

WARMFESTE STÄHLE IN KRAFTWERKEN

Hauptanwendungsgebiete von warmfesten und hochwarmfesten Stählen sind Energieversorgung, Chemische Industrie und Flugturbinenbau. Ferritische warmfeste Stähle finden ihr Haupteinsatzgebiet im Bereich konventioneller Kraftwerke. Dort war die Problematik der Restlebensdauerbestimmung von kriechbeanspruchten Bauteilen in den letzten Jahren besonders aktuell.

Im Rahmen der vorgeschriebenen Entschwefelungs-, Entstickungs- und Entstaubungsmaßnahmen mußten die vorhandenen Kraftwerke mit REA (Rauchgasentschwefelungsanlagen), DeNox- (Entstickungs-) und Entstaubungs-Anlagen ausgerüstet werden. Dies waren hohe Investitionen, für deren Abschreibung die Anlagen zehn bis 15 Jahre weiterbetrieben werden mußten. Um entscheiden zu können, ob die alten Anlagen weiterbetrieben werden konnten oder neue gebaut werden mußten, wurden Angaben über die voraussichtliche Restlebensdauer benötigt.

Unter Kriechbedingungen betriebene Bauteile haben grundsätzlich eine begrenzte Lebensdauer. Als Restlebensdauer bezeichnet man die Zeit, die ein Bauteil nach einem betrieblichen Einsatz unter gleichen Bedingungen weiter in Betrieb bleiben könnte, ohne daß ein Schaden auftritt. Die Abschätzung der Restlebensdauer von kriechbeanspruchten Bauteilen ist mit Hilfe verschiedener zerstörender und zerstörungsfreier Prüfverfahren möglich. Im folgenden wird auf zwei der gebräuchlichsten, nämlich die Gefügeabdruck-(Replica)-Technik als zerstörungsfreies und die Isostress- Technik als zerstörendes Prüfverfahren eingegangen. Zum besseren Verständnis dieser Verfahren werden jedoch zunächst einige metallkundliche Grundlagen der warmfesten Stähle erläutert.

Der Zeitstandversuch

Warmfeste Stähle werden im Temperatur-Bereich oberhalb 450 °C eingesetzt. Bei diesen Temperaturen ($T > 0,4 T_s$) sind die Festigkeitskenn-

Dr.-Ing. Horst Heinrich, Jahrgang 1952, studierte Werkstofftechnik an der FH Dortmund und der TU Berlin. Seit 1981 beim RW-TÜV in Essen, ist er dort heute als Sachverständiger tätig und wird im März 1992 als Professor für Werkstoffkunde an die FH Regensburg wechseln.

werte, wie man sie aus dem Zugversuch kennt, nicht mehr gültig. Die Ursache dafür sind Erholungsvorgänge. Durch thermische Aktivierung kommt es unter der anliegenden Spannung zum Klettern von Versetzungen, bei stark erhöhter Temperatur auch zum Kornengrenzgleiten. Ohne thermische Aktivierung können sich Versetzungen nur in Richtung ihres Burgers-Vektors bewegen. Durch thermische Aktivierung ist dies auch senkrecht dazu möglich (Leerstellendiffusion). Das führt dazu, daß bei erhöhten Temperaturen plastische Verformungen bei sehr geringen Spannungen weiter gehen können, wo

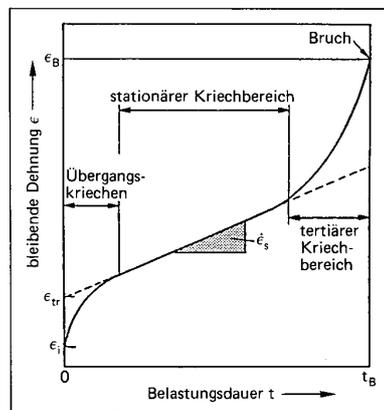


Bild 1. Kriechkurve: Verlauf der Dehnung in Abhängigkeit von der Zeit; gemessen wird die Zeit bis zu einer vorgegebenen plastischen Dehnung sowie die Zeit bis zum Bruch.

sie bei tieferen Temperaturen durch Verfestigung zum Stillstand kommen. Daraus folgt, daß bei $T > 0,4 T_s$ ein anderer Verformungsmechanismus wirksam wird. Man spricht vom Kriechen.

