

50 Jahre Arbeitsgemeinschaft Hochtemperaturwerkstoffe - Geschichte, Aufgaben und Ziele -

Dr.-Ing. Michael Monsees, ALSTOM (Switzerland) Ltd., Baden/Schweiz,
 Dr.-Ing. Alfred Scholz, Prof. Dr.-Ing. Christina Berger, Institut für Werkstoffkunde,
 TU Darmstadt, Dr. rer. nat. Ingo Steller, Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf,
 Dipl.-Ing. Walter Hartnagel, Schmidt + Clemens GmbH & Co. KG, Lindlar,
 Dipl.-Ing. Gerhard Schwass, Siemens Power Generation, Mülheim/Ruhr,
 Dipl.-Ing. Joachim Schubert, ALSTOM Power Systems GmbH, Mannheim,
 Dr.-Ing. Jürgen Ewald, Mülheim/Ruhr, Dr.-Ing. Walter Rohde, Krefeld

1. Einleitung

Mit dem industriellen Wiederaufbau in den Jahren nach dem 2. Weltkrieg begann eine rasante Entwicklung von Kraftwerks- und Chemieanlagen mit verbesserter Wirtschaftlichkeit. Häufig ging man dabei den Weg, durch höhere Prozesstemperaturen die Ausnutzung der Energie zu verbessern. Das bedeutete in der Regel höhere Bauteiltemperaturen mit entsprechend komplexeren mechanischen und korrosiven Beanspruchungen.

Für die Werkstoffhersteller ergab sich daraus ein Ansporn zur Entwicklung von Werkstoffen mit immer besseren Eigenschaften. **Bild 1** zeigt als Beispiel die Entwicklung von austenitischen Stahlsorten und Nickellegierungen für Gas- und Flugtriebwerke. Diese Werkstoffe stellen komplexe Legierungssysteme dar, die durch eine optimierte Wärmebehandlung hinreichende Festigkeit und Verformbarkeit bei gleichzeitiger Hochtemperaturkorrosionsbeständigkeit erlangen. Parallel verfolgt man den Weg, durch Kühlsysteme sowie Oberflächenschutzschichten die Beanspruchung des Grundwerkstoffes zu mindern. Die Entwicklung der Herstelltechnologien vom Schmieden über den Präzisionsfeinguss unter Vakuum zur Technologie der gerichteten und einkristallinen Erstarrung auch größerer Schaufeln hat maßgeblich den Fortschritt bestimmt [1].

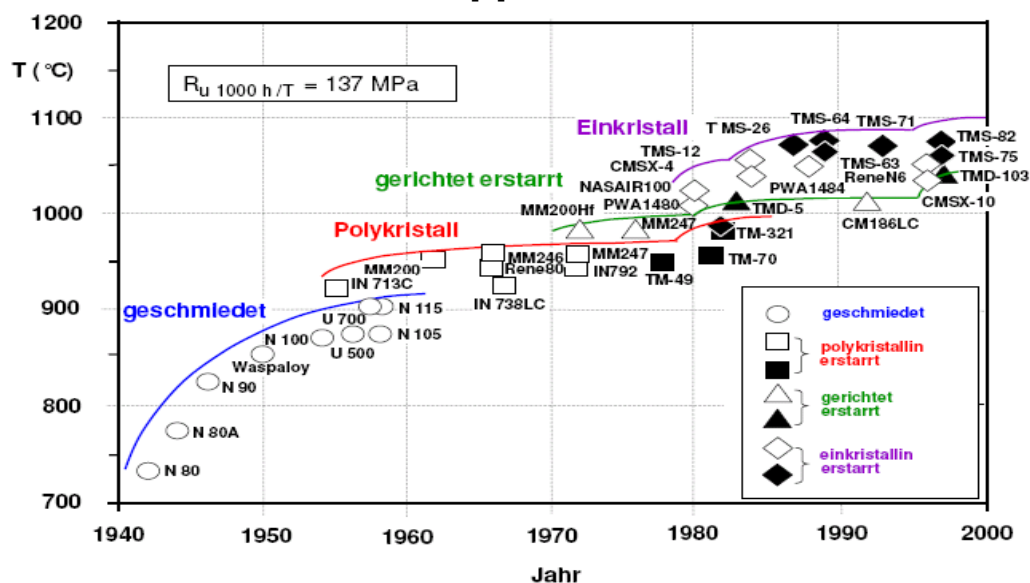


Bild 1 Historische Entwicklung der Warmfestigkeit wichtiger Nickelbasis-Superlegierungen [1]

Allein die Entwicklung der Werkstoffe führt jedoch noch nicht zum Ziel. Der Konstrukteur braucht zur Auswahl des im jeweiligen Einzelfall günstigsten Werkstoffs zuverlässige Kennwerte. Soweit solche Kennwerte nur in Langzeitversuchen ermittelt und nachgeprüft werden können, setzte sich sehr schnell die Erkenntnis durch, dass man viel Zeit und Geld sparen kann, wenn man die Ermittlung der Kennwerte nicht allein dem Hersteller überlässt, sondern gemeinsame Prüfprogramme verabredet. Diese Erkenntnis war Anlass zur Gründung der beiden Arbeitsgemeinschaften für warmfeste Stähle und für Hochtemperaturwerkstoffe.

Die Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle [2 bis 4] hatte schon 1949 Langzeitversuche an Stahlsorten für Dampfkraftanlagen aufgenommen, also an Stahlsorten für Anwendungstemperaturen bis rund 600 °C. Für Gasturbinen und Flugtriebwerke kamen metallische Werkstoffe gänzlich anderer Art in Betracht, wie Bild 1 klar erkennen lässt. Solche Werkstoffe wurden nicht von allen Mitgliedswerken der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle hergestellt oder verwendet und mussten zudem bei Temperaturen bis weit über 800 °C, also mit erheblich höherem finanziellen Aufwand, geprüft werden. Die interessierten Kreise entschlossen sich deshalb am 27. September 1957 zur Gründung einer zweiten Arbeitsgemeinschaft, nämlich der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, an deren 50-jähriges Bestehen wir heute erinnern. Die Gründungsmitglieder sind in der **Tabelle 1** aufgelistet. Im Jahre 1982 wurde die Zusammenarbeit in der Form eines Vertrages geregelt, dessen Bestimmungen der Arbeitsgemeinschaft den Status der Gemeinnützigkeit sichern.

