

Abteilung Hochtemperaturwerkstoffe

Ermittlung der Gebrauchseigenschaften der 600 °C-Stähle für Dampfturbinen (DT1/2), Teilprojekt "Kriech-, Dehnwechsel- und Kerbverhalten"

Vorhaben: BMWA-PTJ 0327053 **Laufzeit:** 01.06.1997 bis 31.03.2002
Förderung: Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit (BMA), Projektträger Jülich (PTJ)
Kooperation: Materialprüfungsanstalt (MPA), Universität Stuttgart,
Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik (IWM), Freiburg
Institut für Werkstoffwissenschaften (IWW), Universität Erlangen-Nürnberg
Bearbeitung: Dipl.-Ing. M. Schwienheer
Bericht: Abschlussbericht vom 30.08.2001

Problemstellung

Für den ökologisch und ökonomisch optimierten Betrieb dieser Kraftwerke, die in der Regel für den sehr langzeitigen Grundlastbetrieb eingesetzt werden, sind Werkstoffe mit besonders guten Langzeiteigenschaften unter Hochtemperaturbeanspruchung erforderlich. In den letzten 20 Jahren wurden in internationaler Zusammenarbeit ferritisch-martensitische 9-12 % CrMo(W)VNbN-Stähle entwickelt, mit denen fossil befeuerte Dampfkraftwerke mit 600 °C Dampfeintrittstemperatur und bei gleichzeitiger Steigerung des Dampfdrucks auf 300 bar realisierbar sind. Um das volle Potenzial dieser Werkstoffe nutzen zu können, ist die Kenntnis der langzeitigen Gebrauchseigenschaften unumgänglich.

Für die Konstruktion, Berechnung und Überwachung der Dampfturbinenbauteile aus den neuen 600 °C-Stählen sind neben der inzwischen schon verhältnismäßig gut abgesicherten Zeitstandfestigkeit eine Reihe weiterer langzeitiger Hochtemperatureigenschaften wichtig, die noch nicht im ausreichendem Umfang bekannt sind. Hier ist vor allem die Kenntnis des Verformungsverhaltens unter statischer und zyklischer Beanspruchungen zu nennen.

Ziele

In diesem Teilvorhaben sollten nicht ausreichend bekannte Gebrauchseigenschaften zum **Langzeitkriechverhalten**, **Langzeitdehnwechselverhalten** und **Kerbverhalten** für die 600 °C-Stähle vom Typ **X12CrMoWVNbN10-1-1** und **GX12CrMoWVNbN10-1-1** ermittelt werden.

Dazu waren **Zeitstandversuche** an beiden Stählen bei den Hauptanwendungstemperaturen 550 und 600 °C, sowie bei den Extrapolationstemperaturen 625 und 650 °C bis zu 30 000 h Dauer mit praxisnahen niederen Spannungen durchzuführen. Zur Streubandsicherung waren Zeitstanddaten der Industrie von anderen Schmelzen der gleichen Werkstoffsorten zu berücksichtigen. Mit Streubandauswertungen sollen Beschreibung des Zeitstandverhaltens der beiden Stahlsorten im praxisrelevanten Anwendungsbereich aufgestellt werden.

Weiterhin sollten die gewonnenen Daten der Zeitstandversuche zu **phänomenologischen Kriechgleichungen** führen, die den gesamten Werkstoffanwendungsbereich anwendungsnah beschreiben. Diese Gleichungen waren durch Nachrechnen einiger bauteilnaher Versuche zu verifizieren und zur industriellen Nutzung in ein PC-Programm und ein **Finit-Element-Unterprogramm** zu implementieren.

