

DIN EN 3873

ICS 49.025.05; 49.025.15

**Luft- und Raumfahrt –
Prüfverfahren für metallische Werkstoffe –
Ermittlung der Rissfortschritts-Geschwindigkeit an Cornercrackproben
(Eckanriss);
Deutsche und Englische Fassung EN 3873:2010**

Aerospace series –

Test methods for metallic materials –

Determination of fatigue crack growth rates using Corner-Cracked (CC) test pieces;
German and English version EN 3873:2010

Série aérospatiale –

Méthodes d'essais applicables aux matériaux métalliques –

Détermination de la vitesse de propagation de fissure en fatigue à l'aide d'éprouvettes
avec fissure en coin;

Version allemande et anglaise EN 3873:2010

Gesamtumfang 69 Seiten

Normenausschuss Luft- und Raumfahrt (NL) im DIN

Nationales Vorwort

Der Verband der Europäischen Luft-, Raumfahrt- und Verteidigungsindustrie Normung (ASD-STAN) ist vom Europäischen Komitee für Normung (CEN) für zuständig erklärt worden, Europäische Normen (EN) für das Gebiet der Luft- und Raumfahrt auszuarbeiten. Durch die Vereinbarung vom 3. Oktober 1986 wurde ASD Assoziierte Organisation (ASB) des CEN.

Die vorliegende Norm EN 3873:2010 wurde von ASD-STAN, Fachbereich Elektrotechnik, Avionik, unter Mitwirkung deutscher Experten des Normenausschusses Luft- und Raumfahrt erarbeitet.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 131-01-01 AA „Stähle“ im DIN Normenausschuss Luft- und Raumfahrt.

Entsprechend Beschluss 57/9 des Technischen Ausschusses des Beirats des Normenausschusses Luft- und Raumfahrt (NL) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V. sind die europäischen Luft- und Raumfahrt-Normungsergebnisse zweisprachig, in Deutsch und Englisch, in das Deutsche Normenwerk zu überführen. Aus diesem Grund wurde der Deutschen Fassung dieser EN-Norm die Englische Fassung hinzugefügt.

Deutsche Fassung

Luft- und Raumfahrt - Prüfverfahren für metallische Werkstoffe -
Ermittlung der Rißfortschritts- Geschwindigkeit an
Cornercrackproben (Eckanris)

Aerospace series - Test methods for metallic materials -
Determination of fatigue crack growth rates using Corner-
Cracked (CC) test pieces

Série aéronautique - Méthodes d'essais applicables aux
matériaux métalliques - Détermination de la vitesse de
propagation de fissure en fatigue à l'aide d'éprouvettes
avec fissure en coin

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 30. Juli 2010 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN-CENELEC oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Inhalt

Seite

Vorwort	3
Einleitung.....	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen.....	5
3 Symbole und Abkürzungen	5
4 Allgemeines	7
5 Ressourcen	8
6 Proben.....	10
7 Vorgehensweisen	11
8 Gesundheit und Sicherheit.....	15
9 Bewertung der Ergebnisse	15
10 Prüfungsaufzeichnung.....	17
Anhang A (normativ) Informationen zur Messung von Risstiefen in Eckanrissproben mit der DC— Potentialabfall-Methode	19
Anhang B (normativ) Spannungsintensitätsfunktion für Eckanrissproben	23
Anhang C (normativ) Anleitungen zur Handhabung und Entfettung der Probe	25

Vorwort

Dieses Dokument (EN 3873:2010) wurde vom Verband der Europäischen Luft-, Raumfahrt- und Verteidigungsindustrie – Normung (ASD-STAN) erstellt.

Nachdem Umfragen und Abstimmungen entsprechend den Regeln dieses Verbandes durchgeführt wurden, hat diese Norm die Zustimmung der nationalen Verbände und offiziellen Behörden der Mitgliedsländer der ASD erhalten, bevor sie CEN vorgelegt wurde.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Mai 2011, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Mai 2011 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN [und/oder CENELEC] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Einleitung

Diese Norm und ihre Teile gehören zur allgemeinen Organisation der ASD-Sammlung der Standards für metallische Werkstoffe für Luft- und Raumfahrt-Anwendungen.

1 Anwendungsbereich

Diese Norm legt die Anforderungen für die Bestimmung der Geschwindigkeit des Ermüdungswachstums unter Verwendung von Eckanriss-Proben (Corner-Crack, CC) fest. Die Rissentwicklung wird mit einem Potentialabfallsystem gemessen, und die berechneten Risstiefen können über Markierungsbänder, die im Verlauf der Prüfung an der Bruchfläche erzeugt wurden, korrigiert werden. Die Ergebnisse werden in Form der Schwingbreite der Risspitzen-Spannungsintensität (ΔK) dargestellt, wobei die Risstiefen und das Prüfspannungsniveau aufgezeichnet werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 2002-002, *Luft- und Raumfahrt — Metallische Werkstoffe — Prüfverfahren — Teil 2: Zugversuch bei Hochtemperatur*

EN ISO 7500-1, *Metallische Werkstoffe — Prüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen — Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen — Prüfung und Kalibrierung der Kraftmesseinrichtung*

EN ISO 3785, *Metallische Werkstoffe — Kennzeichnung von Probenachsen in Bezug zur Halbzeuggefügetextur*

ASTM E 647-2008, *Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates* ¹⁾

ASTM E 1012-2005, *Verification of test frame and specimen alignment under tensile and compressive axial force application* ¹⁾

3 Symbole und Abkürzungen

a	Risstiefe. Die Risstiefe a ist der Abstand von der extrapolierten ursprünglichen Ecke, die die Kerbe enthält, zur Mitte der Risspitze (45°-Position). Für die Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors muss die Risslänge in Meter (m) angegeben werden
a_e	End-Risstiefe (in Millimeter)
a_i	Anfangs-Risstiefe (in Millimeter)
a_m	Gemessene Risstiefe (optisch, nach der Prüfung an der Bruchoberfläche mit Oberflächen-Mikrografie oder SEM)
a_v	Berechnete (Potential-) Risstiefe ist die durchschnittliche Risstiefe gemäß der mittelwertbildenden Eigenschaft der Potential-Messmethode. Berechnung mit durchschnittlichen Längen, die an mehreren Positionen entlang der Rissfront gemessen werden, eignen sich am besten für die Korrelation mit den Potentialmessungen (in Millimeter)
Δa	Anstieg des Risswachstums (in Millimeter)
da/dN	Ermüdungsriß-Wachstumsrate (Fatigue crack growth rate, FCGR) (in m/Zyklus)
W	Breite der Probe (in Millimeter)
a/W	Normalisierte Risstiefe (in Millimeter/Millimeter)

1) Veröffentlicht durch: American Society for Testing and Materials (ASTM), <http://www.astm.org/>.