Tabelle 1. Mitgliedswerke der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe, Stand Januar 1958

Werkstoffhersteller	Werkstoffanwender
	„Gruppe Chemie“
Bochumer Verein für Gussstahlfabrikation AG, Bochum	Farbenfabriken Bayer, Leverkusen
Gebr. Böhler + Co. AG, Düsseldorf-Oberkassel	Chemische Werke Hüls AG; Marl
Deutsche Edelstahlwerke AG, Krefeld	Farbwerke Hoechst AG, Frankfurt-Hoechst
	„Gruppe Turbinenfirmen“
Gussstahlwerk Witten AG	Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft
Fried. Krupp Widia-Fabrik, Essen	Brown, Boveri & Cie, Mannheim
Mannesmannröhren-Werke AG, Düsseldorf	Escher Wyss, Ravensburg
Phoenix-Rheinrohr AG, Düsseldorf	Gute Hoffnungshütte AG, Sterkrade
Röchling'sche Eisen- und Stahlwerke GmbH, Völklingen	Kühnle, Kopp & Kausch AG, Frankenthal
	Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg
	Siemens-Schuckertwerke AG, Mülheim/Ruhr
	„Gruppe Triebwerke“
	Daimler-Benz AG, Stuttgart

2. Aufgaben und Ziele

Die wesentliche Aufgabe der Arbeitsgemeinschaft wurde anfänglich in Langzeituntersuchungen zum Kriech- und Zeitstandbruchverhalten sowie zur Zunderbeständigkeit gesehen. Fortschritte in der Prüftechnik erlaubten ungefähr ab 1960 auch Untersuchungen zur Langzeit-Temperaturwechselbeständigkeit. Das Ziel war die Ermittlung von Werten der Zeitstandfestigkeit und der 1-%-Zeitdehngrenzen. Ursprünglich wurden Werte für eine Beanspruchungsdauer von 100.000 h angestrebt. Heute werden Werte für eine Beanspruchungsdauer von 200.000 h verlangt. Die Ergebnisse der Prüfung mehrerer Schmelzen von verschiedenen Herstellern sollten zu Streubändern zusammengestellt werden, die als Grundlage zur Ableitung verlässlicher Kennwerte in Normen und Werkstoffblättern dienen konnten.

Bei Werkstoffen für Gasturbinen-Laufschaukeln wurde im Hinblick auf konstruktionsbedingte Kerben in den Schaufelfüßen von Anfang an besonderer Wert auch auf die Bewertung des Kerbzeitstandverhaltens gelegt.

Darüber hinaus kamen im Zuge der steigenden Anforderungen an Bauteile und der Entwicklung der Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren von Werkstoffen Fragen zum Einfluss des Herstellungsprozesses und zum Schweißen sowie beispielsweise zum Aufbringen von Schutzschichten gegen Hochtemperaturkorrosion hinzu.

Bis heute gilt, dass Werkstoffentwicklung und Optimierung der Herstellverfahren dem kreativen Wettbewerb der Hersteller überlassen bleiben müssen. Soweit jedoch die Möglichkeit bestand, im Rahmen öffentlich geförderter Forschungsvorhaben parallel zu den Langzeitversuchen auch auf bestimmte Entwicklungsfragen einzugehen, lieferten die von allen Beteiligten gemeinschaftlich vorgenommenen Abschlussauswertungen auch hierzu immer wieder wichtige Erkenntnisse.

3. Organisation der Gemeinschaftsarbeit

Im Laufe der vergangenen fünf Jahrzehnte haben zahlreiche namhafte Unternehmen der Werkstoffhersteller und -anwender in der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe mitgearbeitet, wenn auch einige nur vorübergehend. Die Namen der Mitgliedswerke haben sich in den meisten Fällen mehrfach verändert.

Die unterschiedlichen Marktinteressen insbesondere hinsichtlich der Werkstoffsorten, Erzeugnisformen und Bauteilgruppen müssen in fairer und ausgewogener Weise bei der Festlegung der kostspieligen Versuchsprogramme berücksichtigt werden. Nur so kann der langfristige Zusammenhalt und damit der Erfolg der Arbeitsgemeinschaft gesichert werden. Nur wenn ein Unternehmen sieht, dass seinen Interessen hinreichend Rechnung getragen wird, ist es auf Dauer bereit, sich an den Kosten für den Aufwand zu beteiligen.

Die Kosten der Gemeinschaftsversuche werden je zur Hälfte von der Gruppe der Werkstoffhersteller einerseits und den Gruppen der Werkstoffanwender, nämlich Großchemie, Turbinenhersteller und Triebwerkshersteller, andererseits getragen.

Der Lenkungsausschuss der Arbeitsgemeinschaft, in dem alle Mitgliedswerke vertreten sind, sorgt deshalb für die Koordinierung der in den Projektgruppen verabredeten Versuchsprogramme und entscheidet über den jährlichen Haushaltsplan. **Tabelle 2** erinnert an die Vorsitzenden dieses Lenkungsausschusses, der diesen Namen allerdings erst seit 1969 trägt.

Tabelle 2. Vorsitzende des Lenkungsausschusses der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe

Name	Zeitraum
Dr. phil. Gerhard Bandel, Bochumer Verein, Leiter Forschungsabteilung	1957 bis 1966
Dr.-Ing. Hans Keller, Hoechst,	1967 bis 1972
Dipl.-Ing. W. Thiessen, Hoechst (kommissarisch)	1972 bis 1973
Dr. rer. nat. Horst Müller, Stahlwerke Röchling-Burbach, Völklingen	1974 bis 1979
Dipl.-Ing. Wilhelm Weißling, Stahlwerke Südwestfalen AG, Siegen	1979 bis 1984
Dipl.-Ing. K.-H. Keienburg, Siemens AG, Mülheim/Ruhr	1984 bis 1993
Geschäftsführung (kommissarisch)	1994 bis 1995
Dr.-Ing. Jürgen Ewald, KWU, Mülheim/Ruhr (kommissarisch)	1996 bis 1999
Dr.-Ing. Michael Monsees, ALSTOM Power Generation, Baden/Schweiz	seit 2000

Die heutige, zweistufige Hierarchie der Arbeitsgemeinschaft war bereits 1966 eingeführt worden. Bis dahin gab es nur ein einziges Arbeitsgremium für alle anfallenden Aufgaben. Mit wachsendem Arbeitsvolumen ergab sich jedoch die Notwendigkeit, spezielle Fachleute hinzuzuziehen. Das Arbeitsgebiet wurde unterteilt. Künftig sollten die Projektgruppe H1 für die hitzebeständigen Werkstoffe (**Tabelle 3**) und die Projektgruppe H2 für die hochwarmfesten Werkstoffe (**Tabelle 4**), die vornehmlich für Gas- und Flugtriebwerke eingesetzt werden, zuständig sein.

Mitte der 70er Jahre wurde zusätzlich noch die Projektgruppe H3 eingerichtet, die sich mit dem Einfluss von Oberflächenbeschichtungen auf das Zeitstandverhalten der Turbinenschaufelwerkstoffe befassen sollte.