Im Bereich des Kriechens werden die Festigkeitskennwerte zeitabhängig! Demzufolge ist der normale Zugversuch zur Bestimmung der Zeitstandeigenschaften ungeeignet. Deshalb werden andere Versuche benötigt, um Zeitstandkennwerte, d.h. Festigkeitskennwerte im Bereich hoher Temperaturen und langer Zeiten, zu ermitteln. Dies sind die Zeitstand-Versuche. Dabei wird die Probe in einem Ofen bei konstanter Temperatur und Spannung belastet. Gemessen wird die Zeit bis zu einer vorgegebenen plastischen Dehnung (z.B. 1%) sowie die Zeit bis zum Bruch. Die so ermittelten Werte werden als Zeitdehngrenzen oder Zeitstandwerte bezeichnet. Dabei zeigt der Verlauf der Dehnung in Abhängigkeit von der Zeit, die Kriechkurve in Bild 1, einen charakteristischen Verlauf [1].

Die Kriechkurve

Die Kriechkurve kann in drei Bereiche unterteilt werden, in denen die im folgenden beschriebenen metallkundlichen Vorgänge ablaufen:

I. Primäres Kriechen: Nach Aufbringen der Last kommt es mit steigender Verformung zur Ausbildung eines Versetzungsnetzwerkes. Dadurch nimmt die anfänglich hohe Kriechgeschwindigkeit ab, bis sich eine konstante, minimale Kriechgeschwindigkeit einstellt. In diesem Punkt beginnt das

II. Sekundäres Kriechen: Der in diesem Bereich im Idealfall lineare Verlauf der Kriechkurve (konstante Kriechgeschwindigkeit = stationäres Kriechen) kommt durch die Überlagerung der Bildung weiterer Versetzungen mit Erholungsvorgängen zustande. Gleichzeitig kommt es (zur Neubildung und) zur Vergrößerung der vorhandenen Karbide, was zum Erweichen des Werkstoffes (thermal softening) führt. Ein weiterer für das Kriechen typischer Vorgang, der während des stationären Kriechens beginnt, ist die Bildung von Kriechporen (cavities). Ursache dafür ist die Diffusion von Leerstellen, bevorzugt in der Nähe von Ausscheidungsteilchen, in die Korngrenze [2].

III. Tertiäres Kriechen: Der Bereich des tertiären Kriechens ist durch eine ständige Zunahme der Kriechgeschwindigkeit gekennzeichnet. Diese kommt zum einen durch zunehmendes 'thermal softening', aber auch durch Abnahme des tragenden Querschnittes durch Dehnung und Kriechporenbildung zustande. In der gleichen Richtung wirken auch Oxidation und Abkohlung der Randschichten bei Versuchen ohne Schutzgas. Das Zusammenwachsen der Kriechporen führt dann schließlich zu Mikrorissen und später zum endgültigen Kriechbruch.

Die für Berechnungszwecke nötigen Zeitstandfestigkeits- oder Zeitdehnwerte erhält man aus den Zeitstandkurven (Zeitstandisothermen). Dazu werden Kriechkurven bei konstanter Temperatur und unterschiedlichen Spannungen ermittelt, Bild 2. Die Zeiten bis zum Bruch oder bis zum Erreichen einer bestimmten Dehnung wird anschließend in einem doppelt logarithmischen Diagramm in Abhängigkeit von der Spannung aufgetragen [3].

Aus der Zeitstandkurve kann dann bei der gegebenen Temperatur zur gewünschten Betriebszeit die maximal mögliche Spannung abgelesen werden.

Warmfeste Stähle

Bild 3 zeigt verschiedene Gruppen warmfester, kriechbeständiger Stähle sowie deren 100 000-h-Zeitstandfestig-

