

Laboruntersuchungen nach Korrosionsermüdung im Zusammenhang mit Schäden in Speisewasserentgasern

W.M.M. Huijbregts*, P.H. Venderbosch* und E. Kokmeijer*.

VGB Kraftwerkstechnik 72 (1992), Heft 10, pg 908-913.

* KEMA, Arnhem, The Netherlands.

Allgemeines

Eine besondere Form der Korrosion, die in niederländischen Kraftwerken viele Schwierigkeiten bereitet, ist die Spannungskorrosion in Speisewasserentgasern und Nass-dampfleitungen. An verschiedenen Stellen im Entgaser kann Rissbildung entstehen. Angenommen wird, dass die örtliche Verformung des Stahls (beim Anfahren und bei wechselnden Betriebsverhältnissen) eine wichtige Rolle bei der Rissbildung spielt [1 bis 3]. Das Problem ist auch unter dem Namen Korrosionsermüdung bekannt.

Die verschiedenen Schadensfälle lassen nicht auf einen erkennbaren Zusammenhang zwischen Rissbildung und Lage im Entgaser schließen. Die meisten Risse werden in der Nähe von Schweißstellen gefunden, sie können aber auch im Material selber festgestellt werden. In den Niederlanden widmet die Behörde für Dampfanlagen und Industrie (Stoomwezen) den Überwachungsmethoden und Reparaturen von Speisewasserentgasern viel Aufmerksamkeit [3].

Sauerstoffhaltiges, neutrales und durch CO₂-Aufnahme eventuell sogar saures Wasser wird in die Entgaser eingespeist. Das Wasser ist daher mehr oder weniger unveränderlich; eine speziell angepasste Wasseraufbereitung zur Vermeidung der Rissbildung ist nicht einsetzbar. In bestehenden Entgasern kann das Material nicht ausgewechselt werden; wichtig ist es jedoch zu bestimmen, welche Stähle und Schweißmaterialien gegen diese Art Rissbildung weniger empfindlich sind. Die Ergebnisse können dann bei Reparaturen und neuen Anlagen berücksichtigt werden.

Ziel der Untersuchung

Mit Blick auf die vorstehend genannten Schwierigkeiten wurde ein Programm mit folgenden Zielsetzungen aufgestellt:

- Bestimmung des Korrosionsmechanismus,
- Bestimmung der kritischen Werte für den mechanischen Spannungszustand (maximaler Spannungsfaktor K und ΔK),
- Erforschung der Möglichkeit, durch ändern der Wasserzusammensetzung (mehr NH₃ oder weniger O₂) das Risswachstum zu stoppen.

Versuche

Für die Untersuchung mit einer geeigneten Wasseraufbereitungsanlage wurden fünf Autoklaven installiert (VOS genannt, nach den Entwicklern Venderbosch, Van Osch und Stortelers). Bilder 1 und 2

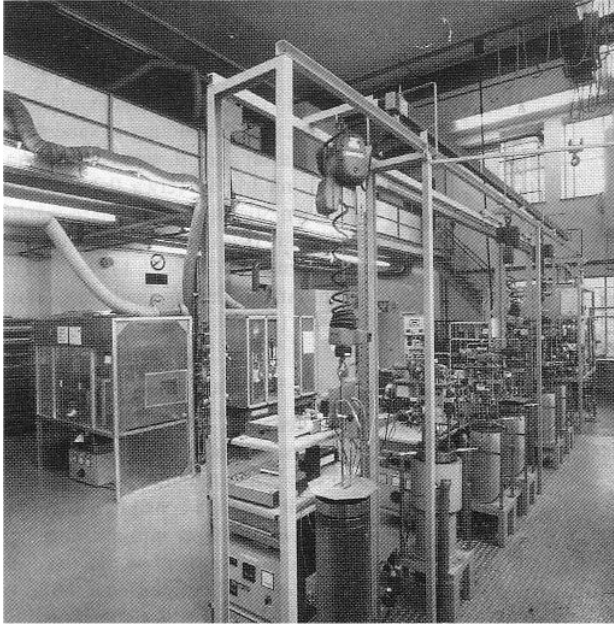


Bild 1. Die fünf Autoklaven bei der KEMA-Abteilung für Chemischen Technologie und Materialforschung.

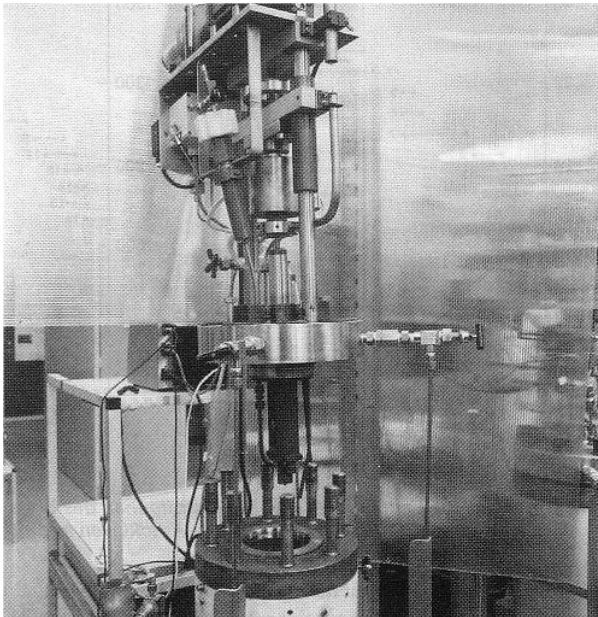


Bild 2. Ziehvorrichtung am Deckle eines der Autoklaven.