Das **Langzeitdehnwechselverhalten** sollte zur Nachbildung betrieblicher An- und Abfahrvorgänge mit Zug- und Druckhaltezeiten untersucht werden. Dabei sollten Dehnwechselversuche ohne und mit Haltezeit bei 550 und 600°C mit Wechselzahlen bis rd. 10 000 und bis zu Dauern von 3 000 h

bis 6 000 h laufen. Das auf diese Weise ermittelte Verformungs- und Anrissverhalten im **Kriechermüdungsbereich** war ebenfalls in Beschreibungen für die Bauteilberechnung bereitzustellen.

Das Verformungs- und Versagensverhalten unter **mehrachsigter Beanspruchung** sollte an längsbelasteten Rundkerbproben unterschiedlicher Kerbschärfe unter Zeitstand- und unter Zug-Druck-Kraftwechselbelastung untersucht werden. Durch **Finit-Element-Analysen** sollte mit Hilfe der entwickelten Beschreibungen des Kriechverhaltens und des zyklischen Verformungsverhaltens herkömmliche Versagensthypothesen mit einachsigen Kennwerten auf die Übertragbarkeit auf mehrachsiges Bauteilverhalten überprüft und soweit notwendig modifiziert werden.

Planung und Ablauf

Die Planung und die Durchführung der Versuche und die theoretischen Arbeiten erfolgten in Absprache mit den Verbundpartnern. Als Industriepartner waren Siemens PG Mülheim, ALSTOM Power Baden, Saarschmiede Völklingen, PHB St. Ingbert, Schmolz & Bickenbach Krefeld und Sande Stahlguss Sande beteiligt. Die Forschungspartner waren Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik Freiburg und Institut für Werkstoffwissenschaften Universität Erlangen-Nürnberg.

Es wurde ein umfangreiches Programm von statischen und zyklischen Versuchen im Temperaturbereich von 550 bis 650 °C durchgeführt. Weiterhin erfolgten Vorbeanspruchungsversuche, um definiert vorbeanspruchte Werkstoffzustände für mikrostrukturelle Untersuchungen des Verbundpartners IWW Erlangen zu erzeugen. Die Versuchsergebnisse waren Basis der theoretischen Modellierungsarbeiten des IfW Darmstadt und der Institutspartner.

Ergebnisse der Zeitstandversuche

Die Zeitstandversuche erfolgten bei den Haupt- und Extrapolationstemperaturen und erreichten maximale Beanspruchungszeiten von rd. 25 000 h. Zusätzlich wurden Versuchsdaten der Industriepartner aus anderen Forschungsvorhaben hinzugezogen, um so eine Streubandauswertung für die Zeitstandfestigkeit durchführen zu können, die zur Beurteilung des Festigkeitsverhaltens der Stahlsorten erforderlich ist. Hier liegen die längsten Laufzeiten bei Werten von rd. 40 000 h. Je nach Temperatur und Spannung liegen diese Hauptversuchswerkstoffe im oberen oder unteren Bereich des Streubands. Zusätzlich zeigte sich eine starke heterogene Verteilung der Versuchsdaten bezüglich der Belegung von Temperatur, Spannung und Beanspruchungszeit der einzelnen Schmelzen. Die ermittelten Isothermen zeigen wie erwartet eine deutlich höhere Ausgangsfestigkeit der Schmiedestahlsorte gegenüber der Stahlgusssorte, jedoch verliert die Schmiedestahlsorte diesen Festigkeitsvorteil während der Beanspruchungszeit, sodass sich die Isothermen beider Stahlsorten zu langen Beanspruchungszeiten annähern (Bild 1).