f	Frequenz (in Hz)
E	Youngscher Modul (in GPa)
K	Spannungsintensitätsfaktor (allgemein) Der Spannungsintensitätsfaktor K ist ein Belastungsparameter, der das Spannungsfeld an der Risspitze charakterisiert. Er ist eine Funktion von Belastung, Risttiefe und Geometrie der Probe (in MPa $\sqrt{\text{m}}$)
$K_{\text{max.}}$	Maximalwert von K im Verlauf eines Belastungszyklus, entsprechend der maximal angelegten Zugkraft (in MPa $\sqrt{\text{m}}$)
$K_{\text{min.}}$	Minimalwert von K im Verlauf eines Belastungszyklus (in MPa $\sqrt{\text{m}}$)
ΔK	Schwingbreite von K im Verlauf eines Belastungszyklus = $K_{\text{max.}} - K_{\text{min.}} = (1 - R) \cdot K_{\text{max.}}$ (in MPa $\sqrt{\text{m}}$)
ΔK_{eff}	Effektive Schwingbreite von K , aufgrund von Risssschließung induzierter Reduktion des angelegten ΔK (in MPa $\sqrt{\text{m}}$)
ΔK_{th}	Ermüdungsrissschwellwert Der asymptotische Wert von ΔK für den da/dN sich Null annähert. Für die meisten Werkstoffe ist der funktionale Schwellwert definiert als der zu 10^{-7} m/Zyklus gehörende Wert für ΔK . Für die Angabe von ΔK_{th} muss die zugehörige niedrigste Dekade von Daten in der Nähe des Schwellwerts angegeben werden.
C	Normalisierter K-Gradient $C = (1/K \times \text{d}K/\text{d}a)$. Für Belastungsabschaltung, um ein gewünschtes anfängliches ΔK zu erreichen, definiert C das anteilige Verhältnis der Veränderung von K mit zunehmender Risttiefe a . $C = 1/K \times \text{d}K/\text{d}a = 1/K_{\text{max.}} \times \text{d}K_{\text{max.}}/\text{d}a = 1/K_{\text{min.}} \times \text{d}K_{\text{min.}}/\text{d}a = 1/\Delta K \times \text{d}\Delta K/\text{d}a$, (in mm^{-1})
N	Anzahl der Belastungszyklen Spannungszyklus (Ermüdungszyklus, Belastungszyklus) ist das kleinste Segment im Spektrum der Last-Wellenform, das periodisch wiederholt wird
N^*	Anzahl der Spannungszyklen zwischen zwei Markierungszyklen
N_{m}	Anzahl der Spannungszyklen in einem Markierungszyklus
ΔN	Spannungszyklus-Differenz
r	Kerbenradius (angegeben in Millimeter)
F_{m}	Mittlere Kraft (angegeben in kN)
$F_{\text{max.}}$	Maximale Zugkraft, die auf die Probe in einem Zyklus angewandt wird (angegeben in kN)
$F_{\text{min.}}$	Minimale Zugkraft (in kN)
ΔF	Kraftschwingbreite (in kN), $\Delta F = F_{\text{max.}} - F_{\text{min.}}$
q	Auflösungsvermögen des Risstiefen-Messsystems (angegeben in mm)
R	Kraftverhältnis ($= F_{\text{min.}}/F_{\text{max.}} = K_{\text{min.}}/K_{\text{max.}}$)
R^*_{m}	Verhältnis $F_{\text{min.}}/F_{\text{max.}}$ im Verlauf eines Markierungszyklus
R_{p}	Dehngrenze mit 0,2 % plastischer Verformung (Dehngrenze $R_{\text{p0,2}}$) bei Prüftemperatur (angegeben in MPa)
R_{m}	Zugfestigkeit bei Prüftemperatur (angegeben in MPa)
σ_{f}	Fließspannung – hier definiert als das arithmetische Mittel aus R_{p} und R_{m} (angegeben in MPa)
Z	Achsabstand von der Rissebene zu jedem für die Potentialmessung verwendeten Draht (angegeben in Millimeter) – ($2Z$ = Drahtabstand)

4 Allgemeines

4.1 Die Eckanriss-Probe (Corner-Crack, CC) ist nützlich für die Bestimmung von da/dN für Komponenten, an denen Risse üblicherweise an einer Ecke auftreten, wie zum Beispiel in Löchern in Turbinenscheiben. Die Bestimmung erfordert die Verwendung einer axial belasteten Probe mit quadratischem oder rechteckigem Querschnitt. Diese kann für positive und negative Spannungsverhältnistests auf Zug oder Kompression belastet werden, falls geeignete Endformen eine spielfreie Belastung erlauben.

Eine sorgfältig definierte und hergestellte Kerbe oder ein kleiner, bogenförmiger Schlag ermöglicht die Anregung der Rissbildung in der Mitte des schmalen Bereichs. Durch zyklische Belastung wird am Tiefpunkt der Kerbe ein Ermüdungsrisss angeregt, dessen Wachstum durch eine geeignete Methode, z.B. Potentialabfall-Techniken überwacht wird. Mit wachsendem Riss wird die auf die Probe angewandte Kraftschwingbreite beibehalten oder auf kontrollierte Art reduziert, bis die Risse von ausreichender Tiefe sind, so dass der Einfluss der Kerbe und die Methode der Risseinleitung vernachlässigbar werden und ΔK die niedrigste Steigerungsrate erreicht hat. Dann wird die Prüfung durchgeführt. Die Kraftschwingbreite wird konstant gehalten und die Risstiefe als Funktion der verstrichenen Zyklen aufgezeichnet. Diese Daten werden dann einer numerischen Analyse unterworfen, die die Bestimmung von da/dN als Funktion von ΔK ermöglicht.

4.2 Die Mehrheit der metallischen Werkstoffe kann mit dieser Methode geprüft werden, vorausgesetzt dass die angelegte Kraft so bemessen ist, dass der verformbare Bereich vor der Riss Spitze im Vergleich zum verbleibenden Querschnitt klein ist (linear-elastisches Kriterium).

4.3 Die hier verwendete Probe ist eine Eckanriss-Probe (Corner-Crack, CC). Siehe Bild C.1.

4.4 In der Standard-Risswachstumsprüfung wird angenommen, dass die Belastungsamplitude über die Prüfung konstant ist, nachdem das erforderliche ΔK -Niveau und R -Verhältnis erreicht ist. Eine weitere Belastungs-Schwingbreite kann hinzugefügt werden, wenn bestimmte Übergangseffekte untersucht werden sollen.

4.5 Die Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK ist:

$$\Delta K = K_{\max.} - K_{\min.} \quad (1)$$

wobei für das Verhältnis R

$$R = \frac{K_{\max.}}{K_{\min.}} \quad (2)$$

gilt.

$$\text{Aus Gleichungen (1) und (2) folgt, dass für } R > 0, \Delta K = (1 - R) K_{\max.} \quad (3)$$

4.6 Der Referenzpunkt für die Messung der Risstiefe mit CC-Proben ist die ursprüngliche Ecke der Probe, die von den Vorsprüngen an den Seiten der Probe auf der Bruchfläche neben der Kerbe bestimmt wird. Die mögliche Rundung der Ecke während der Herstellung der Probe führt dazu, dass dieser Referenzpunkt nicht mehr auf der Bruchfläche liegt. Diese Rundung muss bestimmt werden, um einen "Nullpunktversatz" zwischen dem Referenzpunkt und der abgerundeten Ecke zu erhalten, wo der Messdraht angeschweißt wird, der für die Kalibrierung der Potentialabfall-Messungen verwendet wird.