Mit der VOS-Anlage wird der erwünschte Wasserdurchfluss der Autoklaven geregelt, und zwar bei den gewählten Werten für Temperatur, Druck, Sauerstoff- und Ammoniakgehalt wie auch für die spezifische Leitfähigkeit. Der pH- Wert des Speisewassers wird aus Messungen der spezifischen Leitfähigkeit vor und hinter einem Kationenfilter errechnet.

Vier Autoklaven wurden für die Durchführung von Korrosionsermüdungsversuchen eingesetzt (LCF, Ermüdung bei niedriger Lastspielzahl „Low-Cycle Fatigue“). Der fünfte Autoklav wurde für die Durchführung von CERT- Versuchen („Constant Extension Rate Tests“) zusammengebaut, in denen Zugversuche bei einer niedrigen Deformationsgeschwindigkeit durchgeführt werden.

Proben

Die verwendeten Proben bestanden aus 17Mn4-Stahl der Zusammensetzung: 0,16% C, 0,03% S, 0,028% P und 1,02 % Mn.

In den LCF-Versuchen wurden Charpy V Proben verwendet (10 mm X 10 mm X 50 mm mit einer Kerbe von 2 mm). Vorher wurden in den Proben auf einer Ermüdungsmaschine (Typ Cracktronic) Risse angebracht.

Messung des Risswachstums

Das Risswachstum wird aus Nachgiebigkeitsmessungen ermittelt (Bild 3). Die Nachgiebigkeit bzw. die "Compliance" (C) ist das Verhältnis zwischen der Dehnung (t), der Probe und der Belastung (P). Die Dehnung wird mit einer an einem festen Punkt zwischen dem Autoklavdeckel und der Zugstange angeordneten Induktionsverschiebungs-Messzelle ermittelt (Bild 2).

Auf diese Weise wird die Nachgiebigkeit des Autoklavs und der Probe gleichzeitig ermittelt. Wenn der Nachgiebigkeitswert des Autoklavs allein (zuvor mit einer 15 mm hohen Probe von gehärtetem Stahl gemessen) vom gesamten Nachgiebigkeitswert abgezogen wird, erhält man die Nachgiebigkeit der Probe selber.

Die Abhängigkeit der Risslängen-Nachgiebigkeit wurde kalibriert mit Charpy-V Proben für verschiedene Risslängen.

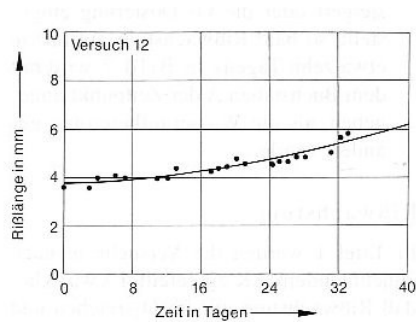


Bild 3. Risswachstum ermittelt mit Hilfe der Nachgiebigkeitsmessung

Errechnung des Spannungsintensitätsfaktors K

Für den Spannungsintensitätsfaktor K in der Rissspitze gilt [4,5]:

$$K = (3PS / (2bW^2)) * (f(a/W) (\pi \cdot a)^{1/2}) \quad (1)$$

wobei:

P = Belastung auf die Mitte der Proben in MN

S = Abstand zwischen Unterstützungspunkten (0,04 m)

b = Breite der Proben (0,01 m)

W = Stärke der Proben (0,01 m)

a = Risslänge in m

$$f(a/W) = (\pi)^{-1/2} (1,99 - Z (1 - Z) \cdot (2,15 - 3,93 Z + 2,7 Z^2)) / ((1 + 2Z) \cdot (1 - Z)^{1,5})$$

$$Z = a/W$$

Mit Hilfe der obigen Gleichung können die auszuübenden Belastungswerte P_{\max} und P_{\min} für jeden gewünschten K- Wert errechnet werden.

Bevor mit einem Versuch begonnen wird, muss die Risslänge an beiden Seiten der Probe sorgfältig gemessen werden. Die maximalen und minimalen Kräfte werden den gewünschten K-Werten angepasst. Die aufgebrachte Belastung P_{\max} darf nicht so hoch sein, dass die Probe plastisch deformiert wird. Das wird mit der folgenden Gleichung nachgeprüft:

$$1/2 P_{\max} \cdot 1/2 S < \text{Biegebeständigkeit} \times \text{Biegefestigkeit}$$

$$\text{Biegebeständigkeit} = 1/6 b(W - a)^2$$

$$\text{Biegefestigkeit} = 80\% \text{ der Zugfestigkeit } (\sigma_t)$$

$$P_{\max} < (2b(W-a)^2) / (3S) * 0.8 \sigma_t$$

Die gewählte Ermüdungsfrequenz ist 0,02 Hz.

N = Anzahl der Belastungswechsel.