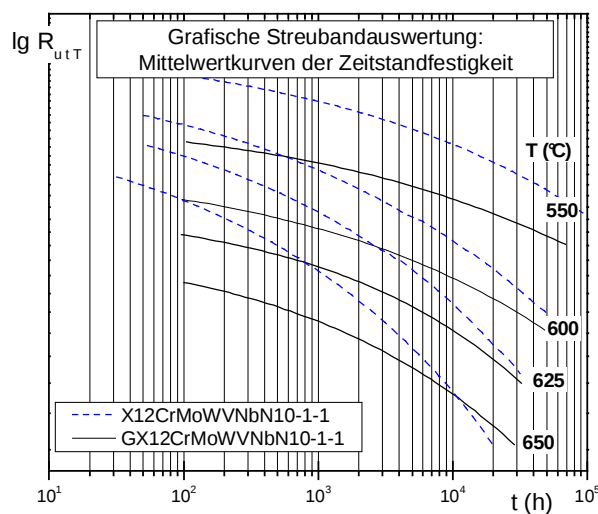


Bild 1: Vergleich Zeitstandfestigkeit für Stahlsorten (G)X12CrMoWVNbN10-1-1

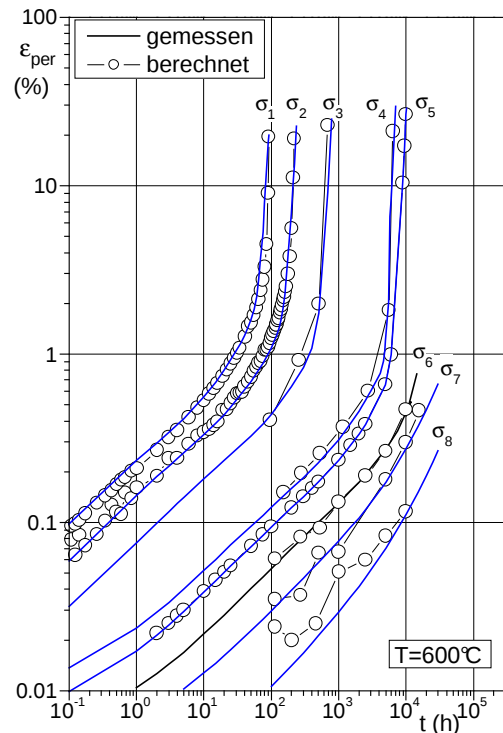


Bild 2: gemessene und mit der modifizierten Garofalo-Gleichung berechnete Kriechkurven bei 600 °C des Schmiedestahls X12CrMoWVNbN10-1-1, Nr. 1A

Neben der Betrachtung der Zeitstandfestigkeit und der Streubandanalyse wurden mit den durchgeführten Zeitstandversuche auch Kriechkurven ermittelt, die den zeitlichen Verlauf der plastischen Dehnung bei konstanter Prüfspannung und Prüftemperatur wiedergeben. Bei der Auswertung wurde dabei die bleibende plastische Dehnung ϵ_{per} bestimmt. Zur Beschreibung des Kriechverhaltens des Schmiedestahls Nr. 1A und des Stahlgusses Nr. 2A wurde die **modifizierte Garofalo-Gleichung** verwendet, die eine mit Erfolg am IfW entwickelte und in zahlreichen nationalen und europäischen Projekten angewandte Methode zur phänomenologischen Kriechbeschreibung darstellt. Die modifizierte Garofalo-Gleichung beschreibt die bleibende plastische Dehnung ϵ_{per} in allen drei technischen Kriechbereichen im gesamten Temperatur- und Spannungsanwendungsbereich des Werkstoffs. Die Parameteridentifizierung dieser Gleichung hat sich für die beiden hier untersuchten Werkstoffe als sehr aufwendig erwiesen, da sich eine komplizierte Temperatur- und Spannungsabhängigkeit der verschiedenen Teilgleichungen zeigte. Die erstellten Kriechgleichungen zeigen eine gute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Kriechkurven (Bild 2).