4.7 Der Zweck der Rissausbreitungs-Messungen ist, die zur Risstiefe a gehörenden Belastungszyklen N zu bestimmen. Die Messungen (a - N Punkte, siehe Bild C.2) werden üblicherweise in Form einer Kurve aus da/dN über ΔK bestimmt (siehe Bild C.3). Es ist nicht immer der Fall, dass die Rissausbreitung durch die Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors ΔK beschrieben werden kann. Wenn sie so nicht beschrieben werden kann, können andere Gesetze angewandt werden, z.B. die Risswachstumsrate als Funktion von $K_{\max.}$

4.8 Das Verhalten des Risswachstums hängt von mehreren Parametern ab. Das Rahmenkonzept, innerhalb dem die Prüfung durchgeführt werden muss, muss präzise definiert sein, um unerwünschte Effekte auf die Ergebnisse zu vermeiden.

Die wichtigsten, die Ergebnisse beeinflussenden Faktoren sind:

- a) Temperatur und Umgebung;
- b) Belastungsspektrum.

Die Prüfparameter R , Haltezeit und Belastungsfrequenz müssen definiert und aufgezeichnet werden, bevor die Prüfung beginnt. Die Ergebnisse können auch durch die Belastungshistorie beeinträchtigt werden. Dazu gehören Unterbrechungszeiten, z.B. Anhalten und erneutes Starten zur Kontrolle der oberflächlichen Risslänge oder anderer Parameter, Arbeitspausen an Wochenenden, usw. Diese müssen aufgezeichnet werden.

- c) Eigenspannungen

Eigenspannungen werden üblicherweise ignoriert, da sie schwer zu bestimmen sind und Eigenspannungen in einer Komponente sehr schwer als Duplikat in einer Probe zu erhalten sind. Ihr Vorhandensein in einer Komponente beeinflusst die Lebensdauer einer Komponente und muss in der Verwendung der Risswachstumsdaten berücksichtigt werden. Das Vorhandensein von unerwarteten Eigenspannungen in der Probe kann als Asymmetrie der Rissfront beobachtet werden.

4.9 Verwendbarkeit von Ergebnissen

Die Risswachstums-Messungen werden allgemein verwendet für:

- a) Untersuchung des Einflusses von Ermüdungsriss-Wachstum auf die vorhergesagte Lebensdauer einer Komponente oder für die Bewertung der Risswachstums-Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs oder den Zustand nach Wärmebehandlung;
- b) Definition der Anforderungen an zerstörungsfreie Prüfverfahren; und
- c) makroskopische quantitative Bestimmung verschiedener Faktoren (z.B. Belastung, Mikrostruktur, Herstellung, usw.).

5 Ressourcen

5.1 Prüfapparatur

5.1.1 Allgemeines

Prüfungen müssen mit einem rückmeldenden, lastgeregelten, servohydraulischen oder elektrohydraulischen Prüfsystem durchgeführt werden, das für gleichmäßige Lastzunahme vom ersten Belastungszyklus an ohne Überschreitung der gewünschten $F_{\max}$ ausgelegt ist. Das System muss in der Lage sein, die Zyklen nach wählbaren Zyklusintervallen oder Risstiefen, bei einem gewünschtem Potentialniveau oder nach Wunsch zu unterbrechen, um Messungen der optischen Risstiefe, des Potentials oder thermischen Potentials durchzuführen, ohne die Prüfung anzuhalten oder beim folgenden Neustart Überlasten zu verursachen.

5.1.2 Belastungsregelung

Die Apparatur muss die folgenden Anforderungen in Übereinstimmung mit EN ISO 7500-1 erfüllen:

- a) Genauigkeit der elektronischen Kraftmessungen: $\pm 0,5 \%$ bzw. $\pm 0,25 \%$ des Nennbereichs;
- b) Genauigkeit der Regelung im Verlauf der Prüfung: besser als $0,5 \%$ des angegebenen Werts für ΔF ;
- c) elektrische Spannungsanforderungen der Aufzeichnungsinstrumente (obere und untere Spannungsschwingbreite, Zyklen): digitales Aufzeichnungsgerät wird empfohlen;
- d) Aufzeichnungsgenauigkeit im Verlauf der Prüfung: besser als $0,25 \%$.

5.1.3 Belastungsausrichtung

Gute Ausrichtung der Belastungsmechanik ist für die Sicherstellung einer symmetrischen Belastung entscheidend. Es muss ein Ausrichtungstest durchgeführt werden. Die Belastungsmechanik muss starr sein, um exzentrische Belastung bei Risswachstum zu vermeiden, da diese den angelegten Spannungsintensitätsfaktor an der Risspitze beeinflusse würde. Die Ausrichtung muss nach ASTM E 1012 durchgeführt werden.

5.2 Kalibrierung

Alle Instrumente müssen mindestens einmal im Jahr kalibriert werden, außerdem nach jedem Vorfall, der die Kalibrierungsgenauigkeit beeinflusst haben könnte. Multiplikationsfaktoren (z.B. $\times 10$ oder $\times 100$) dürfen bei der Zählung der Zyklen nicht verwendet werden, es sei denn, der Faktor ist kleiner als 10^{-2} wenn 10^{-x} mm/Zyklus gemessen werden sollen.

Thermoelemente müssen alle 6 Monate nach EN ISO 3785 kalibriert werden.

5.3 Temperaturmessung und -regelung

Die Temperatur der Probe muss mit einem kalibrierten Platin/ Rh (Typ R)- oder Chromel-Alumel (Typ K)-Thermoelement in entsprechendem thermischen Kontakt zur Probe auf der Mittellinie einer zur Kerbe benachbarten Fläche, 2 mm bis 4 mm über oder unter der Rissebene gemessen werden. Die Abschirmung des Kontakts vor Strahlung ist nicht notwendig, wenn der Unterschied zwischen angezeigter Temperatur einer unabgeschirmten Messspitze und einer in eine Bohrung in der Probe eingesetzten Messspitze nachgewiesenermaßen weniger als die Hälfte der unten dargestellten zulässigen Abweichung beträgt.

Im Verlauf der Prüfung darf die Temperatur von den angegebenen Werten nicht um mehr abweichen als:

Für Prüfungen bei höheren Temperaturen bis $(1\,000 \pm 3)^\circ\text{C}$: $(1\,000 \pm 4)^\circ\text{C}$ bis $(1\,100 \pm 4)^\circ\text{C}$.

Temperaturen müssen, unabhängig von der Genauigkeit der Temperaturregelung, mit jeder Änderung um 1°C aufgezeichnet und überwacht werden.

Die Aufzeichnungsgenauigkeit muss besser als $0,25 \%$ des angegebenen Werts sein.