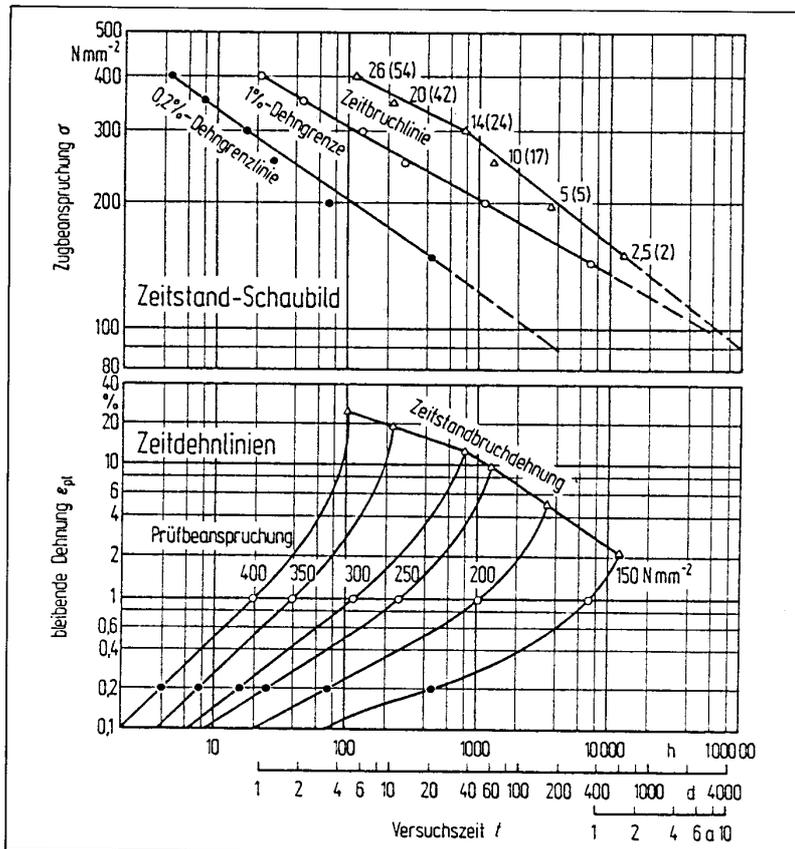


Bild 2. Oben: Die für Berechnungszwecke notwendigen Zeitstandfestigkeits- oder Zeitdehn-Werte erhält man aus den Zeitstandkurven (Zeitstandisothermen). Dazu werden Kriechkurven bei unterschiedlichen Spannungen und konstanter Temperatur ermittelt (im Bild unten).

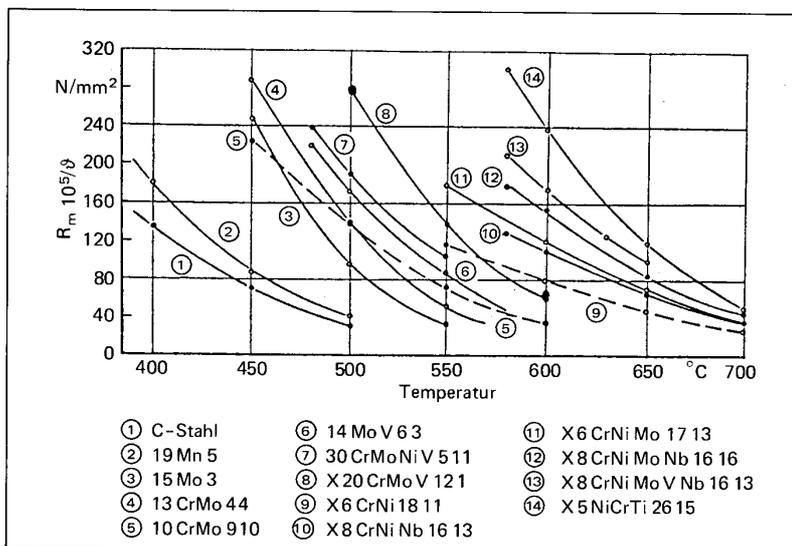


Bild 3. 100 000-h-Zeitstandverhalten verschiedener warmfester Stähle in Abhängigkeit von der Temperatur.

keit ($R_m 10^{5/9}$) in Abhängigkeit von der Temperatur [4].

Die in fossil beheizten Kraftwerken eingesetzten Werkstoffe sind im mittleren Teil der Abbildung zu finden. Es handelt sich um die Stähle 15 Mo 3, 14 Mo V 6 3, 13 Cr Mo 4 4 und 10 Cr Mo 9 10. Aus den Werkstoffbezeichnungen läßt sich entnehmen, daß die Hauptlegierungselemente Chrom,

Molybdän und Vanadium sind. Diese Elemente sind typische Karbidbildner. Molybdän wirkt zusätzlich durch Mischkristallverfestigung. Die Wärmebehandlung dieser Stähle ist für ihre Gebrauchseigenschaften genauso wichtig wie ihre chemische Zusammensetzung. Für die genannten Stähle ist diese Wärmebehandlung eine Vergütung, d.h. ein Härten mit nachfolgenden

dem Anlassen. Sie wird so durchgeführt, daß sich ein Gefüge aus (oberem) Bainit und Ferrit einstellt, in dem submikroskopische (Sonder)Karbide der oben genannten Karbidbildner in geeigneter Größe, Form und Verteilung vorliegen. Bei einer Teilchengröße $\leq 0,01 \mu\text{m}$ und einem Teilchenabstand $\leq 0,1 \mu\text{m}$ findet man einen optimalen Kriechwiderstand.

An dieser Stelle ist noch zu erwähnen, daß der ebenfalls ferritische, jedoch höher legierte Stahl X20 Cr Mo V 12 1 zur Zeit sehr häufig im konventionellen Kraftwerksbau eingesetzt wird. Aufgrund seines höheren Cr-Anteiles liegt er in einem anderen Gefügestand vor (angelasener Martensit). Dadurch weist er einen höheren Kriechwiderstand auf und bildet damit den Übergang zu den austenitischen Stählen (Bild 3). Diese haben aufgrund ihrer Gitterstruktur (kfz) den Vorteil gegenüber dem krz-Gitter, daß der Diffusionskoeffizient um etwa drei Größenordnungen geringer ist. Da, wie oben erläutert, das Kriechen auf Diffusionsvorgängen beruht, folgt daraus die aus Bild 3 ersichtliche höhere Warmfestigkeit der Austenite gegenüber den Ferriten.