Tabelle 3. Obleute der Projektgruppe H1 Hitzebeständige Stähle

Name	Zeitraum
Dr.phil. Dipl.-Phys. Heinz Fabritius, Mannesmannröhren-Werke	1966 bis 1974
Dipl.-Ing. Wilhelm Weißling, Krupp Südwestfalen (parallel Dipl.-Ing. B. Poweleit, Hoechst, für Gusswerkstoffe)	1974 bis 1991
Dr.-Ing. Ulrich Brill, ThyssenKrupp VDM, Werdohl	1991 bis 2003

Tabelle 4. Obleute der Projektgruppe H2 Hochwarmfeste Werkstoffe

Name	Zeitraum
Dr.-Ing. Hans Rainer Kautz, Gebr. Böhler & Co., Düsseldorf	1966 bis 1969
Dipl.-Ing. Horst Fröhlich, Gebr. Böhler & Co. AG, Düsseldorf	1969 bis 1973
Dipl.-Ing. Wolfgang Jakobeit, BBC, Mannheim	1974 bis 1996
Geschäftsführung (kommissarisch)	1996 bis 1999
Dr.-Ing. Michael Monsees, ALSTOM, Baden	seit 2000

Die Projektgruppen erhielten die Aufgabe, die Gemeinschaftsversuche zu planen, zu betreuen und auszuwerten sowie deren Ergebnisse in der Öffentlichkeit vorzustellen. Sie sollten des Weiteren wissenschaftliche Fragestellungen erarbeiten, die im gemeinsamen Interesse lagen und mit Nutzen für die Arbeitsgemeinschaft in öffentlich geförderten Forschungsprojekten untersucht werden konnten.

Die Geschäftsführung der Arbeitsgemeinschaft wurde dem Verein Deutscher Eisenhüttenleute (heute Stahlinstitut VDEh) übertragen. Die so genannten Geschäftsführer (**Tabelle 5**) sind insbesondere dem Lenkungsausschuss für die jährliche Rechnungslegung verantwortlich, unterstützen aber darüber hinaus in vielfältiger Weise alle Arbeitsgremien der Arbeitsgemeinschaft.

Tabelle 5. Geschäftsführung der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe

Name	Zeitraum
Dr. rer. nat. Wilhelm Schlüter	1957 bis 1960
Dr.-Ing. Ulrich Kalla	1960 bis 1965
Dr.-Ing. Karl-Josef Kremer	1965 bis 1970
Dr.-Ing. Walter Rohde	1971 bis 2001
Dr.-Ing. Hans-Joachim Wieland	2001 bis 2005
Dr. rer. nat. Ingo Steller	seit 2005

Ein besonders wichtiges Element in der Organisation der Gemeinschaftsarbeit sind die **Prüfstellen**, die mit der Durchführung der Gemeinschaftsversuche beauftragt werden. Maßgebend für deren Auswahl ist der Gedanke, nur neutrale Institute oder Laboratorien der Werkstoffanwender hinzuzuziehen. Anfänglich handelte es sich um das Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf, das Staatliche Materialprüfungsamt, Dortmund, die Farbwerke Hoechst, Frankfurt/Main, und insbesondere um das Institut für Werkstoffkunde, Darmstadt, das auch heute noch in großem Umfang Gemeinschaftsversuche durchführt. Bei der Gründung der Arbeitsgemeinschaft standen im IfW Darmstadt etwa 40 Prüfplätze bis zu Temperaturen von 900 °C zur Verfügung. Heute sind etwa 70 Prüfplätze in Zeitstand-Vielprobenprüfmaschinen bis 1000 °C und 5 Prüfplätze in Zeitstand-Einzelprüfmaschinen bis 1250 °C belegt.

Ergänzend haben auch die Mitgliedswerke, vor allem z.B. BBC und KWU, immer wieder Ergebnisse so genannter privater Langzeitversuche in die Arbeitsgemeinschaft eingebracht und somit zur Absicherung der Streubänder beitragen.

Eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg dieses Vorgehens bei der Sammlung von Streubanddaten aus verschiedenen Quellen war, dass sich alle Beteiligten nach den von der Arbeitsgemeinschaft für Warmfeste Stähle erarbeiteten Richtlinien für die Durchführung von Zeitstandversuchen [5] richteten. In diesen Richtlinien wird nach den Grundsätzen einer modernen Qualitätssicherung bis ins Detail die notwendige Dokumentation der Werkstoffe sowie ihrer Herstellung und Prüfung festgelegt. Ein wichtiger Gesichtspunkt ist dabei die umfangreiche Vorprüfung der Werkstoffe auf Gleichmäßigkeit ihrer Beschaffenheit.

In der Öffentlichkeit findet die Arbeitsgemeinschaft besondere Aufmerksamkeit durch die seit 1975 jährlich gemeinsam mit der Arbeitsgemeinschaft für Warmfeste Stähle ausgerichteten Vortragsveranstaltungen, in denen auch Fachleute des In- und Auslands, die der Arbeitsgemeinschaft nicht angehören, mit Berichten über ihre aktuellen Arbeitsergebnisse am gegenseitigen Erfahrungsaustausch teilnehmen.

4. Kennwerte in Werkstoffnormen

Anfänglich konzentrierte sich die Gemeinschaftsarbeit auf die Durchführung von Zeitstandversuchen langer Dauer an hitzebeständigen Chromstählen mit Chromgehalten bis 24 %. Zeitstandversuche an den ausscheidungshärtenden Nickel-Schmiedelegerungen NiCr20TiAl (Typ 80A) und NiCr20Co18Ti (Typ 90) sowie u. a. an den carbidhärtenden Cobalt-Schmiedelegerungen vom Typ CoCr20Ni20W (S-816) und CoCr20Ni10Mo (G 32 B) waren schon vor 1957 im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle begonnen worden und wurden von der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe übernommen. Des Weiteren wurden sehr bald auch umfangreiche Untersuchungen an hitzebeständigen Chrom-Nickel- und Nickel-Chrom-Stählen für die Erdölchemie in das Arbeitsprogramm aufgenommen.

Als Ergebnis dieser Arbeiten konnten gesicherte Kennwerte der 10.000h- und 100.000-h-Zeitstandfestigkeit ermittelt und in einschlägigen, auch europäischen Werkstoffnormen und Werkstoffblättern verankert werden. Eine erste ausführliche Darstellung der Ergebnisse wurde 1969 in einem Handbuch veröffentlicht [6].

Zur Aufbereitung, Auswertung und Verbreitung von Langzeitdaten bei erhöhten Temperaturen wurde im Rahmen des Vorhabens P173 [7] gemeinsam mit der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle unter wesentlicher Beteiligung der Prüfstellen eine EDV-Datenbank geschaffen und im Jahre 1990 eingeführt. Die maßgebliche Anregung zu diesem für den zunehmenden Bedarf an rechnergestützten Auswertungen wichtigen Schritt kam von J. Ewald, während die Umsetzung wesentlich in den Händen von D. Dathe (BFI) lag. Inzwischen wurde das Datenbanksystem ZSF der 90er Jahre durch das modernere und erweiterte Datenbanksystem LAMBDA [8] ersetzt.

Die Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe hat ihre wesentliche Aufgabe, nämlich die Durchführung von Zeitstandversuchen langer Dauer und die Sammlung zusätzlicher Streubanddaten zur Ableitung verlässlicher Langzeitkennwerten, nie aus den Augen verloren. Allerdings wurde diese Aufgabe im weiteren Verlauf ihrer Tätigkeit häufig verknüpft mit der Untersuchung wissenschaftlicher Fragestellungen im Rahmen von Forschungsprojekten, deren Durchführung in der Verantwortung der Prüfstellen lag und von interessierten Mitarbeitern der Arbeitsgemeinschaft kontinuierlich begleitet wurde. Auf die Ergebnisse der Arbeiten wird im nächsten Abschnitt ausführlich eingegangen. Da im Zeitrahmen von Forschungsvorhaben naturgemäß nur Zeitstandversuche verhältnismäßig kurzer Dauer möglich sind, hat die Arbeitsgemeinschaft die Versuche nach Abschluss der Vorhaben in vielen Fällen bis zu langen Laufzeiten weitergeführt.