Raumtemperaturschwankungen; d.h. bei Nacht, an Wochenenden, müssten bekannt sein und auf $\pm 5^\circ\text{C}$ begrenzt werden.

Für Prüfungen bei erhöhten Temperaturen muss ein 3-Zonen-Ofen mit elektronischem PID-Regler verwendet werden. Die Greifer müssen ebenfalls beheizt sein.

5.4 Greifen von Proben

Um das Gewicht von Greifern und Halterungen zu kompensieren, muss die Belastungszelle so eingestellt werden, dass die Probe bei angezeigter Kraft Null nicht unter Spannung steht.

6 Proben

6.1 Eckanriss-Probe (en: Corner-Crack, CC)

Die Eckanriss-Probe (en: Corner-Crack, CC) ist in Bild C.1 dargestellt. Eckanriss-Proben können mit positiver oder negativer R -Verhältnis-Belastung verwendet werden, vorausgesetzt das Greifersystem kann Belastungen ohne Spiel übertragen.

6.2 Spannungsintensität — Faktorberechnung

Der Spannungsintensitätsfaktor für die Eckanrissprobe wird wie folgt berechnet (eine genauere Beschreibung findet sich in Anhang B):

Zuerst wird der Geometriefaktor für die 45°-Position berechnet:

$$Y_{45^\circ} = 0,574 + 1,199 (1 - a/W) - 1,324 (1 - a/W)^2 + 0,4845 (1 - a/W)^3 \quad (4)$$

Dann, für Risstiefen $a \leq 0,2 W$:

$$Y = 1,143 (1 + 0,6 a/W) (1 + 0,7 a/W)^2 (2/\pi) Y_{45^\circ}, \quad (5)$$

und für Risstiefen $a > 0,2 W$:

$$Y = [0,1 (a/W)^2 + 0,29 (a/W) + 1,081] \times [0,75 (a/W)^2 - 0,185 (a/W) + 1,019] \times [(0,9 (a/W)^2 - 0,21 (a/W) + 1,02)] 2/\pi \times Y_{45^\circ} \quad (6)$$

und

$$K = \frac{F \times Y}{W^2} \times \sqrt{\frac{\pi \times a}{10}} \quad (7)$$

Dabei ist

- a die Risttiefe (angegeben in cm);
- W die Breite der Probe (angegeben in cm);
- F die Kraft (angegeben in kN);
- K die Spannungsintensität (angegeben in MPa $\sqrt{m}$).

Eine Kontrolle dieser Berechnung kann mit den folgenden Eingaben und Resultaten vorgenommen werden:

- a 1 mm (0,1 cm);
- W 0,8 cm;
- F 32 kN.

hier ist

- Y 0,691;
- K 19,365.

6.3 Größenanforderungen an Proben

Damit die Ergebnisse Gültigkeit haben, müssen die Proben für alle Werte der angelegten Last einer Spannung innerhalb des Elastizitätsbereichs des Werkstoffs ausgesetzt werden.

6.4 Orientierung der Rissebene

Die Orientierung der Rissebene, die in Zusammenhang mit der charakteristischen Richtung des Produkts steht, wird mit einem Buchstabencode mit Bindestrich wie in Bild C.4 bezeichnet. Der/die Buchstabe/n vor dem Bindestrich stellen die Belastungsrichtung senkrecht zur Rissebene dar; der/die Buchstabe/n nach dem Bindestrich die erwartete Richtung der Rissausbreitung. Für gezogene Metalle bezeichnet der Buchstabe *L* immer die Richtung der Hauptbearbeitungsdeformation, *T* bezeichnet die Richtung der geringsten Deformation und der Buchstabe *S* ist die dritte orthogonale Richtung. *C* bezeichnet die umlaufende Richtung und *R* die Radialrichtung in einer Scheibe, während *L* die Richtung entlang der longitudinalen Achse der Scheibe bezeichnet.

6.5 Eigenspannungen

In Proben, an denen keine Spannungsentlastung durchgeführt wurde oder an denen Schmiedearbeiten Eigenspannungen verursacht haben können, die nicht entsprechend entspannt werden können, können die Riss-Wachstumsrate und/oder die Rissymmetrie beeinträchtigt werden, besonders bei niedrigeren ΔK -Niveaus.

7 Vorgehensweisen

7.1 Zustand der Proben

Die Proben müssen vor dem Beginn der Prüfung gereinigt und vermessen werden. Proben müssen entsprechend den Anleitungen in Anhang C entfettet und gereinigt werden. Die Tiefe der Kerbe und der Abstand der Messdrähte müssen vor dem Test gemessen werden, da der Abstand der Messdrähte nach dem Test nicht bestimmt werden kann, und die Tiefe der Kerbe wird benötigt, um die anfänglichen Spannungsintensitätsniveaus zu bestimmen.

7.2 Heizen

Die maximale Heizrate ist 1 K/s. Nachdem die Probentemperatur den Vorgabewert erreicht hat, ist zur Stabilisierung mindestens 30 min zu warten.

7.3 Anzahl der Prüfungen

Die Anzahl der Prüfungen hängt von der beabsichtigten Verwendung der Daten ab. In jedem Fall sind für jeden Satz zu prüfender Parameter mindestens 2 Prüfungen durchzuführen. Soweit möglich, müssen die Prüfungen identisch verlaufen, sodass Streuungen Werkstoffeffekten zugeordnet werden können. Falls dies nicht möglich ist, müssen alle Prüfungen innerhalb der selben ΔK -Schwingbreite, mit einer ähnlichen Anzahl von Messpunkten und ähnlichen Messintervallen durchgeführt werden.

7.4 Prüfungsdurchführung, allgemein

7.4.1 Allgemeines

Die Prüfung muss mit konstanter Belastungsamplitude (ΔF) durchgeführt werden. Allerdings können Risswachstumsmessungen unter variabler Belastungsamplitude gewünscht sein, besonders wenn aus einer begrenzten Anzahl von Proben bestimmte Informationen erhalten werden sollen. In diesem Fall muss die Vorgehensweise so gewählt werden, dass ungewünschte Übergangseffekte ausgeschlossen sind.

7.4.2 Messung der Risstiefe

Risstiefenmessungen müssen mit der Potentialabfallmethode durchgeführt werden:

Die DC (Gleichstrom)-Potentialabfall-Methode bestimmt die Risstiefe über den Anstieg des Potentials (V), das über die Öffnung des Risses von einem anfänglichen Referenzpunkt V_0 gemessen wird, der bei einer bekannten oder geschätzten anfänglichen Risstiefe bei Prüftemperatur gemessen wird, wobei hierzu ein konstanter Strom (~ 10 A) angelegt wird, der über die Rissfläche fließt. Für einen konstanten Stromfluss steigt der elektrische Potential- oder Spannungsabfall über die Rissfläche mit steigender Rissgröße aufgrund der Modifikation des elektrischen Feldes und der zugehörigen Störung der Stromflusslinien an. Die Beziehung zwischen Potential und Risstiefe hängt von der Anordnung der Strom- und Messleitungen an der Probe ab. Informationen zur Anwendung dieser Methode finden sich in Anhang A. Alternativ kann eine AC (Wechselstrom)-Potentialabfall-Methode verwendet werden, die ebenfalls eine Kalibrierung erfordert.

