

VEREIN
DEUTSCHER
INGENIEURE

Schadensanalyse
Schäden an keramischen Werkstoffen

VDI 3822
Blatt 3
Entwurf

Failure analysis – Failures of ceramic materials

Einsprüche bis 2024-11-30

- vorzugsweise über das VDI-Richtlinien-Einspruchsportal
<http://www.vdi.de/3822-3>
- in Papierform an
VDI-Gesellschaft Materials Engineering
Werkstoff- und Nanotechnik
Postfach 10 11 39
40002 Düsseldorf

Inhalt	Seite
Vorbemerkung	2
Einleitung	2
1 Anwendungsbereich	4
2 Normative Verweise	4
3 Schadensmechanismen technischer Keramiken	4
3.1 Spröder Bruch	4
3.2 Langsames Risswachstum	5
3.3 Werkstoffermüdung	5
4 Wichtige Beanspruchungsarten technischer Keramiken	6
4.1 Kontaktbeanspruchung	6
4.2 Thermoschockbeanspruchung	7
5 Grundlagen der Fraktografie	7
5.1 Bruchmechanischer Zugang zur Berechnung der Fehlergröße	8
5.2 Verlauf der Rissfläche	9
5.3 Makromorphologie des Bruchs	10
5.4 Mikromorphologie des Bruchs	13
5.5 Beispiele für typische Bruchausgänge in Keramiken	14
6 Durchführung von Schadensanalysen an keramischen Bauteilen	20
6.1 Zweck	20
6.2 Ausrüstung	20
6.3 Flussdiagramm zum Ablauf fraktografischer Untersuchungen	22
6.4 Interpretation der Bruchmerkmale	23
6.5 Einschränkungen und Probleme	24
7 Typische Schadensbilder	26
Schrifttum	27

VDI-Gesellschaft Materials Engineering (GME)
Fachbereich Werkstoff- und Nanotechnik

VDI-Handbuch Werkstofftechnik
VDI-Handbuch Fabrikplanung und -betrieb, Band 1: Betriebsüberwachung/Instandhaltung
VDI-Handbuch Produktentwicklung und Konstruktion

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. Hierfür werden in der Richtlinienreihe

- Begriffe definiert,
- Schadensarten einheitlich benannt und beschrieben,
- systematische Vorgehensweisen bei der Schadensanalyse dargelegt,
- die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Untersuchungsstellen gewährleistet und
- Voraussetzungen zur nachvollziehbaren Dokumentation geschaffen.

Den Anwendern der Richtlinienreihe werden kennzeichnende Schadensbilder, Schadensbeschreibungen und Schadensmechanismen zum Vergleich mit dem zu untersuchenden Schadensfall zur Verfügung gestellt. Die Richtlinien 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).

Ein wichtiges Werkzeug für die Schadensanalyse an keramischen Bauteilen ist die Fraktografie. Hier sind die Beanspruchungsformen, die als Folge der typischen Spannungsfelder typische Schadensmuster verursachen, von besonderer Bedeutung. Bei den Keramiken sind Kontaktbeanspruchungen und Beanspruchungen durch Temperaturwechsel besonders häufige Schadensursachen. Mögliche Schadensmechanismen von Keramiken sind

- der spröde Bruch,
- das unterkritische Risswachstum,
- die Werkstoffermüdung,
- das Kriechen sowie
- Oxidation und Korrosion.

Eine umfassende Beschreibung der Fraktografie und Schadensanalyse von Keramiken findet sich auch in [1]. Die Vorgehensweise zur fraktografischen Untersuchung von Keramiken ist bereits standardisiert (DIN EN 843-6). Diese Richtlinie zur Schadensanalyse an Keramiken basiert in der fraktografischen Analyse auf [2].

Einteilung der Richtlinienreihe

In der Richtlinienreihe VDI 3822 werden Grundlagen, Begriffe, der Ablauf einer Schadensanalyse und ihre Dokumentation behandelt, die sich in dem Grundlagenblatt für die verschiedenen Werkstoffgruppen nicht unterscheidet:

VDI 3822 Schadensanalyse – Grundlagen und Durchführung einer Schadensanalyse

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 nachfolgend aufgelisteten 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
- Blatt 1.2 Schäden an Metallprodukten durch Korrosion in wässrigen Medien
- Blatt 1.3 Schäden an Metallprodukten durch tribologische Beanspruchungen
- Blatt 1.4 Schäden durch thermische Beanspruchungen
- Blatt 1.5 Schäden an geschweißten metallischen Bauteilen
- Blatt 1.6 Flüssigkeitsmetallinduzierte Rissbildung

In den nachfolgend aufgelisteten Blättern werden die verschiedenen Schadensarten, die Schadensmerkmale, die 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 Kunststoffprodukten

In den nachfolgend aufgelisteten 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
- Blatt 2.2.2 Schäden an Elastomerprodukten durch Fehler bei der Compound-Herstellung
- Blatt 2.2.3 Schäden an Elastomerprodukten durch Fertigungsfehler
- Blatt 2.2.4 Schäden an Elastomerprodukten durch Fehler bei der Konstruktion
- Blatt 2.2.5 Schäden an Elastomerprodukten durch mechanische Beanspruchung
- 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

Im vorliegenden Blatt 3 werden die verschiedenen Schadensarten, die Schadensmerkmale, die Schadensursachen und die Schadensabläufe im Fall von Schäden an keramischen Produkten beschrieben.

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

Eine Liste der aktuell verfügbaren und in Bearbeitung befindlichen Blätter dieser Richtlinienreihe sowie gegebenenfalls zusätzliche Informationen sind im Internet abrufbar unter www.vdi.de/3822.

1 Anwendungsbereich

In dieser Richtlinie ist eine grundlegende Anleitung zur Identifikation möglicher Versagensursachen und Bruchausgänge angeführt. Sie gibt einen kurzen Überblick über Schadensformen, die bei keramischen Werkstoffen auftreten, und erläutert grundlegende Elemente der praktischen Fraktografie. Fokus wird dabei auf Versagensursachen gelegt, die bei Raumtemperatur und mittleren Temperaturen auftreten. Auf die Darstellung der vor allem bei sehr hohen Temperaturen auftretenden Versagensursachen Kriechen, Oxidation und Korrosion wird verzichtet.

Es werden daher vor allem Schäden beschrieben, die auf spröden Bruch zurückzuführen sind. Besonderer Wert wird auf die Vorgehensweise zur Identifikation von Bruchausgängen gelegt. Auf das unterkritische Risswachstum wird nur kurz eingegangen. Werkstoffermüdung (Werkstoffschädigung als Folge einer Wechselbeanspruchung) wurde in Keramiken in den 1970er-Jahren als mögliche Schadensursache im Labor zwar nachgewiesen, sie hat in der Praxis aber keine Bedeutung. Daher wird auch auf die Darstellung von Ermüdungsschäden verzichtet.

Weiterführende Literatur zu den Grundlagen der Fraktografie und Beispiele zu einzelnen, speziellen Schadensfällen sind im Schrifttum angeführt.