Ergebnisse der Dehnwechselversuche

Die Ergebnisse der dehnungsgeregelten Dehnwechselversuche ohne Haltezeit bei 600 °C zeigen eine geringe Streuung der Anrisswechselzahlen beider Stahlsorten. Die graphisch ermittelten Anrisskennlinien für Ermüdungsbeanspruchung bei 550 und 600 °C entsprechen dabei den zuvor erwarteten Verlauf (Bild 5). Bei einem Vergleich mit dem Anrissverhalten von konventionellen 12%-Cr-Stählen ergab sich beim Schmiedestahl Nr. 1A bei gleicher Beanspruchung bei einer mittleren Dehnungsschwingbreite $\Delta\epsilon = 0,5 \%$ und 3 min Zug- und Druckhaltezeit eine Erhöhung der ertragbaren Lastwechselzahl um den Faktor 2. Damit entspricht das Anrissverhalten dieser neuen Stähle voll den Erwartungen. Untersuchungen zum Einfluss der Haltezeit auf das Kriechermüdungsrisserverhalten und Beschreibungen des statischen und zyklischen Fließverhaltens mit der Ramberg-Osgood-Gleichung (Bild 3) ergänzen die notwendigen Werkstoffunterlagen zur Bauteilberechnung.

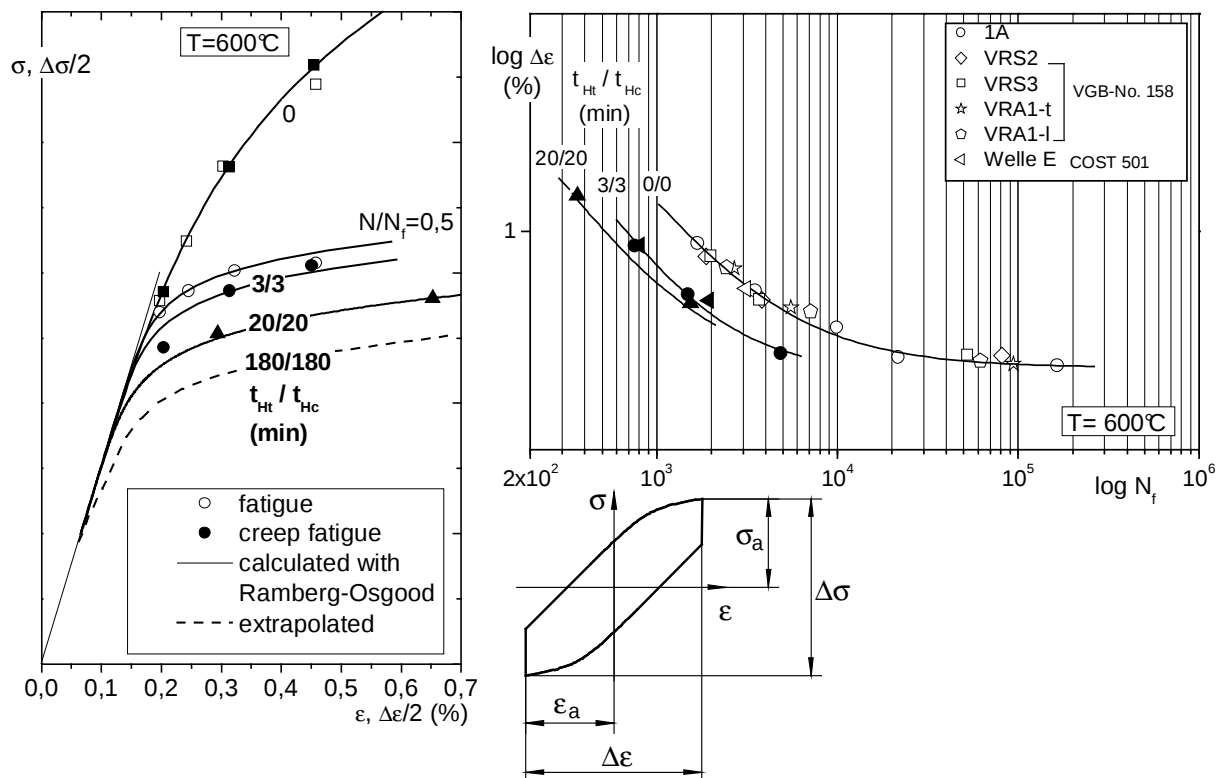


Bild 3: Einfluss der Haltezeit auf das Kriechermüdungsverhalten, X12CrMoWVNbN10-1-1, Nr. 1A,