Viele dieser Projekte wurden von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V., der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e. V. oder der Studiengesellschaft Stahlanwendungsforschung finanziell gefördert. Dafür soll diesen Institutionen auch an dieser Stelle noch einmal ausdrücklich gedankt werden. Zugleich gilt ein besonderer Dank der Arbeitsgemeinschaft aber auch den Prüfstellen für die Mühen, die sie bei der Abfassung umfassender Forschungsanträge und Abschlussberichte auf sich nehmen mussten.

5. Bauteile und Werkstoffanwendung

Gemäß der Zielsetzung der Arbeitsgemeinschaften steht die langzeitige Untersuchung von Werkstoffen im Vordergrund. Dabei handelte es sich teilweise um bereits bekannte Werkstoffe, deren Absicherung durch belastbare temperatur- und zeitabhängige Kennwerte nicht zur Verfügung stand. Einen Überblick über die Werkstoffe vermittelte die aktuelle Liste (**Tabelle 6**) aus der Datenbank LAMBDA der Arbeitsgemeinschaften [8].

Bei den Untersuchungen im Rahmen der **Projektgruppe H1** handelte es sich zunächst um hitzebeständige Schmiede- und Gusswerkstoffe, die für Strukturbauteile (**Bild 2**) in der erdölverarbeitenden Industrie eingesetzt werden. Hier stellte sich die Aufgabe, derartige Werkstoffe auf ihre Beständigkeit gegen chemische und mechanische Beanspruchung bis zu Beanspruchungsdauer von 100.000 h bei Temperaturen bis 1000 °C, teilweise aber auch bis 1100 °C / 10.000 h abzusichern. Betrachtet wurden hierbei Fragestellungen zum Kerbverhalten und zum Verhalten beispielsweise bis zu 1 % Dehnung, aber auch zum Einfluss der Umformrichtung speziell bei Schmiedewerkstoffen. Teilweise wurden auch Schweißverbindungen untersucht.

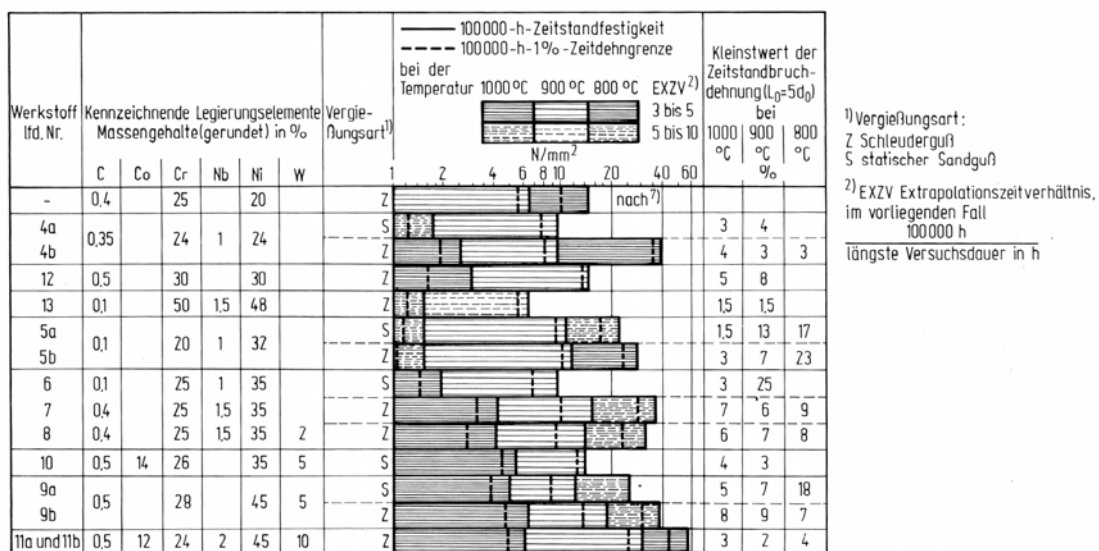
Tabelle 6. Aktuelle Übersicht der Werkstoffe und zugehöriger Schweißverbindungen in der Datenbank LAMBDA, etwa ab 1971

Geprüfte Werkstoffe in PG H1	Anzahl Schmelzen	Geprüfte Werkstoffe in PG H2	Anzahl Schmelzen
GNiCr28W	1	Alloy B-1900	1
GX10NiCrNb32-20	17	Alloy 247LC-DS (long.)	2
GX10NiCrNb32-20, E-Hand	2	Alloy 247LC-DS (trans.)	1
GX15CrNi25-20	3	ECY-768	1
GX30CrNiSiNb24-24	6	Alloy FSX-414	2
GX45CrNiSi34-24, Einfl. Pb, Se, Ti, Bi, Te, Zn	13	Gamma-TiAl	1
GX40CrNiSi25-20	36	Alloy X Guss	1
GX40NiCrNb35-25	10	Alloy 214	1
GX40NiCrNb35-25+ 2% W	1	Alloy 230 Guss	1
GX40NiCrNb35-25+ 5% W	3	Alloy 6203-DS	4
GX6CrNi18-9	6	NiCr22Mo9Nb (Typ 625)	3
GX12CrCoNi21-20 (Typ N-155)	105	Alloy 706	1
GX30CrNiSiNb24-24	6	Alloy 738LC	17
GX40NiCrNb35-25	7	Alloy 738LC (Hohlproben)	1
GX45NiCrNbTi35-25	1	Alloy 792CCF	1
GX45NiCrNbSiTi45-35	1	Alloy 792mod	1
X10CrAl7	3	NiCr13Mo6Ti3 (Typ 901)	1
X10CrAl24	9	NiCr23Co12 Mo (Typ 617)	2
X10NiCrAlTi32-20 (Alloy 800)	19	NiCr23Co12 Mo (Typ 617), MAG	1
X10NiCrAlTi32-20 (Alloy 800), MIG und E-Hand	10	NiCr19Fe18Nb (Typ 718)	2
X15CrNiSi20-12	7	LEK 94 (SX)	1
X10CrNiSiNCe21-11	1	Alloy 247	1
X8CrNiSiNCe21-11	1	Alloy 509	1
X40CoCrNi20-20 (Typ S-590)	88	NiCr20TiAl (Typ 80A)	210
		NiCr20Co18Ti (Typ 90)	81
		Nimonic 101	2
		NiCo20Cr15MoAlTi (Typ 105)	1
		NiCo15Cr15MoAlTi (Typ 115)	1
		Alloy R-80	2
		Alloy U-500	2
		Alloy U-520	1
		Alloy U-720	4
		Waspaloy	1
Anzahl der geprüften Schmelzen	356	Anzahl der geprüften Schmelzen	353

