

Thema: Gefügeuntersuchungen (Replica-Technik)

- Bauteilmetallografie
- Vorteile und Grenzen des Verfahrens
- Beurteilung des Gefüges

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung
2. Metallkundliche Grundlagen
3. Restlebensdauer
4. Gefügeabdrucktechnik
 - 4.1 Praktische Durchführung
 - 4.2 Bewertungskriterien
 - 4.3 Vorteile und Grenzen des Verfahrens
 - 4.4 Beispiele aus der Praxis
5. Zusammenfassung

1. Einleitung

Metallografische Gefügeuntersuchungen sind ein verbreitetes Verfahren, um den Mikro- und Makrogefügezustand eines Werkstoffes darzustellen. Mit ihrer Hilfe sind vielfältige Aussagen über den Werkstoff möglich, z.B. bzgl. der vorliegenden Gefügebestandteile und damit über die Korngröße, die Wärmebehandlung, die Kaltverformung usw. Die wesentlichen Anwendungsbereiche sind dementsprechend die Qualitätssicherung und die Schadensaufklärung. Ein Nachteil der "normalen" Metallografie ist es, daß sie nicht zerstörungsfrei ist und nur schlecht vor Ort eingesetzt werden kann. Es gibt jedoch ein metallografisches Sonderverfahren, das diesen Nachteil nicht hat. Dies ist die Replica-Technik, die vom RWTtJV weiterentwickelt, als sogenannte Bauteilmetallografie angewendet wird. Dieses Verfahren ist seit einigen Jahren aktuell und besonders geeignet für die Beurteilung von kriechbeanspruchten Bauteilen wie sie in Kraftwerken vorliegen.

2. Metallkundliche Grundlagen

Zum Verständnis der Grundlagen, auf denen die Aussagen der Replica-Abdrücke beruhen, ist ein kleiner Ausflug in die Metallkunde nötig.

In deutschen Kraftwerken werden im wesentlichen die niedriglegierten warmfesten Stähle nach DIN 17155 und 17175 wie z.B. 15 Mo 3, 14 Mo V 63, 13 CrMo 44, 10 CrMo 9 10 sowie der hochlegierte Stahl X20 CrMo V 12 1 eingesetzt. Diese Stähle werden so hergestellt, daß sie eine möglichst hohe Warmfestigkeit und einen möglichst hohen Kriechwiderstand besitzen. (Unter Kriechen versteht man die plastische Dehnung des Werkstoffes im Hochtemperaturbereich, die im Gegensatz zum Fließen bzw. der plastischen Dehnung bei niedrigen Temperaturen schon unterhalb der Streckgrenze auftritt). Dies geschieht durch Zugabe von Legierungselementen und eine geeignete Wärmebehandlung. So bewirkt das Mo eine Erhöhung des Kriechwiderstandes durch Mischkristallverfestigung. In der gleichen Richtung wirkt es, wie auch das Cr (Zunderbeständigkeit) und Vanadium

durch Karbidbildung. Durch die Wärmebehandlung wird der Anteil der Legierungselemente, die ausgeschieden bzw. in Lösung sind sowie die Menge und Verteilung der Ausscheidungen festgelegt. Die meisten ferritischen warmfesten Stähle werden vergütet, so daß i.a ein Gefüge aus Ferrit und Bainit (und submikroskopischen Karbiden) vorliegt.

Im Kraftwerk werden die warmfesten Stähle i.a. im Zeitstandbereich betrieben, d.h. unter Bedingungen, unter denen die Werkstoffeigenschaften, z.B. die Festigkeit, zeitabhängig werden. Die Ursache dafür ist, daß die Stähle in ihrem Ausgangszustand nicht in thermodynamischen Gleichgewicht vorliegen, sondern in einem Zustand erhöhter innerer Energie. Bei den hohen Einsatztemperaturen (i.a. $T > 500^{\circ}\text{C}$) werden nun Diffusionsprozesse möglich, deren Triebkraft die Erniedrigung dieser Energie darstellt. Diese Diffusionsvorgänge werden nach gewisser Zeit auch durch Veränderungen des Mikrogefüges sichtbar als

- Einformung des Bainits
 - Bildung und Wachstum von Karbiden
 - Bildung und Wachstum von Poren
- } reversible Schädigung
- } irreversible Schädigung

Die Aufgaben der Bauteilmetallografie besteht nun darin, diese Gefügeveränderungen nachzuweisen und damit eine Aussage über den Zustand des Werkstoffes bzw. Bauteils zu ermöglichen.

