparation)
- Part 2.2.3 Defects on elastomeric products caused by faulty processing
- Part 2.2.4 Defects on elastomeric products caused by faulty design
- Part 2.2.5 Defects on elastomeric products caused by mechanical stress
- Part 2.2.6 Defects on elastomeric products caused by tribological stress

- Blatt 2.2.7 Schäden an Elastomerprodukten durch thermische Beanspruchung
- Blatt 2.2.8 Schäden an Elastomerprodukten durch mediale Beanspruchung
- Blatt 2.2.9 Schäden an Elastomerprodukten durch klimatische Beanspruchung
- Blatt 2.2.10 Bedeutende Analysemethoden für die Schadensanalyse an Elastomerprodukten

Alle werkstoffspezifischen Blätter gelten jeweils eigenständig nur zusammen mit dem Grundlagenblatt VDI 3822.

Eine Liste der aktuell verfügbaren Blätter dieser Richtlinienreihe ist im Internet verfügbar unter www.vdi.de/3822.

1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie gibt primär Hinweise für die Abklärung von Schadensfällen. Gleichzeitig kann die Richtlinie gegebenenfalls hinsichtlich Qualitätssicherungsmaßnahmen in der betrieblichen Fertigungskette helfen, kostspielige und mitunter gefährliche Fehler zu vermeiden. Hilfestellung sowie Anleitung zur Vorgehensweise im konkreten Schadensfall können der Richtlinie VDI 3822 entnommen werden.

2 Normative Verweise

Das folgende zitierte Dokument ist für die Anwendung dieser Richtlinie erforderlich:

VDI 3822:2011-11 Schadensanalyse; Grundlagen und Durchführung einer Schadensanalyse

- Part 2.2.7 Defects on elastomeric products caused by thermal-induced stress
- Part 2.2.8 Defects on elastomeric products caused by media-induced stress
- Part 2.2.9 Defects on elastomeric products caused by biological stress
- Part 2.2.10 Significant instrumental analysis methods for failure analysis of elastomeric products

Each independent material-specific part of the standard only applies in conjunction with the basic standard VDI 3822.

A catalogue of all available parts of this series of standards can be accessed on the Internet at www.vdi.de/3822.

1 Scope

Primarily, this standard provides information which may assist in analysing the causes of failure or damage. With respect to quality assurance measures in the manufacturing chain, the standard may also help to prevent errors which are costly and in some cases dangerous. Support and guidance on dealing with actual cases of damage or failure is provided by the standard VDI 3822.

2 Normative references

The following referenced document is indispensable for the application of this standard:

VDI 3822:2011-11 Fundamentals and performance of failure analysis

Bild 1 zeigt die Einflussfelder und daraus resultierende Gefahrenzone des Lotbruchs im Überblick.

Figure 1 provides an overview of the causal fields and resulting danger zone for liquid-metal-induced failures.