Das Risswachstum da/dN ist von den ΔK - Werten abhängig

Für Kesselhersteller und zur Analyse von Schäden sind folgende Daten von Bedeutung:

- der Schwellenwert des K_{\max} , über den Risswachstum auftritt,
- die Rissgeschwindigkeit in Abhängigkeit des ΔK - Wertes

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

Die Messmethode war folgende:

Das Risswachstum wird während der Dauer des Versuches bestimmt, indem zu verschiedenen Zeitpunkten die Nachgiebigkeit gemessen wird. Bild 3 zeigt ein Beispiel für den Bereich des Risswachstums, der aus der Nachgiebigkeit für einen einzelnen Versuch errechnet wurde.

In diesem Bild wird eine ununterbrochene Linie durch die ermittelten Punkte gezogen (berechnete Polynom), worauf Rissgeschwindigkeit (da/dt und da/dN) und Risslänge für die Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren K_{\max} und K_{\min} zu verschiedenen Zeitpunkten errechnet werden (Bild 4).

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Versuche sind in Tafel 1 zusammengestellt. Die Werte für die Riss-Geschwindigkeit sind zusammen mit den ΔK - Werten in Bild 4a und 4b angegeben. Für den Vergleich ist die im ASME- XI-Code gegebene Linie für das Risswachstum auch in dieses Bild eingezeichnet.

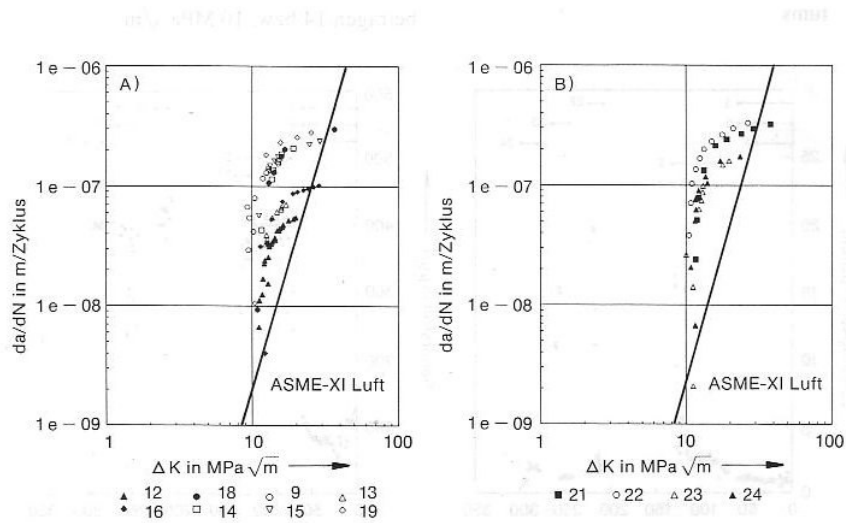


Bild 4. Ergebnisse der Versuche des Risswachstums in Ammoniak armem Wasser.
 a. Untersuchung des Korrosionsmechanismus in 250 $\mu g/L$ Sauerstoff.
 b. Stoppen des Rischwachstums, 400 $\mu g/L$ Sauerstoff.

Tafel 1 Nach zunehmendem ΔK Wert eingeteilte Versuche

Nr.	Dauer Tagen	K_{max} $MPa.m^{1/2}$	ΔK $MPa.m^{1/2}$	O_2 $\mu g/L$	NH_3 Mg/L	Risswachstum μm	
						*	**
1	40	14.1	1.3	100	0.15	0.0	0.2
2	62	14.1	2.9	400	0.17	0.0	0.1
3	60	14.3	2.9	100	0.15	0.0	0.2
4	20	14.7	5.8	2	0.15	0.0	0.0
5	60	14.1	6.5	100	0.15	0.0	0.0
6	20	12.5	9.2	360	0.16	0.0	0.4
7	66	12.8	9.7	330	0.17	0.0	0.0
8	7	12.8	9.9	300	0.18	0.0	0.0
9	17	12.2	10.0	260	0.27	1.9	1.9
10	62	13.9	11.0	200	10.0	0.0	0.4
11	80	14.3	11.3	N_2		0.0	0.0
12	33	14.1	11.3	250	0.20	1.8	2.1
13	19	14.3	11.3	275	0.17	1.4	1.9
14	7	14.7	11.6	275	0.15	1.6	2.0
15	25	14.6	11.6	250	0.18	2.7	2.6

16	46	14.6	11.7	200	0.0	2.4	2.6
17	78	14.9	12.1	200	5.0	0.0	0.2
18	15	15.3	12.2	250	0.18	3.4	3.0
19	18	15.7	12.5	200	0.0	2.1	2.1
20	24	29.2	22.9	200	0.0	2.8	2.9
21	13	14.5	11.9	400	0.2	1.1	
21	2	14.5	10.5	400	3.7	3.1	2.7
22	10	14.3	11.5	400	0.15	0.3	
22	5	14.3	11.5	400	5.0	2.5	2.5
23	13	14.5	11.5	400	0.15	0.5	
23	6	14.5	11.5	400	2.5	1.8	1.7
24	13	13.9	11.3	400	0.15	0.7	
24	5	13.9	11.3	2	0.15	1.8	2.3

* Aufgrund der Nachgiebigkeit am Ende des Versuchs gemessener Riss

** Auf beiden Seiten der Proben nach dem Versuch gemessener Riss

Bereich der Wasserzusammensetzung während der Versuche

Die Leitfähigkeit und der Sauerstoffgehalt wurden ständig festgehalten. Die Werte für Leitfähigkeit und Sauerstoffgehalt während der Zeitabschnitte sind in den Bildern 5 und 6 zusammengefasst.