Auslegung kriechbeanspruchter Bauteile

Bei der Auslegung von kriechbeanspruchten Bauteilen werden die im Zeitstandversuch ermittelten Kennwerte zugrundegelegt. Die materialbedingte Streuung der so ermittelten Zeitstandwerte ist jedoch relativ groß. Sie beträgt $\pm 20\%$, Bild 4.

Aus Sicherheitsgründen wird bei der Dimensionierung immer mit dem unteren Streubandwert gerechnet. In Bild 4 ist dargestellt, daß die wahre Lebensdauer mehrere 100 000 h (1 Jahr rd. 8 800 h) oberhalb der rechnerisch ermittelten liegen kann [5]. Weitere Unsicherheiten erwachsen aus den vor allem bei älteren Kraftwerken oft nicht genau bekannten Spannungen und Temperaturen, die der Werkstoff ertragen mußte. Den großen Einfluß selbst relativ geringer Änderungen von Temperatur oder Spannung zeigt Bild 5.

Die in Bild 4 und 5 wiedergegebenen Zusammenhänge zeigen die Notwendigkeit einer Restlebensdauerabschätzung, die auf dem realen Zustand des Werkstoffes basiert. Ziel ist dabei sowohl die Ausnutzung der Bauteile über die berechnete Lebensdauer hinaus als auch das Erkennen von vorzeitigen Schäden infolge Überbeanspruchung (Spannung, Temperatur) oder von Materialfehlern (Risse, Wärmebehandlung).

Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Zur Überprüfung von kriechbeanspruchten Bauteilen werden verschiedene zerstörungsfreie und zerstörende Untersuchungsmethoden eingesetzt [6]. Bild 6 zeigt die zerstörungsfreien Prüfverfahren und ihr Auflösungsvermögen.

Es ist zu erkennen, daß die Replikatechnik das mit Abstand größte Auflösungsvermögen aufweist und damit als

einziges zerstörungsfreies Prüfverfahren für eine längerfristige (mehrere Jahre) Restlebensdaueranalyse eingesetzt werden kann [7].

Das Verfahren bietet die Möglichkeit, den Ist-Zustand des Werkstoffes anhand seines Mikrogefüges zu beurteilen. Hauptgrundlage der Entscheidung ist dabei das Porenbild. Der Einsatz dieses Verfahrens ist deshalb möglich, weil unter Kriechbedingungen die Schädigung an der Außenoberfläche des Bauteils beginnt (Spannungsumlagerung, [8]).

Die Replika-Entnahme erfolgt während einer Revision direkt am Bauteil. Dazu wird die bei den hohen Betriebstemperaturen immer vorhandene Zunderschicht abgeschliffen und das blanke Metall dann feingeschliffen, (elektro-)poliert und geätzt. Auf die so vorbereitete Oberfläche wird eine dünne Kunststoffolie (z.B. Bioden) aufgebracht. Die Folie wird vorher in einem Lösungsmittel angelöst, so daß sich das Folienmaterial den Oberflächenkonturen sehr genau anpassen kann. Nachdem die Folie getrocknet ist, wird sie mit einer Pinzette abgezogen und auf einem Objektträger befestigt. Man erhält so ein Negativ der Bauteiloberfläche, das man im Mikroskop untersuchen kann.

Zur Erzielung eines höheren Kontrastes und/oder bei Untersuchung im Raster-Elektronenmikroskop wird die Folie mit Gold bedampft. Das Prinzip des Verfahrens zeigt Bild 7. Bild 8 zeigt die Qualität, die heute mit der Gefügeabdrucktechnik erreicht werden kann [5].

Zur Auswertung sei noch einmal auf die oben beschriebenen metallkundlichen Grundlagen verwiesen. Im Kriechbereich betriebene Bauteile durchlaufen während ihrer Lebensdauer eine Kriechkurve, Bilder 1 und 2. Werden Kriechversuche an Zugproben unter Laborbedingungen durchgeführt, so können die Versuche zu bestimmten Zeiten unterbrochen und mit Hilfe von Gefügeabdrücken die Gefügeänderungen, insbesondere der Fortschritt bei Porenbildung und -wachstum, verfolgt werden (Einprobentechnik). Damit ist eine Zuordnung zwischen der Kriechkurve und dem Porenbild sowie zwischen Porenbild und Restlebensdauer möglich, wie in Bild 9 wiedergegeben [5].