3. Restlebensdauer

Für Kraftwerksbetreiber ist die Abschätzung der Restlebensdauer kriechbeanspruchter Bauteile von besonderem Interesse. Die Restlebensdauer ist definiert als die im Zeitstandversuch an betriebsbeanspruchtem Material ermittelte Meßgröße, d.h. Bruchzeit oder Zeit bis zum Erreichen einer gewissen Dehnung. In erster Näherung ist darunter die Zeit zu verstehen, die ein im Betrieb befindliches Bauteil unter gleichen Bedingungen noch weiter in Betrieb bleiben kann, ohne daß ein Schaden auftritt. Ihre Bestimmung ist u.a. deshalb nötig, weil die Bauteile bei der Auslegung gegen die untere Grenze des Zeitstandstreubandes dimensioniert werden. Dies kann zu erheblichen Lebensdauerreserven führen, s. Abb. 1.

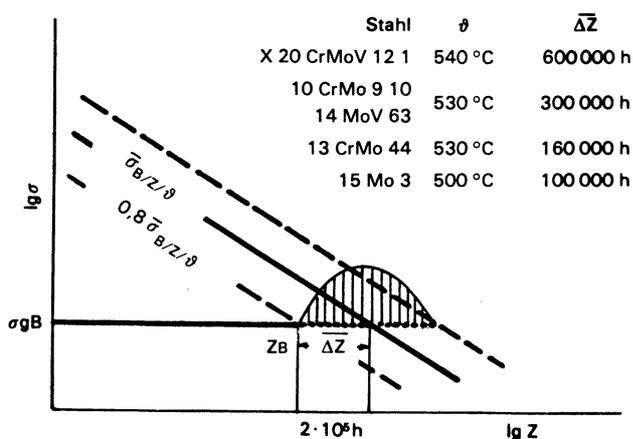


Bild 1. Mittlere noch verfügbare Lebensdauer ΔZ nach TRD 508: $Z_B = 2 \cdot 10^5 \text{ h}$, $e = 100\%$.

Abb. 1:
Mittlere noch verfügbare Lebensdauer ΔZ nach TRD 508:
 $Z_B = 2 \cdot 10^5 \text{ h}$, $e = 100\%$

Die Ausnutzung dieser Reserven ist von großem wirtschaftlichen Interesse. Andererseits ist durch kaum vorhersehbare Zusatzbeanspruchungen (z.B. behinderter Wärmedehnung) ein vorzeitiges Versagen von Bauteilen möglich.

Sowohl in Fällen verlängerter als auch verkürzter Lebensdauer stellen Gefügeabdrücke ein wichtiges Hilfsmittel bei der Beurteilung kriechbeanspruchter Bauteile dar.

4. Die Gefügeabdrucktechnik

4.1 Praktische Durchführung

Die praktische Durchführung des Verfahrens erfolgt in mehreren Schritten:

- a) Oberflächenvorbereitung: Abschleifen der Oxidschicht
- b) Vorätzung: Darstellung des Makrogefüges, z.B. mit 3%iger HNO₃ um die Abdrücke optimal plazieren zu können, z.B. im Falle von Schweißnähten.
- c) Elektrolytisches (mechanisches) Polieren: möglichst weitgehende Einebnung der Oberfläche zur Erzielung optimaler Replicas
- d) Ätzung: Darstellung des Mikrogefüges, z.B. mit 3%iger HNO₃
- e) Gefügeabdruck-Entnahme

Das Prinzip des Gefügeabdrucks geht aus Abb.2 hervor:



Abb. 2: Prinzip des Gefügeabdrucks

Dazu wird eine Folie aus organischem Material, z.B. Bienenwachs, mit Lösungsmittel aufgeweicht und mit Hilfe einer Pinzette auf die vorbereitete Stelle gelegt. Danach wird sie getrocknet, wieder abgezogen und auf einem Objektträger fixiert. Der Abdruckdurchmesser beträgt bei elektrolytischer Polierung 5mm. Pro Folie können gleichzeitig mehrere Abdrücke genommen werden.