**Bild 2.**

Schleudergussrohre, Strukturteile und komplette Rohrsysteme werden eingesetzt für den Industrieofenbau, Steam Cracker, Reformieranlagen oder Anlagen zur Eisenerzdirektreduktion sowie andere Teile der Chemischen Industrie

Für entsprechende hitzebeständige Legierungen für Anwendungstemperaturen um 1000 °C und darüber wurde ab etwa 1966 vordringlicher Bedarf gesehen. Bei den Werkstoffen handelte es sich um weit verbreitete Legierungen u. a. vom Typ 25Cr20Ni und 30Ni20Cr. Durch Erhöhung des Chromgehalts zur Verbesserung der Oxidationsbeständigkeit und durch die Anhebung des Nickelgehalts zur Anhebung der Beständigkeit gegen Aufkohlung ließ sich gleichzeitig die Neigung zur σ -Phasenbildung reduzieren [9]. Niob und Wolfram tragen zur Erhöhung der Zeitstandfestigkeit bei, verbunden mit gleichzeitig nachteiliger Wirkung hinsichtlich der Oxidationsbeständigkeit. Ergebnisse dieser Untersuchung an Werkstoffen mit 20 bis 28 % Cr und 20 bis 50 % Ni u. a. am Werkstoff GNiCr28W sind in [10] publiziert. Im Rahmen einer Auswertung aufgrund der 30.000-h-Langzeitdaten konnten 100.000-h-Kennwerte der Zeitstandfestigkeit ermittelt werden (**Bild 3**).

**Bild 3.** Zeitstand- und Zeitdehnverhalten, hitzebeständige Gusswerkstoffe [10]

Von aktuellem Interesse ist die Nickelbasisknetlegierung NiCr25FeAlY (Typ Nicrofer 6025 HT), bei der es sich um eine Nickel-Chrom-Eisenlegierung handelt, die sich in Kombination von Carbidhärtung und Aluminiumoxidschichtbildung durch hervorragende Korrosionsbeständigkeit unter zyklischer Beanspruchung bei gleichzeitig bemerkenswerten Zeitstandfestigkeitseigenschaften bis zu Anwendungstemperaturen von 1200 °C auszeichnet [11]. Dieser Werkstoff eignet sich beson-

ders für die Anwendung im Industrieofenbau und in Wärmebehandlungsanlagen mit extrem korrosiven Bedingungen und hohen mechanischen Beanspruchungen. So werden beispielsweise Transportrollen für Keramiköfen, Drehrohröfen, Rohre, Muffeln und Brennerköpfe aus NiCr25FeAlY hergestellt. Auch Schweißverbindungen dieser Legierungen werden vielfach eingesetzt.

Der hitzebeständige Stahlguss GNiCr28W wird in Form von Schleudergussrohren bzw. Schleuderformteilen oder statisch gegossenen Formgussteilen hergestellt [12]. Anwendungsgebiete sind Konstruktionsteile im Industrieofenbau mit oxidierender als auch aufkohlender Ofenatmosphäre wie beispielsweise Bauteile für Hubbalkenöfen und Reiter für Brammenöfen sowie nahtlose Ofenrollen für Rollenherdöfen in Walzwerken. Seine Eignung für den Einsatz bis zu Temperaturen um 1150 °C rührt aus dem relativ hohen Chromgehalt in Kombination mit Silicium her, wobei sich eine für diese Legierung typische Oxidschicht bildet, die bis zu Temperaturen oberhalb 1150 °C stabil bleibt.

Das LCF-Verhalten einer Reihe hochwarmfester Legierungen ist von zunehmender Bedeutung für den industriellen Einsatz [13]. Vorbehaltlich der langzeitigen Absicherung weisen die Ergebnisse der artgleichen Schweißverbindung des Werkstoffes NiCr25FeAlY keine geringeren Bruchwechselzahlen als der Grundwerkstoff auf (**Bild 4**).

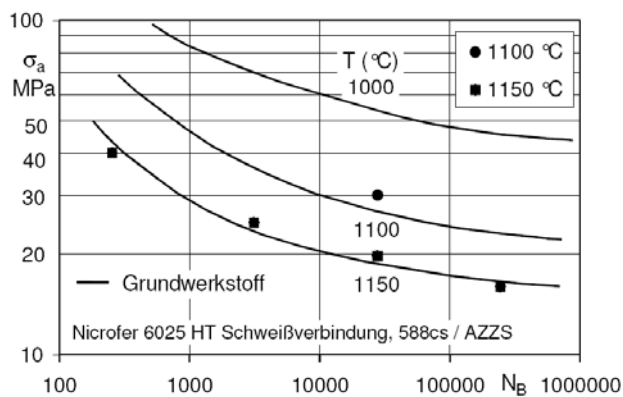


Bild 4. Ermüdungsverhalten des Werkstoffes NiCr25FeAlY (Typ Nicrofer 6025 HT), kraftgesteuerte Versuchsführung [13]

Der hochwarmfeste Werkstoff X10NiCrAlTi32-20 (Typ Alloy 800) wird als austenitischer Stahl überwiegend in der Energietechnik und im Chemieanlagenbau eingesetzt. So wird z. B. in [14] über eine Streubandauswertung auch an der H-Variante mit erhöhter Zeitstandfestigkeit im Rahmen des PNP-Projekts berichtet. Es wurden Einflussgrößen wie Gehalte an Legierungselementen bzw. Korngröße berücksichtigt.

Hierbei wurde der Frage nachgegangen, wie der Al-Gehalt die Zeitstandfestigkeit beeinflusst. Danach trägt der Al-Gehalt bei Temperaturen über 700 °C wesentlich zur Zeitstandfestigkeit bei (**Bild 5**). Die Korngröße hat nur bei sehr hohen Temperaturen durch Kornvergrößerung einen positiven Einfluss.

Umfangreiche Untersuchungen am Werkstoff Alloy 800 wurden auch an unterschiedlich hergestellten Schweißverbindungen sowie am kaltumgeformten Werkstoffzustand durchgeführt, über die in der Folgezeit im Rahmen der Vortragsveranstaltungen berichtet wurde [15, 16].

In den 80er Jahren wurde in einem Forschungsvorhaben der Einfluss des Metallverlusts durch Verzunderung auf das Zeitstandverhalten hitzebeständiger Legierungen untersucht [17]. Der gleichmäßige Verlust an tragendem Querschnitt, der bei hohen Anwendungstemperaturen auftreten kann, führt zu einer Erhöhung der wirkenden Spannung im Zeitstandversuch und kann damit zu einer Unterschätzung des Festigkeitspotenzials eines Werkstoffes führen.

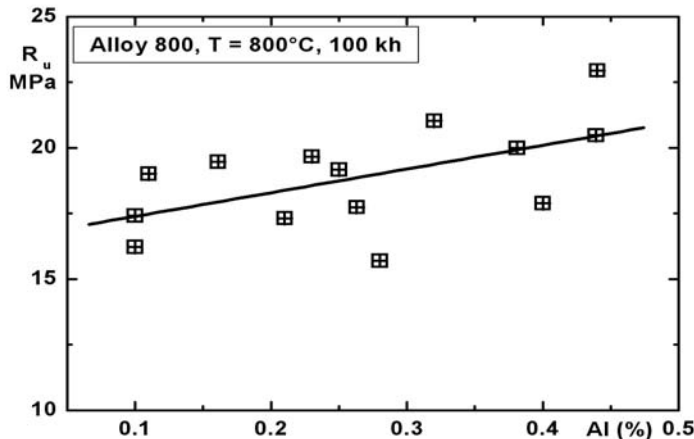


Bild 5.