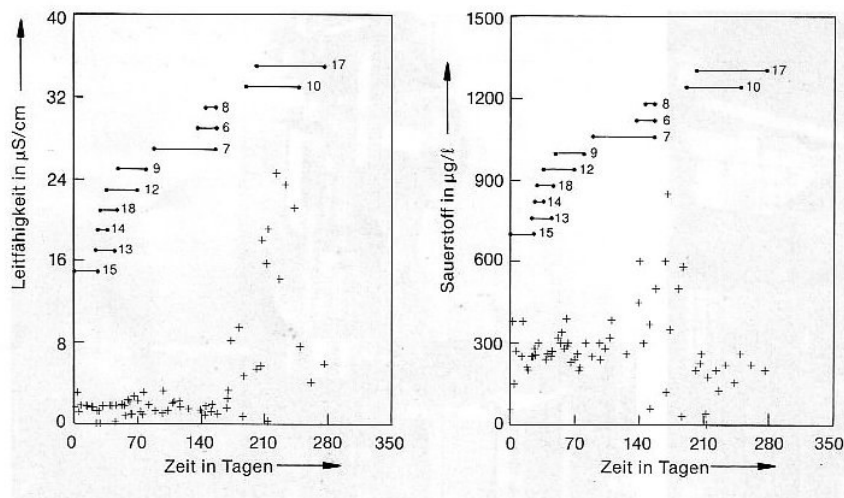


Bild 5. Spezifische Leitfähigkeit und Sauerstoffgehalt des Wassers, das während der Versuche durch die Autoklaven strömte.

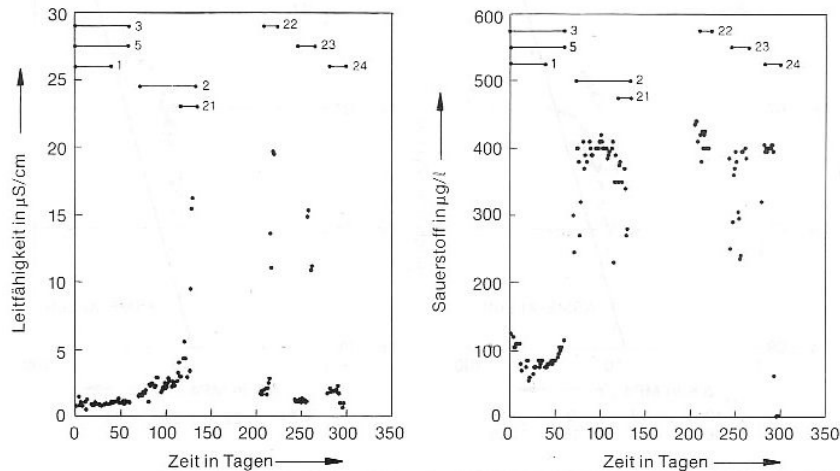


Bild 6. Spezifische Leitfähigkeit und Sauerstoffgehalt des Wassers, das während der Versuche durch die Autoklaven strömte

Die Dauer der einzelnen Versuche ist auch in diesen Bildern angegeben.

Die Versuche wurden in zwei Reihen durchgeführt:

Untersuchung nach dem Rissmechanismus

(Versuche 1 bis 20, Tafel 1): NH_3 : 0 bis 0,2 mg/L und O_2 : ca 250 $\mu\text{g/L}$.

Stopp des Risswachstums: (Versuche 21 bis 24, Tafel 1):

Einleitung der Rissbildung: NH_3 : 0 bis 0,2 mg/l und O_2 : 400 $\mu\text{g/L}$.

Verzögern und Stoppen des Risswachstums:

NH_3 : 1 mg/L und O_2 : 400 $\mu\text{g/L}$; (Versuche 21 bis 23).

NH_3 : 0,2 mg/L und O_2 : 2 $\mu\text{g/L}$; (Versuch 24).

Die Rissbildung wurde in O_2 -reichem und NH_3 -armem Wasser eingeleitet. Das Risswachstum konnte durch tägliches Überwachen der Nachgiebigkeit bestimmt werden. In einem Versuch, das Risswachstum zu verzögern oder zu stoppen, wurde die NH_3 -Dosierung gesteigert oder die O_2 -Dosierung eingestellt, so bald Risswachstum auftrat (in etwa zehn Tagen). In Bild 7 wird mit dem Buchstaben A der Zeitpunkt angegeben, als die Wasseraufbereitung geändert wurde.

Risswachstums

In Tafel 1 werden die Versuche je nach zunehmendem ΔK eingeteilt. Es war klar, dass Risswachstum nur im O_2 -reichen und NH_3 armen Wasser auftritt, wenn der Spannungsintensitätsfaktor K_{max} und ΔK kritische Werte überschreiten. Diese Werte betragen 14 bzw. 10 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Der Riss wird durch Magnetit abgedichtet, wenn der Spannungszustand nicht kritisch ist.

Aus obigem kritischem Spannungszustand geht hervor, dass Rissbildung in sauerstoffhaltigem Wasser auftritt, wenn der Ammoniakgehalt niedrig ist (etwa 0,2 mg/l). In einer inerten Stickstoffatmosphäre

wachst der Riss nicht beim selben mechanischen Spannungszustand (Versuch 11) oder wenn die Ammoniakdosierung hoch ist (Versuche 10 und 17).