Ergebnisse der statischen und zyklischen Kerbversuche

Neben dem Zeitstand- und Dehnwechselverhalten ist die Haltbarkeit von Bauteilen auch vom Werkstoffverhalten an konstruktiv nicht vermeidbaren Kerben abhängig. Als Grundlage für eine näherungsweise Abschätzung des statischen und zyklischen Kerbverhaltens und für spätere FE-Analysen wurden Versuche an Rundkerbproben mit V-Kerben von unterschiedlicher Kerbschärfe ($K_t = 1,7$ und $2,3$) durchgeführt. Im Zeitstandversuch zeigt sich sowohl am Schmiedestahl 1A als auch am Stahlguss 2A bis zu den bisher erreichten Laufzeiten von rd. 25000 h eine Kerbzeitstandverfestigung, was in Übereinstimmung zu einer bis dahin nicht beobachteten Absenkung der Zeitbruchdehnung steht. Das zyklische Kerbverhalten wurde an den Stählen 1A und 2A mit kraftgesteuerten Versuchen ohne und mit 3 h Haltezeit ermittelt. Die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_{\max}$ wurde mit Hilfe der Neuberformel in eine Dehnungsschwingbreite $\Delta\epsilon_{\max}$ umgerechnet. Erwartungsgemäß zeigt sich ein deutlicher Einfluss der langen Haltezeit auf die ermittelte Bruchwechselzahl N_B . Mit Miniaturdehnungsaufnehmern wurde die lokale Dehnung im Kerbgrund während der Versuchsdurchführung bei 600 °C gemessen. Die erstellten Beschreibungen für das einachsiale statische und zyklische Werkstoffverhalten wurden in einem Finit-Element Unterprogramm (UMAT) implementiert und so für mehrachsiale Beanspruchungsfälle übertragen werden (Bild 4). Ein Vergleich von gemessenen und berechneten Hysteresisschleifen konnte die erstellten Werkstoffbeschreibungen verifizieren. Deutliche Abweichungen zwischen FE-Rechnungen und Verformungsmessung treten allerdings bei höheren Zykluszahlen auf, was auf die Notwendigkeit einer Verbesserung des im FE-Programm verwendeten Verformungsmodells durch zeitangängige Schädigungsvorgänge hinweist.