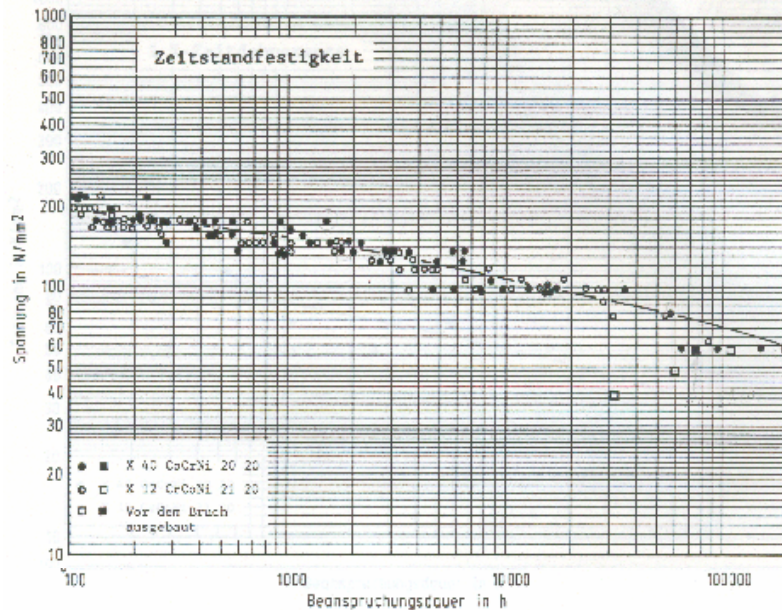
100.000-h-Zeitstandfestigkeit bei 800 °C, Werkstoff Alloy 800 [18]

Diesem Problem wurde u. a. mit hitzebeständigen Werkstoffen des Typs CrNi(Si,Nb)-Guss- und Schmiedewerkstoff nachgegangen mit dem Ergebnis, dass die Zeitstandfestigkeit um den Metallverlust zu korrigieren ist. Ein entsprechendes Korrekturverfahren wurde in [17] entwickelt, und damit eine solide Grundlage für die Auslegung von Bauteilen in einem weiten Wanddickenbereich geschaffen.

Weiter wurden sehr bald Versuche an den mischkristallverfestigenden Schmiedelegerungen X40CoCrNi20-20 (Typ S-590) und dem aufgrund seines geringeren C-Gehalts besser schweißgeeigneten X12CrCoNi21-20 (Typ N-155) initiiert und langfristig weitergeführt.

Im Rahmen der **Projektgruppe H2** wurden an den Werkstoffen NiCr20TiAl (Typ 80A), NiCr20Co18Ti (Typ 90), Typ S-590 und Typ N-155 umfangreiche Streubanddatensammlungen angelegt sowie Streubandauswertungen durchgeführt [18 bis 20] (**Bild 6**).

Weitere Untersuchungen wurden schwerpunktmäßig an den Schmiedelegerungen NiCr23Co12 Mo (Typ 617), NiCr22Mo9Nb (Typ 625), Alloy 100, Nimonic 101, Alloy U-520 und Alloy U-720 durchgeführt mit dem Ziel, deren Zeitdehngrenzen und die Zeitstandfestigkeit sowie die Zeitstandverformungseigenschaften im Temperaturbereich von 530 bis 1000 °C langfristig abzusichern. Besondere Berücksichtigung fand dabei das kerbentfestigende Verhalten im mittleren Temperaturbereich (600 bis 700 °C). Hierzu wurden Zeitstandversuche bis rd. 30.000 h bis Bruch bzw. der 1%-Zeitdehngrenze an glatten und gekerbten Proben initiiert, wobei die untersuchten Werkstoffe in der Regel ein kerbverfestigendes Verhalten zeigten.

**Bild 6.**

Zeitstandfestigkeit der Werkstoffe X40 CoCrNi20-20 (Typ S-590) sowie X12 CoCrNi20-20 (Typ N-155) [19]

Gleiches geschah mit den Versuchen an den gesenkgeschmiedeten Scheibenwerkstoffen NiCr19Fe18Nb (Typ 718), NiCr13Mo6Ti3 (Typ 901) und Waspaloy. Bei diesen Werkstoffen lag der Schwerpunkt auf der Ermittlung der 0,1 %- und 0,2 %-Zeitdehngrenzen im Temperaturbereich 500 bis 650 °C bis 10.000 h, wozu die tangential aus den Scheiben entnommenen Proben mit laufender Dehnungsmessung geprüft wurden. Anschließend wurden die Versuche bis zum Bruch gefahren.

Ab dem Jahre 1960 wurden auch gegossene Werkstoffe in das Versuchsprogramm aufgenommen. Der Schwerpunkt war hier die Ermittlung von Zeitstandfestigkeit und Zeitdehngrenzen bis herab zu 0,1 % für Feingusslegierungen im Temperaturbereich von 500 bis 1000 °C. Hierzu wurden die Versuche teilweise mit laufender Dehnungsmessung begonnen und später in der unterbrochenen Versuchstechnik weitergeführt. Die untersuchten Werkstoffe waren u. a.

- die konventionell gegossenen Nickelbasis-Feingusslegierungen Alloy 738LC, Alloy 939, Alloy 792, Alloy 713C, Alloy U-500, Alloy B-1900, Alloy 247, Alloy 247LC FK HIP für Gasturbinenschaufeln,
- die Cobaltbasis-Gusslegierungen Alloy FSX- 414, Alloy 509 und ECY-786,
- die Nickelbasis-Gusslegierungen Alloy X, Alloy 230 und Alloy 214 für heißgasführende Bauteile,
- die gerichtet erstarrten Nickelbasis-Legierungen Alloy 247LC-DS, Alloy 6203-DS, Alloy B1914-DS,
- die Einkristall-Nickelbasislegierungen der ersten Generation (z. B. CMSX-2) und der zweiten Generation (z. B. LEK 94). Bei letzterem Werkstoff handelt es sich um eine sogenannte „light-weight“-Einkristall-Legierung mit abgesenktem Rhenium-, Molybdän- und Tantalgehalt, die im Airbus 380 Einsatz gefunden hat.
- und die intermetallische Gusslegierung Gamma-TiAl.

Diese Werkstoffe zeichnen sich vor allem durch eine niedrige Dichte, gute Zeitstand- und Oxidationseigenschaften aus und werden häufig zur Gewichtseinsparung für Schaufeln und Gehäuse in stationären Gasturbinen und Fluggasturbinen eingesetzt. Ein Problem stellt allerdings die niedrige Duktilität und die daraus resultierende niedrige Fehlertoleranz dar.