7.5 Vorbereitung der Kerbe

7.5.1 Allgemeines

Um die Risseinleitung bei niedrigen Spannungsverhältnissen zu ermöglichen, muss der Radius der Kerbwurzel in der Größenordnung von $< 0,05$ mm liegen. Die verwendete Kerbtiefe hängt vom anfänglichen K ab, das für die Risseinleitung erforderlich ist. Für Nickel-basierte Legierungen haben sich entweder die Bogenschlag-Technik mit effektiver Tiefe der Kerbe von 0,1 mm oder das Diamantsägen der Kerbe mit 0,25 mm Tiefe als effektiv erwiesen. Bei Titan-Legierungen kann eine Funkenerosions-Kerbe von 0,1 mm oder geringerer Breite und 0,1 mm Tiefe für die Einleitung des Ermüdungsrisse wirksam eingesetzt werden.

7.5.2 Voranreißen

Der Zustand der Probe (z.B. Wärmebehandlung) bei der Einleitung des Voranrisses muss derselbe sein wie der, mit dem die Prüfung durchgeführt wird. Zwischen Voranreißen und Prüfung sind keine Wärmebehandlungen zulässig. Der Zweck des Voranreißen ist, scharfe Ermüdungsrisse ausreichender Tiefe zu liefern, so dass der Ausdruck der K -Kalibrierung nicht mehr von den Start-Kerben beeinflusst ist und dass das nachfolgende Ermüdungsrisss-Wachstum nicht vom vorherigen Verlauf der Voranriss-Kraft beeinflusst ist. Häufig ist zum Einleiten des Risses ein ΔK erforderlich, das größer ist als das ΔK , das als Startpunkt für die Prüfung gewünscht ist. In diesem Fall müssen die Kräfte schrittweise gesenkt werden, um die gewünschten Startkriterien zu erfüllen (siehe Bild C.9).

Falls $F_{\max.,j}$ und a_j die maximale Belastung und Risstiefe in einem Schritt j sind und $F_{\max.,j+1}$ und a_{j+1} sind die zugehörigen Werte im nächsten Schritt $j+1$ sind, müssen die folgenden Bedingungen erfüllt sein:

$$F_{\max.,j+1} \geq \frac{F_{\max.,j}}{1,2} \quad (8)$$

(Für den Anfang wird eine Änderung von 10 % empfohlen; später sind möglicherweise Schritte von nur 5 % erforderlich, um übermäßige Verzögerungen vor dem Risswachstum nach jedem Schritt zu vermeiden)

$$a_{j+1} - a_j \geq \frac{1}{3\pi} \left(\frac{K_{\max.,j}}{R_p} \right)^2 \quad (9)$$

Für jeden Werkstoff muss der beste anfängliche Wert $K_{\max.}$ bestimmt werden. Wenn dieser jedoch nicht bekannt ist, kann ein Anfangswert von $0,000\ 08 \sqrt{\text{E}} \sqrt{\text{m}}$ verwendet werden, bis Erfahrungen gesammelt wurden. Für Nickellegierungen mit hoher Festigkeit wird eine Netto-Querschnittsspannung von 500 MPa bis 600 MPa empfohlen.

Vorgehensweise

- a) Für die DC-Methode $\sim 0,1 W^2$ Ampere Gleichstrom anlegen, um ein anfängliches Potential von $\sim 1 mV$ zu erzeugen.
- b) Ein Ermüdungs-Voranriss von 0,03 mm sollte mit einer Spannungsintensitäts-Schwingbreite von $\sim 10 MPa\sqrt{m}$ bis $15 MPa\sqrt{m}$ erzeugt werden, bis eine Potentialänderung von 0,005 mV bis 0,01 mV aufgezeichnet wird. Diese Änderung stellt eine Rissausdehnung von etwa 0,01 mm bis 0,04 mm dar und weist üblicherweise auf gleichmäßiges Risswachstum hin. Bei einigen Werkstoffen sind kleine, schrittweise Erhöhungen von ΔK erforderlich, um die Rissbildung einzuleiten. Hier ist es nützlich, die im Druckbereich verwendete Minimalbelastung zu senken sowie die maximale Zugbelastung zu erhöhen, um Netto-Querschnittsspannungen zu nahe an der Dehnungsgrenze zu vermeiden.
- c) Die Belastung muss dann für das gewünschte minimale ΔK für die Prüfung eingestellt werden, während der Voranriss sich auf $a = \sim 0,3 mm$ ausdehnt. Bild C.6 zeigt ein Schema des typischerweise empfohlenen Belastungs-Verminderungsverfahrens (ASTM E 647); das Verminderungsverfahren muss für CC-Proben aufgrund der kleinen Probenabmessungen beschleunigt werden.

Die Temperatur für das Voranreißen muss die selbe wie bei der Prüfung sein, um Übergangseffekte zu vermeiden, die dazu neigen, das anfängliche Risswachstum nach dem Voranreißen zu verzögern. Das Voranreißen kann bei Raumtemperatur durchgeführt werden, um die Überwachung der Voranrisslänge auf den Probenseiten zu ermöglichen. Um während der Belastungsverminderung Zeit zu sparen, können anfangs höhere Frequenzen als während der Prüfungen verwendet werden (z. B. 5 Hz bis 20 Hz), aber die abschließenden 0,05 mm Voranriss-Wachstum sollte mit einer Wellenform durchgeführt werden, die über ähnliche Belastungsraten verfügt wie die Wellenform, die während der Prüfung verwendet wird.

Wenn bei maximaler Belastung während Risswachstumsraten-Prüfungen bei erhöhten Temperaturen Haltezeiten eingesetzt werden, können die anfänglichen 0,05 mm bis 0,1 mm der Wachstumsdaten durch solche Übergangseffekte beeinflusst werden und sollten als fragwürdig betrachtet werden, besonders wenn ein gradueller Übergang zu höheren Raten nach dem Umschalten auf eine Haltezeit erkennbar ist.

ANMERKUNG Wenn die Reduktion der Frequenz vom Voranreißen zu den Prüfbedingungen die Erhöhung von F_{max} aufgrund von Regeleigenschaften der Prüfanlage zulässt, dann müssen allen Frequenzänderungen einschließlich Stopps und Neustarts sofort eine vorsorgliche Reduktion um 10 % von F_{max} und F_{min} vorangestellt werden, um ein Überschießen von F_{max} zu vermeiden, und die Frequenzen müssen später erhöht werden.