Zur Vereinfachung der Beschreibung des Porenbildes wurden Schädigungsklassen eingeführt. In Abhängigkeit von der gefundenen Schädigungsklasse werden Maßnahmen ergriffen, die von der weiteren Beobachtung bis zur sofortigen Reparatur oder zum Ausbau des Bauteils reichen.

In Bild 9 sind den verschiedenen Schädigungsklassen Bereiche auf der Kriechkurve zugeordnet. Damit soll angedeutet werden, daß jeder Werkstoff, auch wieder abhängig von Temperatur und Spannung, das entsprechende Porenbild in einem etwas anderen Bereich der Kriechkurve zeigt. Außerdem treten auch hier materialbedingte Streuungen auf.

Die Anwendung des angegebenen Bewertungsschemas hat sich in der Praxis bewährt. Untersuchungen zur

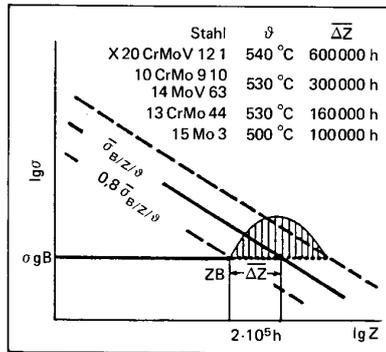


Bild 4. Mittlere noch verfügbare Lebensdauer nach TRD 508.

Eingangsgröße	Toleranz	Streuband e_z
Temperatur	$\Delta\vartheta = \pm 5^\circ\text{C}$	$0,7 \leq e_z \leq 1,5$
Spannung	$\Delta\sigma = \pm 10\%$	$0,6 \leq e_z \leq 1,7$
Zeitstandfestigkeit	--	$1 \leq e_z \leq 4$
Stahl 10 CrMo 9 10 $\vartheta = 535^\circ\text{C}$	$Z_{\vartheta/p} = Z_{B/\vartheta/p} = 200\ 000\ \text{h}$ Zeitstandfestigkeiten nach DIN 17 175	

Bild 5. Rechnerische Zeitstanderschöpfung e_z (Einfluß der Toleranzen in den Eingangsgrößen).

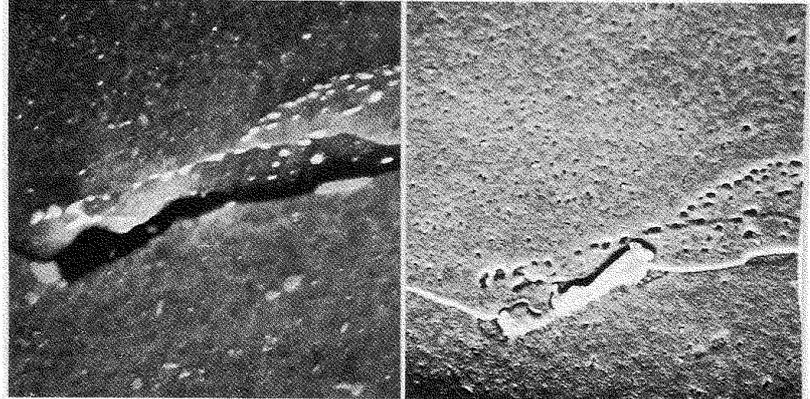


Bild 8. Vergleich Gefügeabdruck (links) zu Schliff (rechts): Kriechmikroriß (7 µm) und Karbide (0,1 ... 2 µm).

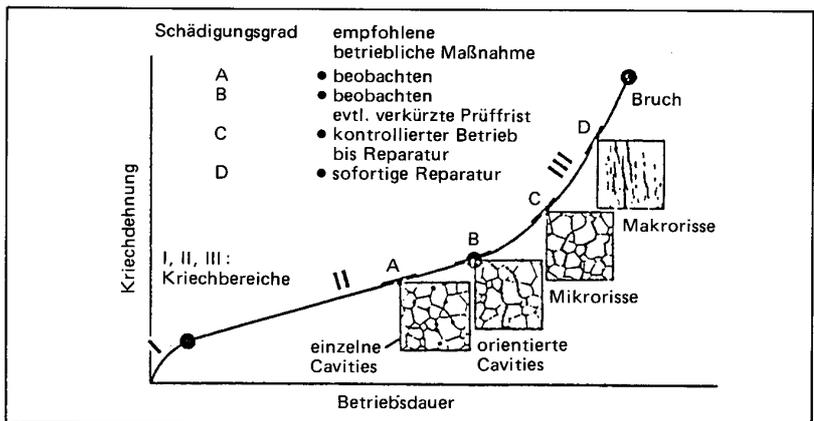


Bild 9. Schematische Zuordnung zwischen Kriechkurve und Porenschädigung.

exakten Beschreibung der Mechanismen von Porenbildung und -wachstum anhand mathematischer Modelle sind zur Zeit Gegenstand der Forschung. Ziel ist dabei eine noch weitergehende, sichere Ausnutzung der Lebensdauer der Bauteile [2].