Ein typisches Bild für den enormen Festigkeitsgewinn durch die sukzessive Entfernung der Korngrenzen sowie weiterer Legierungsoptimierungen zeigt **Bild 7**. Es zeigt sich, dass die gerichtet erstarrten Werkstoffe in der longitudinalen Orientierung durchaus die Festigkeitseigenschaften von Einkristall-Legierungen der ersten Generation erreichen können. Beim Werkstoff Alloy 247LC-DS fallen die Werkstoffkennwerte in der transversalen Orientierung bis zur 1%-Zeitdehngrenze kaum unter die der longitudinalen Orientierung, was bei dieser Legierung auf die Stabilisierung der Korngrenzen durch Zulegieren von Hafnium zurückzuführen ist. Die Zeitstandfestigkeit in transversaler Orientierung fällt dagegen im Vergleich zur longitudinalen Orientierung enorm ab, was zum großen Teil auf die deutlich geringere Duktilität der transversalen Orientierung zurückzuführen ist.

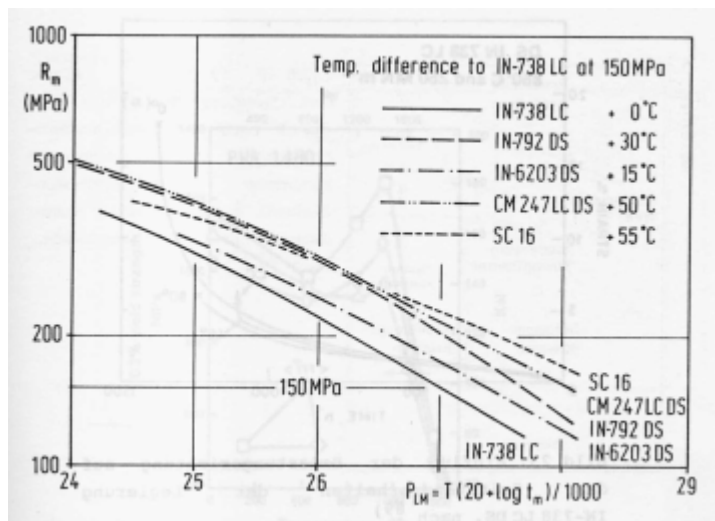


Bild 7.

Zeitstandfestigkeit einiger DS-Werkstoffe und der Einkristall-Legierung SC16 im Vergleich zur konventionell gegossenen Legierung Alloy 738LC

Über die langzeitige Absicherung des Zeitstandverhaltens hinaus erfolgten an ausgewählten Werkstoffen Untersuchungen zum LCF-Verhalten. Entsprechende niederzyklische dehnungskontrollierte Versuche wurden an der Schmiedelegierung Alloy 706 und den Gusslegierungen Alloy X und Gamma-TiAl durchgeführt [13]. Die Ergebnisse sind vor allem deshalb interessant, weil zur Auslegung und Lebensdauerüberwachung von Gasturbinenbauteilen neben den Kennwerten der statischen Hochtemperatureigenschaften auch die Kennwerte der zyklischen Werkstoffeigenschaften erforderlich sind. Es zeigte sich, dass Gamma-TiAl durchaus geeignet ist, Nickelbasis-Legierungen wie z. B. die Legierung Alloy 738LC in Bezug auf die Zeitstandeigenschaften zu ersetzen (**Bild 8**), allerdings ergaben sich relativ starke Abschläge in der LCF-Lebensdauer besonders bei Raumtemperatur, was auf die niedrige Duktilität zurückzuführen ist (**Bild 9**).

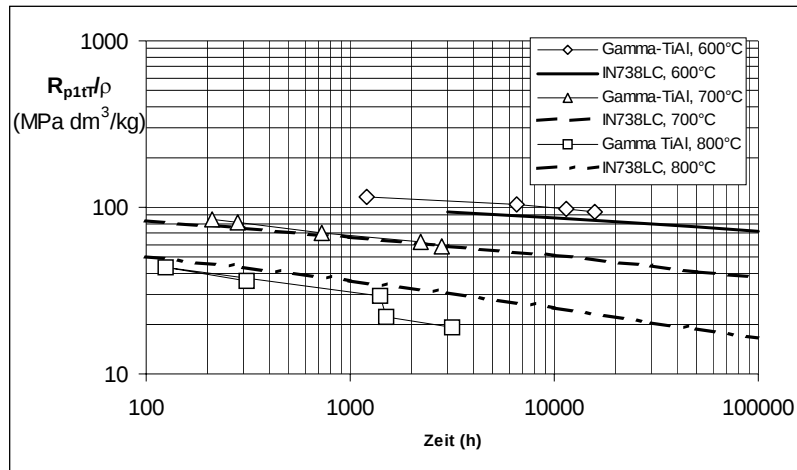


Bild 8.
Vergleich der dichtekorrigierten 1% Zeitdehngrenzen von Gamma-TiAl im Vergleich zur konventionell gegossenen Legierung Alloy 738LC

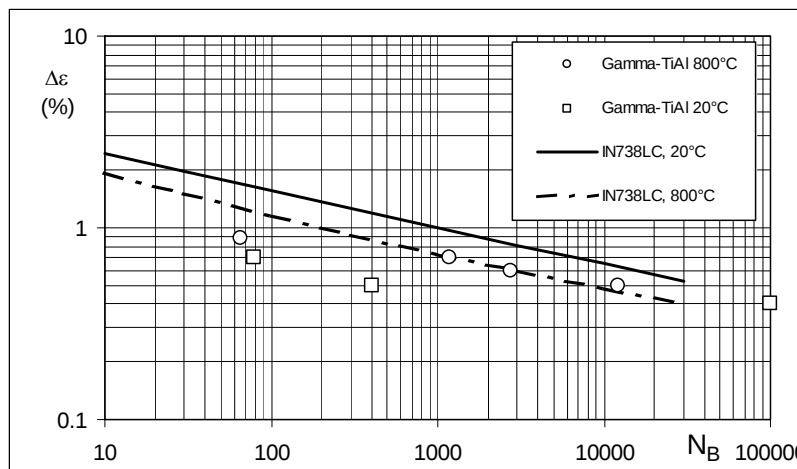


Bild 9.
Vergleich der LCF-Eigenschaften von Gamma-TiAl im Vergleich zur konventionell gegossenen Legierung Alloy 738LC [33]

Im Rahmen der **Projektgruppe H3** untersuchte man zunächst den Einfluss von Oberflächenschutzmaßnahmen auf das Zeitstandverhalten hochwarmfester Nickellegierungen. An seinerzeit aktuellen Grundwerkstoff-Schutzschicht-Kombinationen wurden Zeitstandversuche an Voll- und Hohlproben durchgeführt. Bei den Grundwerkstoffen handelte es sich um Alloy 738 LC, Alloy 939, Alloy 100 und Alloy U-520 mit folgenden Schutzschichten: TEW-Inchromierung, LDC-2, ES-Aufdampfschicht, Alitierung und Plasmaschicht [21].