- f) Gefügeabdruckbeurteilung

Der Gefügeabdruck kann direkt im Lichtmikroskop, z.B. bei $V = 200\times$, beurteilt werden. Zur Kontrastverstärkung wird er jedoch i.a. mit Gold besputtert. Derartig behandelte Gefügeabdrücke können auch bei höherer Vergrößerung im Rasterelektronenmikroskop betrachtet werden.

4.2 Bewertungskriterien

Bei der Auswertung ist darauf zu achten, daß die Abdrücke ein negatives Abbild der Bauteiloberfläche erzeugen, d.h. Poren und Risse werden als Erhebungen, Karbide als Vertiefungen sichtbar.



Abb. 3:
Auflösungsvermögen von
Gefügeabdrücken

Das Auflösungsvermögen des Verfahrens kann anhand von Abb. 3 abgeschätzt werden. Durch Vergleich mit dem Schliff erkennt man, daß noch Karbide der Größenordnung 0,1µm repliziert werden. Grundlage für die Bewertung kriechbeanspruchter Bauteile bilden die bereits erwähnten Poren, die sich ab einem bestimmten Zeitpunkt der Lebensdauer bilden. Dabei treten zunächst einzelne Poren auf den Korngrenzen, meist an Tripelpunkten oder Ausscheidungen auf.

Im weiteren Verlauf wachsen diese Poren während sich gleichzeitig neue bilden. Später orientieren sich die Poren senkrecht zur Hauptspannungsrichtung, wachsen dann zusammen um Mikrorisse zu bilden, die schließlich zu Makrorissen werden und so den Bruch des Bauteils einleiten.

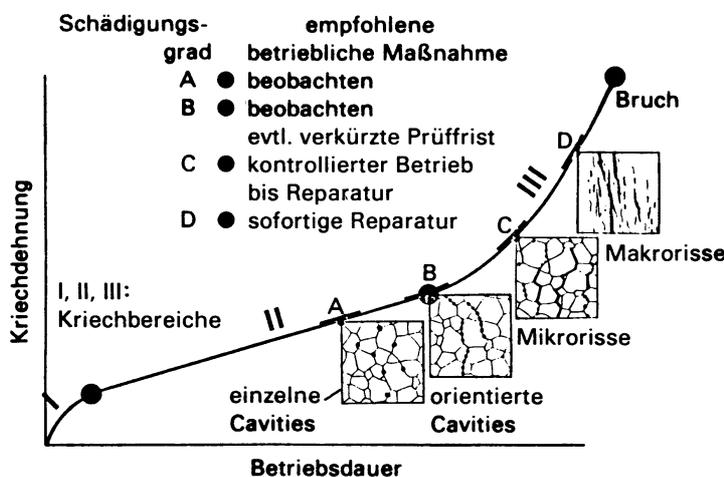


Abb. 4:
Schematische Darstellung von Porenschädigungen (mit Bewertungsklassen) und Kriechkurve

In Abb. 4 sind diese Vorgänge schematische dargestellt. Weiterhin geht daraus ein Zusammenhang zwischen der Kriechkurve des Werkstoffes und der Porenschädigung hervor. Dieser Zusammenhang ist leider abhängig vom Werkstoff und von den Beanspruchungsbedingungen, so daß aus dem gleichen Porenbild nicht auf die gleiche Restlebensdauer geschlossen werden kann. Aufgrund der Erfahrungen, die der RWTÜV in den letzten 8 Jahren bei der Entnahme von mehr als 8000 Gefügeabdrücken gesammelt hat, sind die ebenfalls in Abb. 4 aufgenommenen empfohlenen betrieblichen Maßnahmen entstanden. Die vorhandene Gefügeabdruck-Datei wird zur Zeit statistisch ausgewertet, um genauere Aussagen machen zu können. Eine Vorauswertung von Schweißnähten und Rohrbögen zeigt Abb. 5.