Stopp des Risswachstums

Mehrere Versuche wurden durchgeführt, um zu erforschen, ob die Rissbildung durch ändern der Wasserqualität gestoppt werden kann. Hohes Risswachstum tritt auf bei einem hohen ΔK -Wert und einem hohen Sauerstoffgehalt. Versucht wurde, das Risswachstum durch Dosieren von NH_3 zu stoppen (Bild 7).

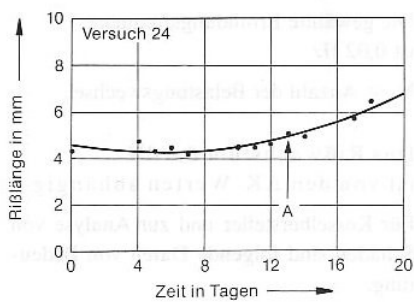
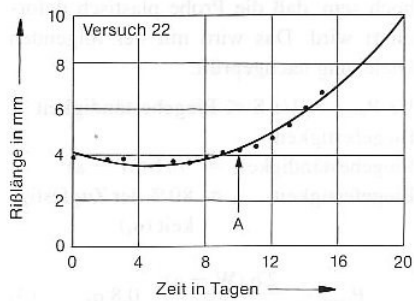
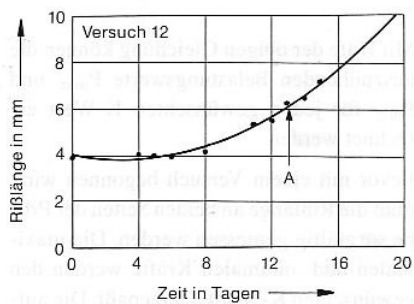


Bild 7. Risswachstum bei den Versuchen wobei versucht wurde, durch Zunahme der NH_3 Dosierung (Versuche 21 bis 23) oder Verringerung der Sauerstoff Dosierung (Versuch 24) das Wachstum zu stoppen. Das Moment der Änderung der Wasserconditionierung ist mit A angegeben.

Es stellte sich heraus, dass sich eine höhere NH_3 -Konzentration nicht auf das Risswachstum auswirkte (siehe Versuche 21 bis 23). Ebenso wenig konnte in Versuch 24 ein niedrigerer Sauerstoffgehalt die Rissbildung stoppen.

Mikroskopische Untersuchung

Mit Hilfe der Lichtmikroskopie und der Rasterelektronenmikroskopie (REM) wurden alle Proben gründlich auf Anzeichen von Korrosion hin untersucht. Alle Proben wiesen das selbe Muster der Rissbildung auf. Die Risse bestanden aus zwei Teilen:

- a) einem geraden Riss (Korrosionsermüdung), wobei auf den Seiten bzw. in der Kerbe eine besondere Form des Oxid-Wachstums auftrat (Bild 87),
- b) mehreren Verzweigungen am Ende des geraden Risses (als Folge einer wasserstoffinduzierten Versprödung). Hierbei war in der Riss-spitze plastische Deformation aufgetreten.

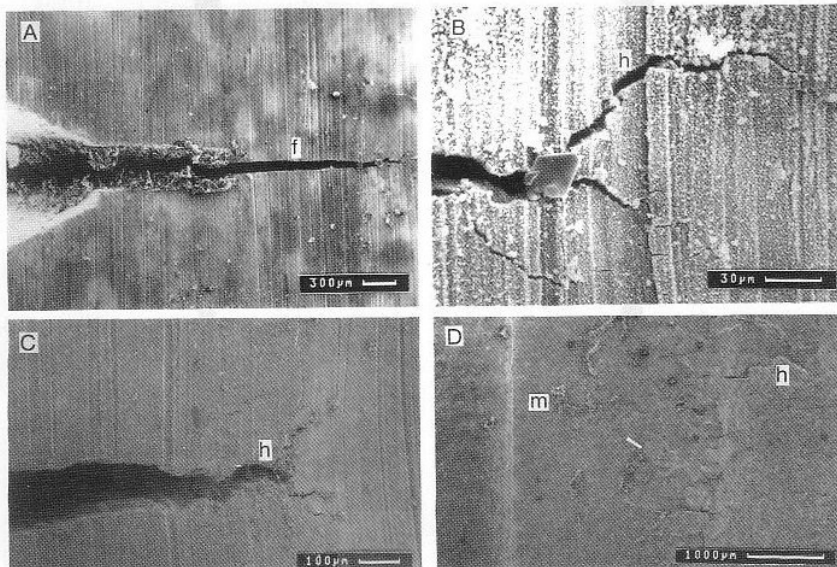


Bild 8. Mehrere Beispiele gerissener Proben. Der gerade Riss ist der Folge von Korrosionsermüdung (A,f); der verzweigte Riss ist der Folge einer wasserstoffinduzierten Versprödung (B und C). Bild D zeigt die aufgebrochene Rissfläche mit de Magnetit Stalagmite (m) und schliesslich die am typische Aufbau erkennbare wasserstoffinduzierten Versprödung.

Oft bilden sich im Riss und in der Kerbe Stalagmite aus grobem Magnetit-Oktaedern und Hämatit-Platten (Bild 9). Die plattenförmigen Hämatit-Kristalle entwickeln sich bei einem hohen Sauerstoffgehalt im Wasser.