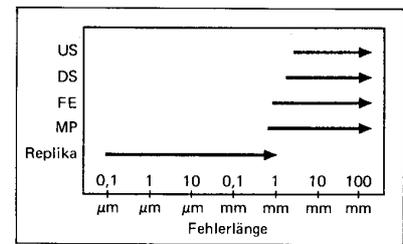


Bild 6. Auflösungsvermögen verschiedener zerstörungsfreier Prüfverfahren.

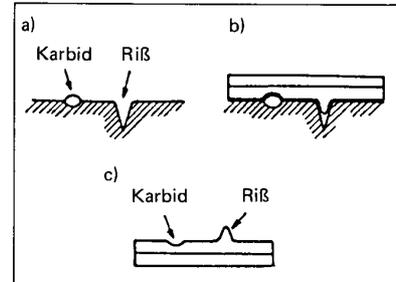


Bild 7. Prinzip des Gefügeabdruck-Verfahrens: a) Bauteiloberfläche nach Polieren und Ätzen; b) angelöste Folie paßt sich der Oberfläche an; c) Gefügeabdruck nach Aushärten der Folie.

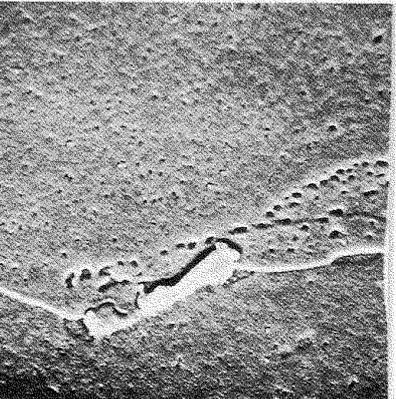


Bild 8. Vergleich Gefügeabdruck (links) zu Schliff (rechts): Kriechmikroriß (7 µm) und Karbide (0,1 ... 2 µm).

Bauteils repliziert wurde; das heißt, für die Plazierung der Abdrücke ist eine große Erfahrung erforderlich. Eine Aussage über die Restlebensdauer wird im allgemeinen nicht allein auf Basis der Gefügeabdrücke gefällt. Vielmehr sichert man sich möglichst mit Hilfe zusätzlicher rechnerischer und/oder zerstörender Prüfverfahren ab [9, 10].

Zerstörende Prüfverfahren

Das Isostress-Verfahren ist ein Kurzzeit-Prüfverfahren, bei dem eine Beschleunigung des Zeitstand-Versuches durch eine Erhöhung der Temperatur erreicht [9]. Die Vorgehensweise ist wie folgt: Zunächst wird die Betriebsspannung möglichst genau ermittelt. Dann werden aus dem zu untersuchenden Bauteil mehrere Proben entnommen und bei Betriebsspannung, aber gegenüber dem Betrieb erhöhten Temperaturen geprüft. Dadurch ergeben sich Bruchzeiten zwischen rund 500 und 2 Stunden. Werden die Bruchzeiten logarithmisch über der Prüftemperatur aufgetragen, so erhält man eine Gerade, **Bild 10**.

Wird die Gerade auf die Betriebstemperatur extrapoliert, so läßt sich auf der Ordinate die zu erwartende

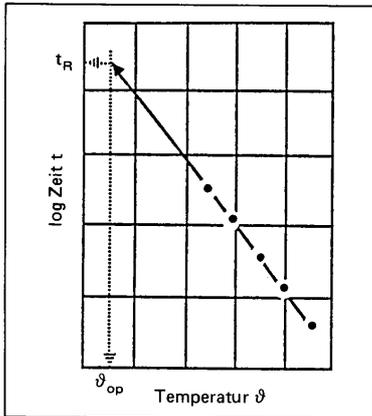


Bild 10. Prinzip der Isostress-Technik zur Bestimmung der Restlebensdauer.

Restlebensdauer ablesen. Bei dieser Technik wird davon ausgegangen, daß die mäßige Erhöhung der Temperatur nicht zu einer Änderung des Schädigungsmechanismus führt. Wegen der einfachen Spannungsermittlung werden Isostress-Versuche häufig bei der Restlebensdaueranalyse von Geradrohren eingesetzt. Soll die gesamte Rohrleitung beurteilt werden, so ist zu berücksichtigen, daß verschiedene Bauteile aufgrund unterschiedlicher Beanspruchungen (Zusatzkräfte) deutlich unterschiedliche Erschöpfungsgrade aufweisen können.