- d) Das Potential bei dieser Referenz-Risstiefe und F_{min} wird aufgezeichnet, und die Probe wird, falls das Voranreißen bei RT durchgeführt wurde, immer noch bei F_{min} auf die Prüftemperatur erhitzt, falls Prüfungen bei erhöhter Temperatur erforderlich sind. Falls ja, wird das Potential bei der Prüftemperatur aufgezeichnet und verwendet, um den Temperatur-Korrekturkoeffizienten zu ermitteln.

$$Y_{TC} = \frac{V_o(RT)}{V_o(\text{Test Temp.})} \quad (10)$$

Dieser Koeffizient kann zur Korrektur der gemessenen Potentiale verwendet werden, die dann in die Risstiefen-Gleichung eingesetzt werden (siehe Anhang A).

Idealerweise wird die Probe bei Prüftemperatur vorangerissen. Das Referenzpotential wird im eingekerbten Zustand bei RT oder nach dem Heizen aufgenommen, um Y_{TC} zu erhalten. Für Kerben und Risse der selben Tiefen ist jedoch aufgrund der Unterschiede zwischen Potentialen eine andere Potentialabfallkalibrierung erforderlich.

Wenn das gewünschte R -Verhältnis größer als 0,1 ist, müssen jetzt weiteren Zyklen durchlaufen werden, um das gewünschte R -Verhältnis zu erreichen, wobei die Belastungs-Schwingbreite nach jeden 0,1 mm Riss-erweiterung um 10 % reduziert werden muss, indem die Minimalbelastung erhöht wird. Für Werkstoffe mit $R_p \sim 1\,000 MPa$ und für niedrige R -Verhältnisse können die Reduktionen nach jeden 0,05 mm Rissausdehnung vorgenommen werden, was die Verwendung höherer anfänglicher Voranriss-Spannungsintensitäten erlaubt oder die Möglichkeit einräumt, geringere Belastungsintensitäten für die anfänglichen Prüfungsbedingungen ohne übermäßige Voranrisstiefen zu erreichen.

Dies kann auch durch anfängliches Zyklisieren des R -Verhältnisses für die Prüfung mit einem ΔK von $\sim 16 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ erreicht werden, aber das resultierende, höhere K_{max} kann wegen des größeren verformbaren Bereichs der Risspitze bei erhöhten Temperaturen längere Rissverlängerungsanstiege zur Vermeidung von Verzögerung erfordern.

Der abschließende Übergang zu den Prüfparametern beinhaltet die Änderung zur Prüffrequenz, was Haltezeiten beinhalten kann. Die Wahl einer Sinus- oder trapezoiden Wellenform hängt teilweise von der Fähigkeit ab, das Potential bei der Maximalbelastung jedes Zyklus zu messen. Falls die Prüffrequenz geringer als 2 Hz ist, erfordern die Übergangseffekte möglicherweise ein Risswachstum von bis zu 0,2 mm, bevor konstante Wachstumsraten erzielt werden. Diese Frequenz und die mögliche Übergangszonengröße hängt vom Werkstoff, der Prüftemperatur und der Haltezeit ab. Umschalten des Regelmodus auf konstantes ΔK mit kontinuierlich abnehmender Regelung von F_{max} und F_{min} , um ΔK über die nächsten 0,1 mm bis 0,2 mm Wachstum konstant zu halten, wird die Größe dieses Übergangs zeigen, während das Risswachstum auf eine stabile Geschwindigkeit ansteigt. Während der Datenanalyse müssen jegliche Übergangsdaten gelöscht werden, wenn dieser Übergang nicht Gegenstand der Prüfung war.

7.5.3 Prüfung mit ansteigendem K

An diesem Punkt wird der Regelmodus auf konstantes F_{max} und F_{min} geschaltet, und ΔK darf mit der Rissverlängerung ansteigen. Die abschließende Risstiefe, wie sie aus dem Potentialabfall (Potential Drop, PD) bestimmt wurde, muss auf $a/W \leq 0,5$ begrenzt werden. Unterbrechungen der Prüfung müssen auf ein Minimum beschränkt werden. Falls die Prüfung unterbrochen wird, kann nach Wiederaufnahme der Zyklisierung eine Änderung der Wachstumsrate auftreten.

Zur Korrektur der berechneten Risstiefen müssen Messungen der aktuellen Anfangs- und End-Risstiefe, die an der Bruchfläche selbst nach der Prüfung vorgenommen wurden, verwendet werden. Für Prüfungen, bei denen die abschließende Risstiefe zu groß ist (z. B. $> 0,5 W$), kann das Verhältnis zwischen Risstiefe und gemessenem Potential nicht mehr linear sein, was die Analyse der Daten verzerrt. Die Einbringung periodischer "Markierungs-Belastungen" von einigen tausend Zyklen, bei denen mit dem selben K_{max} wie während der Prüfung, aber mit wesentlich höherem oder niedrigerem R -Verhältnis zyklisiert wird, kann sichtbare "Strandlinien" bei bekannten Zyklenzahlen und bekannten Potentialen erzeugen, die zur Kalibrierung der Risstiefenberechnungen auf der Grundlage des Potentials verwendet werden können, wobei die gemessenen Risstiefen an den Strandlinien verwendet werden (siehe Bild C.7). Somit können Abweichungen von der Linearität bestimmt werden und zur Einschränkung der verwendeten Daten verwendet werden. Bei geringen Wachstumsraten kann die Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors der Markierungszyklen unter dem Schwellwert liegen, in welchem Fall kein Fortschreiten während der Markierungszyklen erwartet werden kann, und der Übergang zu und von den Markierungszyklen ist auf der Bruchfläche möglicherweise nicht sichtbar. Bei mäßigen Temperaturen sind die Markierungen möglicherweise auch schwer zu beobachten. Dunkelfeldmikroskopie oder Oxidation der Bruchfläche nach der Prüfung sind möglicherweise günstige Methoden.

7.5.4 Messintervalle

Das Intervall muss gegenüber der Genauigkeit der Messmethode groß sein, aber klein im Vergleich zum K -Gradient der Probe.

Für Potentialabfall-Methoden muss das Risstiefen-Potential mindestens alle 15 min aufgezeichnet werden. Für geringere Wachstumsraten müssen längere Intervalle verwendet werden, und die Stabilität der Messungen im Verlauf der Zeit muss sichergestellt sein. Das gewählte Intervall muss eine angemessene Abtastung der Risstiefe bei kleinen Risstiefen erlauben, darf aber nicht weniger als das zehnfache der Messgenauigkeit sein. Die Risstiefe muss alle $\sim 0,1 \text{ mm}$ aufgezeichnet werden. Empfohlen wird ein Intervall von $1/20$ des anfänglichen Potentials ($0,05 \text{ mV}$, wobei $V_0 = 1 \text{ mV}$). Die daraus folgenden da/dN -Daten müssen mindestens 10 Punkte in jeder Wachstumsraten-Dekade darstellen.