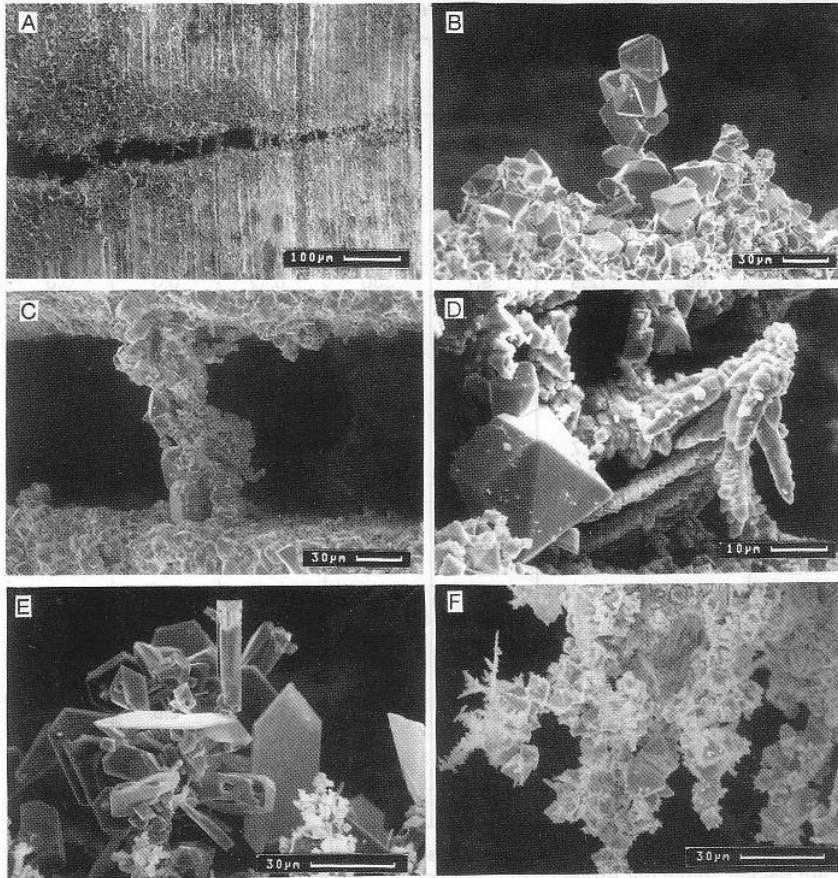


Bild 9. Im Korrosionsriss und in der Kerbe entwickeln sich oft Stalagmite aus groben Magnetit-Oktaedern und plattenförmigen Hematite (Bilder A bis D). Die plattenförmigen Hematit-Kristalle entwickeln sich bei der hohem Sauerstoffgehalt im Wasser (Bilder E und F).

Örtlich ist bei einer Konzentration von MnS-Einschlüssen oft eine zugenommene Korrosion sichtbar (Bild 10).

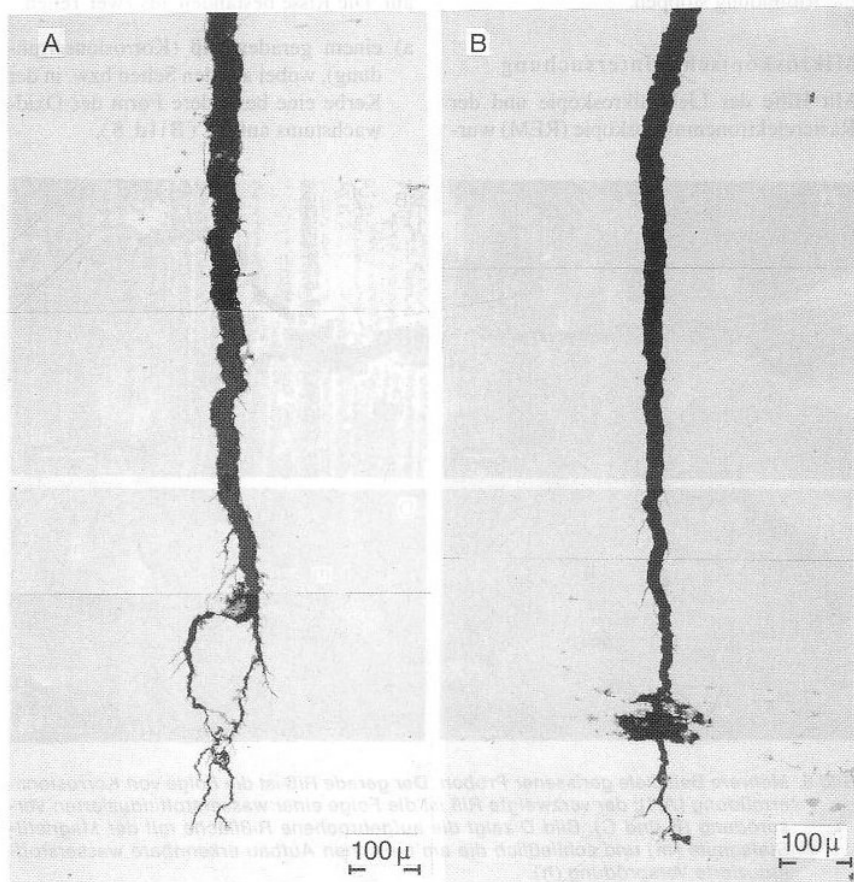


Bild 10. Querschnitte von Risse in den Versuchen 23 (A) und 24 (B). Wasserstoffinduzierten Versprödung in der Spitze entwickelt sich nach dem geraden, von Korrosionsermüdung verursachten Riss. Oft ist eine Zunahme der Korrosion bei einer Konzentration von MnS-Einschlüssen sichtbar (Bild B).