Zusammenfassung

Ferritische warmfeste Stähle finden ihr Haupteinsatzgebiet im Bereich konventioneller Kraftwerke. Zunächst werden einige für den Bereich der warmfesten Stähle wesentliche Begriffe wie Restlebensdauer, Kriechen und

Ein Beispiel aus der Praxis

Im folgenden wird ein Beispiel aus der Praxis für die Abschätzung der Restlebensdauer mit Hilfe einer Kombination von Replika-Technik und Isostress-Verfahren vorgestellt [11].

Eine HD-Leitung eines Kraftwerkes aus dem Werkstoff X20 CrMoV 12 1 zeigte bei routinemäßigen Replika-Entnahmen ein untypisches Gefüge.

Statt eines angelassenen Martensites (**Bild 11**) wurde ein Gefüge aus wenig Martensit mit viel Ferrit und relativ groben Karbiden gefunden (**Bild 12**). Dies wies darauf hin, daß das Material nicht ordnungsgemäß wärmebehandelt war.

Die Isostress-Versuche ergaben, daß die Kriechfestigkeit deutlich gelitten



Bild 11. X20 CrMoV 12 1: normaler Gefügezustand nach Betriebsbeanspruchung, V = 200fach.

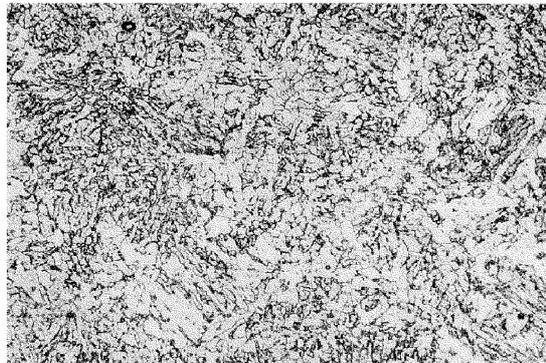


Bild 12. X20 CrMoV 12 1: abweichender Gefügezustand nach Betriebsbeanspruchung, V = 200fach.

Bild 13. Isostress-Versuche an zu niedrig austenitisiertem X20 CrMoV 12 1, Spannung 98 MPa.

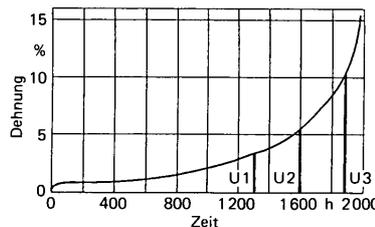
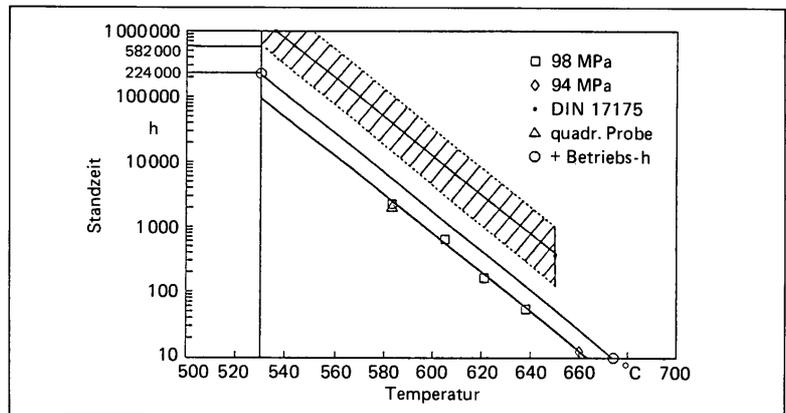


Bild 14. Kriechkurve mit Versuchsunterbrechungen bei U1, U2 und U3. T = 584 °C, 98 MPa, Probenabmessungen 10 mm x 10 mm x 50 mm.

hatte. Die zu erwartende Restlebensdauer betrug weniger als die Hälfte der Zeit nach DIN 17175, unteres Streuband, **Bild 13**. Bei der Probe mit der niedrigsten Temperatur (längste Laufzeit) wurde der Versuch zu verschiedenen Zeiten zwecks Replika-Entnahme unterbrochen, **Bild 14**. Die **Bilder 15, 16** und **17** zeigen das jeweilige Gefüge: Es

ist eine sich mit der Zeit verstärkende Kriechporenbildung zu erkennen. Der Zeitpunkt, zu dem die Kriechporen nachweisbar sind, stellt sicher, daß eine Kriechschädigung im Betrieb auch bei falsch wärmebehandeltem Material bei jährlicher Kontrolle mit Hilfe der Replika-Technik rechtzeitig erkannt werden kann.