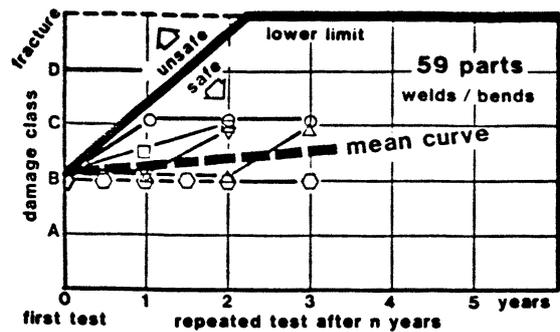
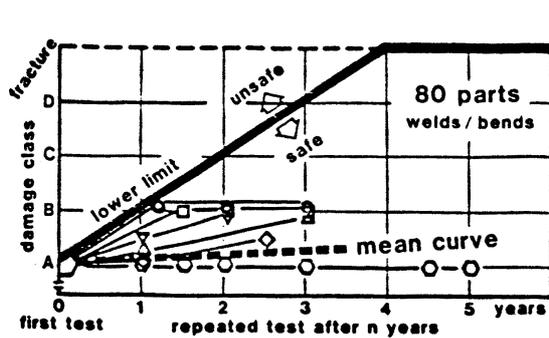


Abb. 5: Schädigungsfortschritt an kriechbeanspruchten Bauteilen

4.3 Vorteile und Grenzen des Verfahrens

Das Replica-Verfahren hat folgende Vorteile

- es ist vor Ort schnell durchführbar (und auswertbar);
- es ist relativ einfach und billig;
- es ist praktisch zerstörungsfrei (keine Schweißreparaturen und Wärmebehandlungen)
- es hat ein hohes Auflösungsvermögen ($< 1 \mu\text{m}$, und man ist damit in der Lage, Zeitstandschäden im Frühstadium zu erkennen);
- es gibt den Istzustand des Bauteils wieder (entsprechend der Beanspruchung und unabhängig von der Berechnung);
- es beinhaltet die Dokumentation;

und Grenzen

- es sind nur kleinflächige Prüfungen möglich, d.h. die aussagefähigen Abdruckorte müssen aufgrund von betrieblichen Erfahrungen und Erkenntnissen aus Schadensfällen festgelegt werden;
- es sind nur Oberflächenuntersuchungen möglich.

4.4 Beispiele aus der Praxis

An dieser Stelle werden anhand einer Reihe von Dias Replicas von kriechgeschädigten Werkstoffen sowie aus anderen Anwendungsgebieten gezeigt.

5. Zusammenfassung

Kriechbeanspruchte Werkstoffe bilden unter Kraftwerksbedingungen Mikroporen, die später zu Mikro- und Makrorissen führen und damit den Bruch des Bauteils einleiten. Aufgrund seiner Erfahrung ist der RWTÜV in der Lage, anhand des Porenbildes (Mikrogefüge) des Bauteils eine Abschätzung der Restlebensdauer durchzuführen. Die Information dafür wird mit Hilfe einer weiterentwickelten Replica-Technik (Bauteilmetallografie) praktisch zerstörungsfrei am Bauteil entnommen. Die Qualität der Replicas ist der von Original-Schliffen praktische ebenbürtig. Damit steht eine geeignete Methode zur Verfügung, Zeitstandschäden im Frühstadium zu erkennen.

Besondere Anwendung findet das Verfahren bei hochbeanspruchten Bauteilen, die im Kriechbereich betrieben werden.

Die Vorteile und Grenzen des Verfahrens werden aufgeführt.