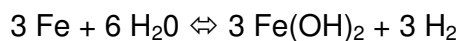
Derartige örtliche Korrosionserscheinungen werden auch in Rissen in Speisewasserentgasern gefunden und werden dann den Korrosionen während der Abschaltperioden zugeschrieben.

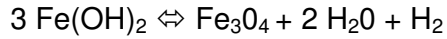
Weil die MnS-Einschlüsse im Stahl eine Rolle bei der Rissbildung spielen dürften, wurde die Schwefelverteilung auf den Riss-Seiten mittels REM und WDS („Wave length Dispersive Spectrometer“) untersucht. Es stellt sich heraus, dass der Schwefel an den Riss-Seiten verteilt ist, wenn der Riss die Sulfideinschlusszeilen schneidet.

Erörterung

Das anodische Auflösungsmodell für Risswachstum

Die Bildung der Oxidschicht an der Aussenseite der Proben lässt sich mit der einfachen Schikorr-Reaktion beschreiben:

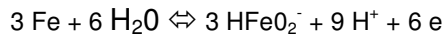




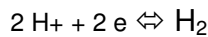
Der anfallende Wasserstoff wird mit dem Wasser mitgeführt und wird nicht in den Stahl diffundieren. Der Korrosionsvorgang im Riss und auf der Aussenfläche kann in anodische und kathodische Reaktionen unterschieden werden:

in der Risspitze:

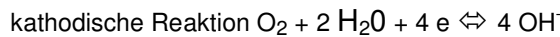
anodische Reaktionen in basischem und saurem Wasser



kathodische Reaktion

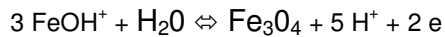


auf der Stahlfläche:



Schließlich wird das Wasser in der Riss-spitze frei von Sauerstoff werden. Es gibt einen großen Unterschied im Korrosionspotential zwischen der Äußeren Metallfläche und der Riss-spitze, was eine Folge des hohen O_2 Gehaltes im Wasser der Engaser ist. Bei einem oxidierten, nichtlegierten Stahl von 200 °C beträgt der Potentialunterschied zwischen sauerstoffreichem (200 ppb O_2) und entgastem (2 ppb O_2) Wasser etwa 450 mV [6]. Der Unterschied im Korrosionspotential zwischen einem aktiven Stahl in sauerstofffreiem Wasser und einem oxidierten Stahl in Wasser mit einem Sauerstoffgehalt von 200 ppb wird deswegen bedeutend hoher sein. Wenn die zur Verringerung des Sauerstoffgehalts führende Reaktion an der Stahlfläche die wichtigste kathodische Reaktion ist, wird die Umgebung der Riss-spitze sauer werden, und zwar weil während der anodischen Korrosionsreaktion H^+ erzeugt wird.

Das FeOH^+ oder HFeO_2^- wird aus dem Riss diffundieren und auf den Riss-Seiten und auf der Metallfläche (wo der Sauerstoffgehalt hoch und das Wasser neutral ist) weiter bis zu Magnetit-Oktaedern oxidieren, und zwar nach der unten gegebenen Reaktion:



Durch die schnelle Korrosion in der Riss-spitze (die kraftige örtliche anodische Auflösungsreaktion) zusammen mit der hohen mechanischen Belastung wird sich ein sehr scharfer, gerader „Riss“ entwickeln. Die Rissbildung kann eher als ein kraftiger elektrolytischer Auflösungsprozess denn als eine mechanische Rissbildung im Stahl betrachtet werden. *Perdieus et al* [7] haben für Spannungskorrosion unlegierter Stähle in Kohlendioxid-, Nitrat- und Hydroxidlösungen auf einen ähnlichen Mechanismus hingedeutet.

Der Einfluss von Wasserstoff

Die H^+ -Reduktionsreaktion wird zunehmend wichtiger werden, wenn die Riss-spitze sauerstofflos wird. Das wird der Fall sein, wenn im Riss eine bedeutende Säuerung auftritt, d.h., wenn der Riss bedeutend zugenommen hat. Der erzeugte atomare Wasserstoff wird einfach (gefördert durch Anwesenheit von Sulfiden) in den Stahl diffundieren können und während der vorherrschenden plastischen Deformation in der Riss-spitze eine wasserstoffinduzierte Versprödung hervorrufen. Es hat sich herausgestellt, dass dies nur in der letzten Periode des Rissbildungsvorgangs der Fall war.