Bild 15. X20 CrMoV 12 1: Gefüge nach 69% der Restlebensdauer, V = 200fach.

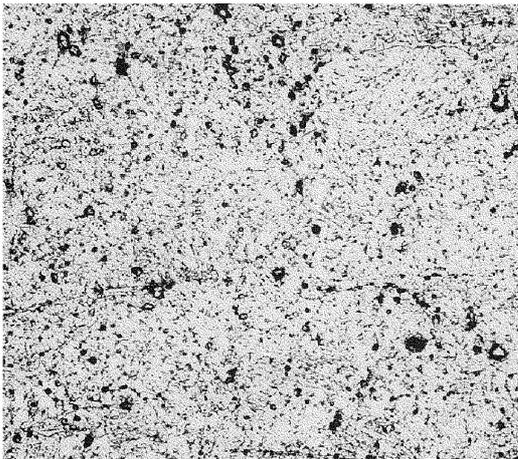


Bild 16. X20 CrMoV 12 1: Gefüge nach 82,4% der Restlebensdauer, V = 200fach.

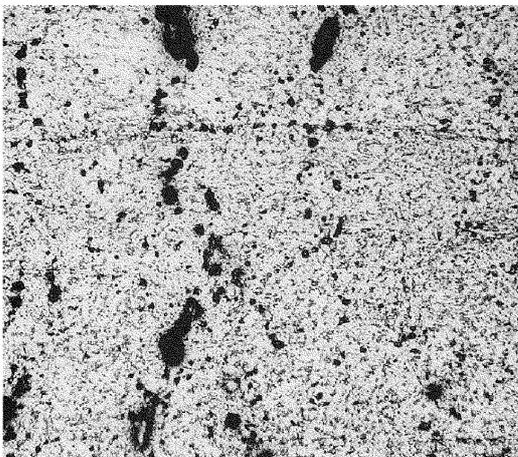


Bild 17. X20 CrMoV 12 1: Gefüge nach 91,8% der Restlebensdauer, V = 200fach.

Zeitstandversuch sowie einige metallkundliche Grundlagen dieser Stähle erläutert. Im Anschluß daran wird die Notwendigkeit einer Abschätzung der Restlebensdauer begründet, und es werden zwei der dazu in der Praxis verwendeten Verfahren vorgestellt. Dies ist zum einen die zerstörungsfreie Replika-Technik, zum anderen das zerstörende Isostress-Verfahren. Abschließend wird anhand eines Beispiels aus der Praxis gezeigt, wie mit Hilfe einer Kombination aus Replika-Technik und Isostress-Verfahren die Kriechporenentwicklung und die Restlebensdauer bestimmt werden können.

Literatur zum Thema

1. *Illschner, B.*: Werkstoffwissenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer, 1982.
2. *Riedel, H.*: Fracture at high temperatures. Berlin, Heidelberg: Springer, 1987.
3. *Hornbogen, E.*: Werkstoffe. Berlin, Heidelberg: Springer, 1983.
4. *Illschner, B.*: Festigkeit und Verformung bei hoher Temperatur. Deutsche Ges. f. Metallkunde, 1983.
5. *Neubauer, B., u. F. Arens-Fischer*: Bewertung der Restlebensdauer zeitstandsbeanspruchter Bauteile durch zerstörungsfreie Gefügeuntersuchungen. VGB Kraftwerkstechnik 63 (1983) Nr. 7, S. 637/644.
6. *Bietenbeck, F., u. B. Neubauer*: Prüf- und Analysetechniken sinnvoll einsetzen. VGB-Konferenz Lebensdauerbestimmung und -verlängerung, Essen, 15. 12. 1987.
7. *Cavalari, K.O., u. P. Seeger*: Vergleich der Nachweismöglichkeit von Zeitstandschäden mit Gefügeabdruck-, Ultraschall und Eindringverfahren. Materialprüfung 28 (1986) Nr. 1/2, S. 16/19.
8. *Schwaigerer, S.*: Festigkeitsberechnung im Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau. Berlin, Heidelberg: Springer, 1978.
9. *Stubbe-Leroy, J., u. C. van Melssen*: Evaluation of the residual life of steels under creep by short term creep tests. Restlebensdauer-Konferenz in Kopenhagen, 18./19. 3. 1980.
10. *Ludwigsen, B.*: Die Kombination von Abdruckverfahren (Replika-Technik) und Isostress-Methode und ihr Einsatz in dänischen Kraftwerken. Der Maschinenschaden 58 (1985) Nr. 6, S. 230/236.
11. *Heinrich, H.*: Untersuchung zur Kriechporenbildung an fehlerhaft wärmebehandeltem X20 CrMoV 12 1. VGB Kraftwerkstechnik 71 (1991) Nr. 1, S. 67/69.