7.6 Ende der Prüfung

Das Brechen der Probe im Verlauf eines Ermüdungstest sollte vermieden werden. Die Prüfung ist bei oder vor der normalisierten Risstiefe $a/W = 0,5$ und bevor die Netto-Querschnittsspannung die Dehnungsgrenze bei der Prüftemperatur erreicht zu beenden. Das Potential muss sofort vor dem Anhalten (1 bis 3 Zyklen) gemessen werden, um nach der Prüfung eine genaue Korrektur der berechneten Risstiefen zu ermöglichen. Die Probe muss nach Erfordernis thermisch verfärbt werden, um die Messung einer klar definierten abschließenden Risstiefe an der Bruchfläche zu ermöglichen. Für Prüfungen bei erhöhten Temperaturen wird empfohlen, dass die Probe mindestens auf Raumtemperatur abgekühlt wird und dass zusätzliche Zyklen mit den vorherigen Spannungsniveaus durchgeführt werden, um den Ermüdungsriß über das Ende der Prüfung hinaus zu verlängern, bevor die Spannung für den Bruch angelegt wird. Die Bruchflächen beider Hälften müssen vor weiteren Beschädigungen oder weiterem Kontakt miteinander geschützt werden.

8 Gesundheit und Sicherheit

Die Einwirkungsgrenzwerte gemäß EU-Bestimmung 93/72/EWG für Reinigungs-Lösungsmittel und für künstliche Mineralfasern, die für die Abdichtung der Ofenspalten verwendet werden, müssen eingehalten werden.

9 Bewertung der Ergebnisse

9.1 Vermessung der Probe

Falls die Rissfront visuell erkennbar ist, sind die Tiefe der Voranrisse und die abschließenden Risstiefen der Ermüdungsrisse am Ende der Prüfung zu messen. Die tatsächlichen Risstiefen werden dann verwendet, um die individuellen Risstiefen-Messungen mittels einer linearen Anpassungsmethode zu korrigieren.

9.2 Bestimmung der Riss-Wachstumsrate

Die Riss-Wachstumsrate da/dN kann wie folgt berechnet werden:

a) Polynomialmethode

In dieser Methode wird ein a Polynom zweiten Grades an $(2n + 1)$ aufeinander folgende Punkte im $a_{\text{Durchschnitt}} - N$ -Diagramm angepasst.

Das Folgende gilt:

$$a_i = b_0 + b_1 (N_{\text{eff}}) + b_2 (N_{\text{eff}})^2 \quad (11)$$

mit

$$N_{\text{eff}} = \frac{N_i - C_1}{C_2} \quad (12)$$

und

$$C_1 = \frac{N_{i-n} + N_{i+n}}{2} \quad (13)$$

$$C_2 = \frac{N_{i+n} - N_{i-n}}{2} \quad (14)$$

Die Koeffizienten b_0 , b_1 und b_2 werden mit der Methode der kleinsten Quadrate über den Bereich $a_{i-n} \leq a_i \leq a_{i+n}$ bestimmt. Der empfohlene Wert für n ist 5.

Die Riss-Wachstumsrate am Punkt N_i wird mithilfe der folgenden Gleichung bestimmt:

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = \frac{b_1}{C_2} + 2b_2 \left(\frac{N_i - C_1}{C_2^2}\right) \quad (15)$$

Der Spannungsintensitätsfaktor K wird für den Wert a_i entsprechend N_i berechnet.

Bei der Erzeugung der besten Anpassung für die $a-N$ -Daten muss die Polynom-Regression den minimalen Rest der x - und y -Reste verwenden, um die beste Anpassung zu erhalten. Nach dem Start der Prüfung passt sich die flache Progression $a-N$ -Kurve besser an eine Regression auf der Grundlage der Anpassung der kleinsten Quadrate der y -Reste an, während sich am Ende der Prüfung die steilere Progression der Kurve besser an eine Regression auf der Grundlage der x -Reste anpasst.

Eine Modifikation dieser Methode ist bei geringen Wachstumsraten ($< 10^{-5}$ mm/Zyklus) nützlich. Die verwendeten Datenpunkte werden nicht einzeln erhöht, sondern a , N Punkte mit einem wählbaren Δa -Intervall, üblicherweise die 5- bis 10-fache Auflösung der Risstiefe.

b) Sekantenmethode (Empfohlen)

In dieser Methode wird die Neigung der Linie zwischen zwei benachbarten Punkten im $a-N$ -Diagramm berechnet (siehe Bild C.2).

Das Folgende gilt:

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_i = \left(\frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i}\right) \quad (16)$$

Diese Methode führt zu größerer Datenstreuung, wenn das Δa -Intervall klein ist.

Der geometrische Mittelwert

$$a_i = \sqrt{a_i \cdot a_{i+1}} \quad (17)$$

wird für die Bestimmung des zugehörigen Spannungsintensitätsfaktors ΔK_i verwendet.

9.3 Risssschließungs-Korrektur ΔK_{eff}

Bei kleinen oder negativen R -Verhältnissen kommen die Flanken der Rissoberflächen normalerweise in Kontakt, bevor während der Entlastung die minimale Belastung erreicht ist. Daher erfährt die Risssspitze nicht das volle, angelegte ΔK , und die Riss-Wachstumsrate ist kleiner als sie für das selbe ΔK bei höheren R -Verhältnissen wäre. Falls es notwendig ist, das angelegte ΔK vom effektiven ΔK (ΔK_{eff}) zu unterscheiden, können Anpassungsmessungen verwendet werden, um die minimal erforderliche Kraft zur vollen Öffnung des Risses, F_{op} und das zugehörige K_{op} zu bestimmen. ΔK_{eff} ergibt sich dann aus:

$$\Delta K_{\text{eff}} = \Delta K - K_{\text{op}} \quad (18)$$

und kann anstelle von ΔK als Abszisse für den Graphen von da/dN über ΔK verwendet werden. Es ist wünschenswert, diese Schließung zu bestimmen, aber für die Eckanriss-Probe erfordert dies einen hohen Grad der Messgenauigkeit ($\sim \text{nm}$) und ist schwer zu erreichen.

10 Prüfungsaufzeichnung

10.1 Die Prüfungsaufzeichnung (siehe Bild C.8) muss die folgenden Informationen für jede untersuchte Probe enthalten:

- Bezug auf diese Norm;
- Werkstoffspezifizierung und Wärmebehandlung, mit Identifikation des Teils oder halbfertigen Produkts;
- Produkt von dem die Proben genommen wurden;
- Identität der Probe, Zeichnungsnummer und Bezug auf eine dokumentierte Methode der Vorbereitung;
- tabellarische Ergebnisse und Kurven von Ermüdungsriß-Wachstum und Ermüdungsriß-Wachstumsriß-Rate;
- einschließlich Modellkoeffizienten und verwendetem Modell, wo diese bestimmt wurden (siehe 10.10 und 10.11);
- für die Analyse verwendete anfängliche und abschließende Risstiefe;
- Prüftemperatur sowie jegliche Abweichung von den vorgegebenen Grenzwerten;
- Wellenform und Spannungs- oder Dehnungsverhältnis;
- Frequenz für Voranreißen und Prüfung, oder Zyklusdauer mit Haltezeiten;
- Umgebungsbedingungen einschließlich Temperatur, Medium, Druck und relative Feuchte.