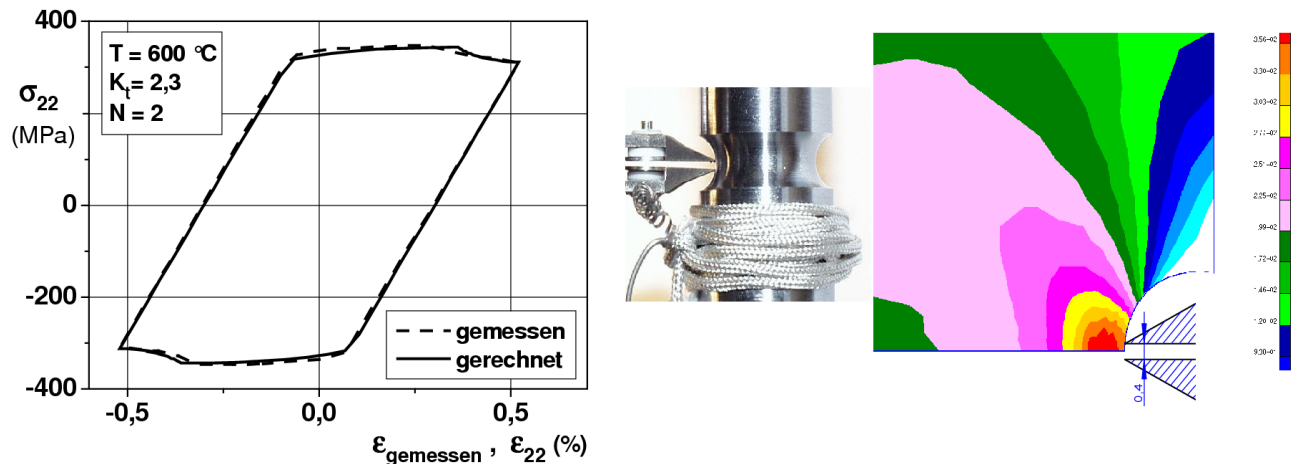


Bild 4: Messung und mithilfe der Finit-Element-Methode berechnete lokale Dehnungen im Kerbgrund zyklische beanspruchter Proben, Schmiedestahl Nr. 1A

Zusammenfassung der Erkenntnisse – Praktischer Nutzen

In diesem Teilvorhaben wurden erstmalig langzeitige Kennwerte der 600°C-Stähle für fortschrittliche Dampfturbinen in voller Breite ermittelt und anwendungsnah beschrieben. Die Kennwerte und Werkstoffbeschreibungen umfassen wichtige Unterlagen für die Auslegung, Berechnung und Überwachung von Hochtemperaturbauteilen wie Turbinenwellen sowie Turbinen- und Ventilgehäuse. Sie ermöglichen die bessere Werkstoffausnutzung und so den wirtschaftlichen Bau und Betrieb von fossil befeuerten Dampfkraftwerken mit höheren Wirkungsgraden, geringerem Brennstoffbedarf und verminderter CO₂-Emission. Die aktuell ermittelten Kennwerte und Werkstoffbeschreibungen wurden regelmäßig an die Verbundpartner verteilt und ließen sich direkt zur Berechnung in Finit-Element-Programmen oder zur Parameteridentifizierung anderer Werkstoffbeschreibungen verwenden. Insgesamt tragen die ermittelten Ergebnisse zu einem Knowhow- und Wettbewerbsvorteil der Industriepartner gegenüber der internationalen Konkurrenz bei. Zusätzlich wird ein vertieftes Verständnis des Materialverhaltens unter statischer und zyklischer Beanspruchung erreicht, das für weitere Werkstoffentwicklungen wesentliche Impulse verleiht.

Quellen

Schwienheer, M., J. Granacher, A. Scholz, C. Berger: Zeitstand-, Dehnwechsel- und Kerbverhalten der neuen wolframhaltigen 600 °C-Stähle, Vortrag auf der 24. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe am 30. November 2001 in Düsseldorf, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf, 2001, S. 26/33.

Schwienheer, M., H. Haase, A. Scholz, C. Berger: Long Term Creep and Creep Fatigue Properties of the martensitic Steels of Type (G)X12CrMoWVNbN10-1-1, Proceedings of the 7th COST Conference "Materials for Advanced Power Engineering 2002", Part III, Lecomte-Beckers, Carton, Schubert, Ennis (Ed), 2002, Liège, Belgium, pp. 1409/18.

Thoma, A., M. Schwienheer, A. Scholz, T.S. Mao, C. Berger: Anwendung von Kriechgleichungen zur Verformungsberechnung mithilfe der Finit Element Methode, Vortrag auf der 25. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe am 22. November 2002 in Düsseldorf, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf, 2002, S. 91/99.

Schwienheer, M., A. Scholz, H. Haase, C. Berger: Influence of Hold Times and Notches on Life Time under Service-Type Creep Fatigue Loading, Fifth International Conference on Low Cycle Fatigue, LCF 5, 09.-10. September 2003, Berlin, DVM, Proceedings.

Chilukuru, H., W. Blum, M. Schwienheer, A. Scholz: Creep-fatigue interaction in martensitic tempered steels by dynamic subgrain growth, Vortrag auf der 26. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe am 28. November 2003 in Düsseldorf, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf, 2003, S. 65/74.