Einfluss des Sauerstoffgehalts

Ziel der Entgaser ist es, Sauerstoff aus dem Wasser zu entfernen. Daher werden dort immer hohe Sauerstoffwerte vorhanden sein. Zwei ungünstige Wirkungen des Sauerstoffs, die zu Schaden führen können, sind:

- In stehenden, sauerstoffreichern Wasser entwickelt sich Lochfraß auf der Stahlfläche, von wo aus wegen der höheren Spannungskonzentration und der korrosiven Umgebung im Loch Rissbildung einfacher auftreten kann.
- Die Rissbildung erfolgt bei niedrigen Potentialen im Riss, wobei kein Sauerstoff anwesend ist. Die Löslichkeit von Fe_3O_4 ist bei einem hohen Sauerstoffgehalt niedrig [8]. Der unterschiedliche Sauerstoffgehalt in Riss-spitze und an Stahloberfläche beeinflusst die Geschwindigkeit, mit der das gelöste Eisen aus der Riss-spitze diffundiert und sich verteilt. Auf der Fläche außerhalb des Risses oxidiert dieses Eisen zu Magnetit, wobei ein hoher Konzentrationsgradient für Eisen entsteht. Hieraus lässt sich eine hohe Rissgeschwindigkeit bei einem hohen Sauerstoffgehalt im Wasser erwarten.

Pumpwirkung während Ermüdung

Als Folge der wechselnden Belastung wird das Wasser aus der Riss-spitze gepumpt. Sauerstoffhaltiges Wasser wird zur Riss-spitze getrieben. Die in der Riss-spitze angefallenen Korrosionsprodukte werden aus dem Riss verdrängt. Das korrosionsproduktthaltige Wasser wird irgendwo im Riss mit dem sauerstoffhaltigen Wasser vermischt, und an einer Stelle, wo Elektronenübertragung einfach stattfinden kann, wird sich Magnetit auf der Metallfläche niederschlagen. Die Stalagmite werden als Folge dieses wechselnden Konzentrationsgradienten gebildet.

Eine Folge dieser Pumpwirkung ist, dass die tatsächliche Transportgeschwindigkeit um das Tausendfache zunehmen kann [9]. Die Frequenz der wechselnden Belastung und des Delta K-Wertes könnte die Pumpwirkung beeinflussen und damit die Korrosionsgeschwindigkeit in der Riss-spitze.

Schlussfolgerungen

1. Die Rissbildung besteht aus zwei Phasen:
 - Korrosionsermüdung, die sich zu geraden Rissen entwickelt und
 - wasserstoffinduzierte Versprödung mit starker Verzweigung am Ende des geraden Ermüdungsrisses.
2. Für die Einleitung von Korrosionsermüdung in nicht-aufbereitetem Wasser gelten die folgenden Bedingungen:
 - ein hoher Sauerstoffgehalt im Wasser, so das in der Riss-spitze gelöstes Eisen sich draußen auf der Stahlfläche oder im breiteren, offenen Teil des Risses niederschlägt und sich ein deutlicher Konzentrationsgradient über den Verlauf des Risses entwickelt (großer Potentialunterschied über den Riss),
 - ein hoher Spannungsintensitätsfaktor $K_{max.} > 14 \text{ MPa m}^{1/2}$ in der Riss-spitze und ein hoher Wert für $\Delta K > 10 \text{ MPa m}^{1/2}$
3. Wenn Sulfide-einschlusszeilen bei der Rissbildung geschnitten werden, wird das MnS in Wasser aufgelöst. Dieser Vorgang verunreinigt die Umgebung im Riss erheblich, wodurch die darauf folgende Rissbildung beschleunigt wird.
4. Risswachstum in Wasser kann beschränkt werden, wenn die Ammoniak-Konzentration größer ist als 1 mg/L .
5. Das Risswachstum kann nicht innerhalb von fünf Tagen gestoppt werden durch
 - Erhöhen der Ammoniakdosierung von $0,2$ auf 1 mg/L
 - Verringern des Sauerstoffgehalts auf $2 \text{ } \mu\text{g/L}$.

Literatur

1. *Pastoors, JTW*: Betriebsmessungen im Zusammenhang mit Rissbildungen in Speisewassergasern. VGB KRAFTWERKSTECHNIK 69 (1989), H. 7, S. 726-730.
2. *Pastoors, JTW*: Design, Service conditions and deaerater cracking in Dutch utility boiler. The 1990 International Joint Power Generation Conference, Boston, Massachusetts, October 21 to 25, 1990. Proceedings part: PWR 12 (1990), pp. 57-63.
3. *Lenz, E, und Wieling, N.*: Mediumseitige Einflussgrösse bei der dehnungsinduzierten Risskorrosion und Beispiele für anwendungsbezogene Fälle. V GB KRAFTWERKSTECHNIK 66 (1986), H. 5.
4. ASTM-E399-83-A3: Standard Test Methode for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials.
5. *Lange, H.*: Rissausbreitung in Stahl 316L bei erhöhter Temperatur unter statischer und zyklischer Belastung. Report KfK 4823, Januar 1991.
6. *van Osch, G.A.A., and Huijbrechts, W.M.M.*: Corrosion Potential Measurements in Boiler Water: The Influence of Oxygen Content. Corrosion 42 (1986), No.2.
7. *Perdieus, E., Brahers, M., and van Haute, A.*: A mechanism for stress corrosion cracking of carbon steel in hot carbonate, hydroxide and nitrate solutions. Conference on mechanisms of environmental cracking of materials. Metals Society (1987).
8. *Venderhosch, H. W.*: The solubility of magnetite in water. Kema Scientific & Technical Reports 3 (1985), No. 12.
9. *van der Wekken, C.J.*: Flow enhanced diffusion transport in corrosion fatigue cracks (1988). Proceedings of the first International Conference on Environmental-Induced Cracking of Metals, R.P. Gangloff and M.B. Ives, Editors, p. 197, MACE, Houston, Texas (1990).