Die folgenden Informationen sind oft wichtig und müssen mit aufgenommen werden:

10.2 Eine kurze Beschreibung der Prüfanlage und des Ofens, falls verwendet, und der für die Messung verwendeten Risstiefen-Messmethode, einschließlich Angaben zur Beschreibung der Genauigkeit dieser Methode.

10.3 Probe einschließlich Breite W . Zeichnungen der Probe und des verwendeten Befestigungssystems, falls andere als Proben als die aus Bild C.1 verwendet werden.

10.4 Parameter für (berechnete) Potential-Risstiefen-Messung, falls verwendet, einschließlich Messung von Vorlauf-Abstand, Strom und anfänglichem Potential bei Raumtemperatur und Prüfungstemperatur bei der anfänglichen Voranrisstiefe.

10.5 Werkstoffangaben zu Labor-Prüfungsnummer, Werkstoff-Identifizierungscode, Wärmebehandlung, Zusammensetzung, mechanischen Eigenschaften (Dehnungsgrenze bei Raumtemperatur und Prüfungstemperatur, Zugfestigkeit bei Prüfungstemperatur), Größe und Form (Blatt, Schmieden, usw.). Alle diese Angaben müssen vom Antragsteller bereitgestellt werden, so dass die Daten mit den anderen erforderlichen Werkstoffeigenschaften in Zusammenhang gebracht werden können und dass die erforderlichen Berechnungen, die R_p beinhalten, vorgenommen werden können, um die Prüfparameter vor der Prüfung zu bestimmen.

10.6 Orientierung der Rissfront relativ zur Originalkomponente, und die Lage der Kerbe relativ zur Geometrie der Komponente.

10.7 Kurze Beschreibung des Voranrisses, mit Angaben zur Kerbtiefe und -breite, Methode der Erstellung der Kerbe, sowie die Schärfe (Spitzenradius); ΔK , ΔF , R und Potential der Risstiefe " a " am Anfang und Ende des Voranrisses, Belastungs-Verminderungsrate C und die abschließende Voranriss-Frequenz. Anzahl der Zyklen bis zur Einleitung einschließen.

10.8 Die Prüfparameter enthalten ΔF und $F_{\max.}$.

10.9 Bruchoberfläche und optische Messungen. Aufzeichnungsformular mit durchschnittlichen a_K -Messungen, Kerbtiefe und abschließende Risstiefen bei 10° , 45° und 80° (oder andere verwendete Positionen (siehe Bild C.7)).

10.10 Tabellarische Ergebnisse. Das erforderliche Format ist: N , $a_{\text{Durchschnitt}}$, da/dN , ΔK , K_{max} . Verwendete Einheiten für a , N , da/dN , ΔK und K_{max} müssen dargestellt werden.

10.11 Die gängigste Darstellung der Daten ist die eines grafischen da-dN Diagramms. Seine Erstellung beinhaltet das Auftragen der Anzahl der Zyklen als Abszisse und die Risstiefe als Ordinate mit linear skalierten Achsen. Dies wird Risswachstums- oder N-Kurve genannt. Aus dieser Kurve wird die Ableitung in gleichen Abständen der Rissausbreitung (Δa) entnommen, wodurch die gängigere Kurve der Risswachstumsrate (da/dN) über logarithmischen Achsenskalierungen entsteht. Die Ergebnisse müssen grafisch dargestellt werden, mit den ΔK -Werten in zwei logarithmischen Dekaden zwischen 1 und 100, wobei da/dN in m/Zyklus im Bereich 10^{-9} bis 10^{-5} liegt.

10.12 Details jeglicher weiterer Ereignisse im Verlauf der Prüfung, die die Ergebnisse beeinflussen könnten, z.B. Riss-Unregelmäßigkeiten, Asymmetrien, Risse außerhalb der Ebene, Rissverzweigung, Scherungsansätze oder Unterbrechungen.

10.13 Beschreibung der Mikrostruktur und/oder Mikrographien; und Zeichnungen oder Fotos, die die genaue Position und Orientierung jeder Probe zeigen;

10.14 Fraktographische Untersuchung der zwei Bruchstrukturen zur Identifizierung des Einleitungsorts und zur Bestimmung jeglicher ungewöhnlicher Ursachen von Fehlern, die das Ergebnis der Prüfung ungültig werden lassen.

Anhang A (normativ)

Informationen zur Messung von Risstiefen in Eckanrissproben mit der DC— Potentialabfall-Methode

A.1 Allgemeines

Informationen zur Messung von Risstiefen in Eckanrissproben mit der DC — Potentialabfall-Methode

Für Eckanriss-Proben, in denen der Strom gleichmäßig durch die oberen und unteren Enden der Probe (entsprechend der Einbaulage in die Prüfbefestigung) eingeleitet werden kann, wird die Beziehung durch die Pickard-Formel beschrieben:

$$\frac{V}{V_{rg}} = 4a/\pi + z - 2z/\pi \times \sin^{-1} [(a^2 - z^2) / (a^2 + z^2)] \quad (19)$$

Dabei ist

- a die Risstiefe, in Millimeter vom Kontaktpunkt an abgerundeter Ecke (a , Messung - Nullpunktversatz);
- V das zugehörige Messpotential;
- V_{rg} das Referenzpotential;
- $2z$ die Trennung zwischen Potential-Messpunkten, in Millimeter

und der Stromfluss über die Rissebene ist gleichmäßig. Diese Formel ist im Grunde eine lineare Beziehung, wo die Risstiefe größer als der Drahtabstand ist. Daher muss der Drahtabstand klein gehalten werden; 0,2 mm Abstand von Draht mit 50 µm über eine 100 µm breite Kerbe erlaubt Linearität bei Risstiefen, die für hoch belastete Komponenten wie Turbinenscheiben (> 0,3 mm) relevant sind. Für etwas kürzere Risstiefen ist die nichtlineare Pickard-Formel maßgeblich. Der effektive Drahtabstand kann nur durch optische Messungen eingeschätzt werden; für die exakte Bestimmung, besonders bei kleinen Abständen (~ 0,2 mm), muss das Potential gegenüber den optischen Risstiefendaten mit der Pickard-Kurve verglichen werden, die mit verschiedenen Drahtabständen und Referenzpotentialen erzeugt wurde, und die Kurve, die am besten mit den gemessenen Daten übereinstimmt, verweist auf den in den Berechnungen zu verwendenden optimalen, effektiven Drahtabstand.

Anstelle eines analytisch abgeleiteten Ausdrucks ist es möglich, die Beziehung für so gut wie jede Probengeometrie, die in der Prüfung von Ermüdungsrisss-Wachstumsraten verwendet wird, empirisch zu entwickeln. Solche empirischen Beziehungen können vorteilhaft sein, wenn der Draht-Anbringungsort geändert werden muss. In jedem Fall müssen analytische und empirische Beziehungen experimentell mithilfe alternativer Messungen bei verschiedenen Rissgrößen im zu untersuchenden Bereich verifiziert werden (optische Messungen oder Bruchflächenmessungen nach der Prüfung). Solche Messungen müssen niedergelegt werden und können für die Korrektur der aus den Gleichungen gefolgerte Risstiefen verwendet werden.