Vor dem Hintergrund komplex beanspruchter Bauteile wurde weiter der Frage nachgegangen, inwieweit sich die Wirkung eines Korrosionsmediums unter Zeitstand- und LCF-Beanspruchung im Vergleich zu Untersuchungen an Luft auswirkt [22 bis 24]. Metallographische Untersuchungen an unbeschichteten Proben aus Alloy 738LC sowie mit PtAl-Diffusionsschicht bzw. CoCrAlY-Auflageschicht beschichteten Proben zeigen, dass starker korrosiver Angriff an den Korngrenzen und weitverzweigte Rissnetzwerke bei LCF stärker die Lebensdauer verringern als unter Zeitstandbeanspruchung. Dagegen zeigte sich dies bei betriebsähnlichen Korrosionsbedingungen nicht, und die Schutzschichten zeigten kein vorzeitiges Versagen. Hier sind demnach neben Abschlagsfaktoren für Verzunderung und Korrosion keine Beeinträchtigungen der Festigkeitskennwerte zu berücksichtigen.

In die Untersuchungen mit einbezogen waren seinerzeit beispielsweise auch die gerichtet erstarrte Legierung Alloy 738 LC DS, die ODS-Werkstoffe MA 6000 und MA 754 sowie die hochentwickelten einkristallinen Flugturbinenschaufelwerkstoffe vom Typ M 002 mod, B 1914 und CMSX-6 [25].



Bild 10.

Gegossene Gasturbinenschaufel mit keramischer Wärmedämmschicht

In Fortführung dieser Arbeiten auch an anderen Stellen wurde das Verhalten von MCrAlY-beschichteten Proben in Ermüdungsversuchen sowie thermomechanischen (TMF) Ermüdungsversuchen untersucht [26]. In jüngster Zeit wurden diese systematischen Experimente auf keramische Wärmedämmschichtsysteme (**Bild 10**) und in unterschiedlichen Zyklen für stationäre Gasturbinen und Flugturbinen ausgedehnt.

Im Vorhaben P 195 [27, 28] wurden u. a. Feingusslegierungen wie die gerichtet erstarrte Nickelbasislegierung Alloy 6203-DS in Längs- und Querrichtung untersucht. Ziel der Untersuchung war die Klärung der Frage der Wirkung einer gerichteten Erstarrung auf das Zeitstandverhalten. Weiter wurde das Langzeitverhalten des vielfach eingesetzten Schaufelwerkstoffes Alloy 738LC ohne und mit Chromierung bis zu maximalen Temperaturen von 1000 °C betrachtet.

Die hieraus resultierenden Versuchsergebnisse wurden in eine Reihe von weiteren Forschungsvorhaben übernommen, die zwischen 1989 und 1993 am Institut für Werkstoffkunde der TU-Darmstadt durchgeführt wurden [29 bis 33]. Außerdem wurden hier die Werkstoffdaten der Projektgruppe H2 sowie die Ergebnisse von Privatversuchen der Industriepartner gesammelt und ausgewertet.

Ziel war die Erstellung langfristig abgesicherter Streuband-Datensammlungen für die Zeitdehngrenzen und die Zeitstandfestigkeit über einen möglichst breiten Temperaturbereich (**Tabelle 7**). Hierzu wurden die Daten der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe sowie der Industriepartner durch Versuche im Rahmen der Forschungsprogramme ergänzt, Beispiel **Bild 11**. Weiterhin wurden die Warmzugversuche ausgewertet und die plastische Dehnung durch neu entwickelte Gleichungen beschrieben. Für Werkstoffe, die Kontraktionsdehnung zeigen, wurde diese anhand spannungsfrei durchgeführter Glühversuche ermittelt.

Die Streuband-Datensammlungen wurden für eine Reihe von Zeitdehngrenzen erstellt (in der Regel 0,02 %, 0,05 %, 0,1 %, 0,2 %, 0,5 %, 1 %, 2 %, 5 % und Bruch) und auf der Basis von Zeittemperatur-Parametern ausgewertet (Beispiele: Bilder 6 und 7). Dies lässt sich vorteilhaft mit dem in [31, 34] entwickelten Programm DESA (**Bild 12**) durchführen.

Tabelle 7. Übersicht über die Streuband-Datensammlungen, Anzahl der Schmelzen und erreichte Laufzeiten

Werkstoffsorte	Herstellart	Prüftemperatur von/bis (°C)	Anzahl der erfassten Versuchswerkstoffe für die Streubandauswertung				Längste erreichte Laufzeiten (h)
			Zeitstandversuche von			Glühversuche IfW	
			IfW	AGH	Industriepartnern		
Alloy 718	Schmiedewerkstoffe	500/650	2	1	-	2	100000
Alloy 101		550/900	1	1	5	4	102000
Alloy 617		550/1000	2	1	12	5	106000
Alloy U-720		550/900	1	1	1	1	86000
Alloy FSX-414	Feingusslegierungen	550/900	4	2	4	3	99000
Alloy U-500		600/800	1	2	3	1	90000
Alloy 713C (LC)		700/1000	2	-	4	3	92000
Alloy 100		700/1000	8	-	8	5	53000
Alloy 738LC		550/1000	10	6	16	11	110000
Alloy 939		550/1000	8	1	15	6	103000
Alloy 247LC FK HIP		700/1000	4	-	-	1	48000
CMSX-2		800/1000	1	-	-	1	44000
Alloy 6203-DS		600/1000	2	1	1	1	25000
Alloy B-1914-DS		700/1000	1	-	-	1	68000

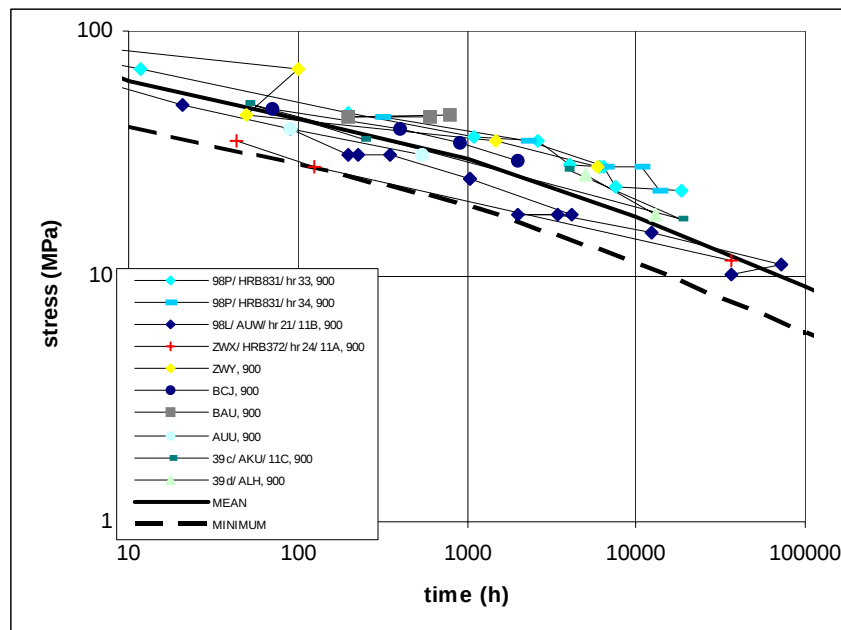
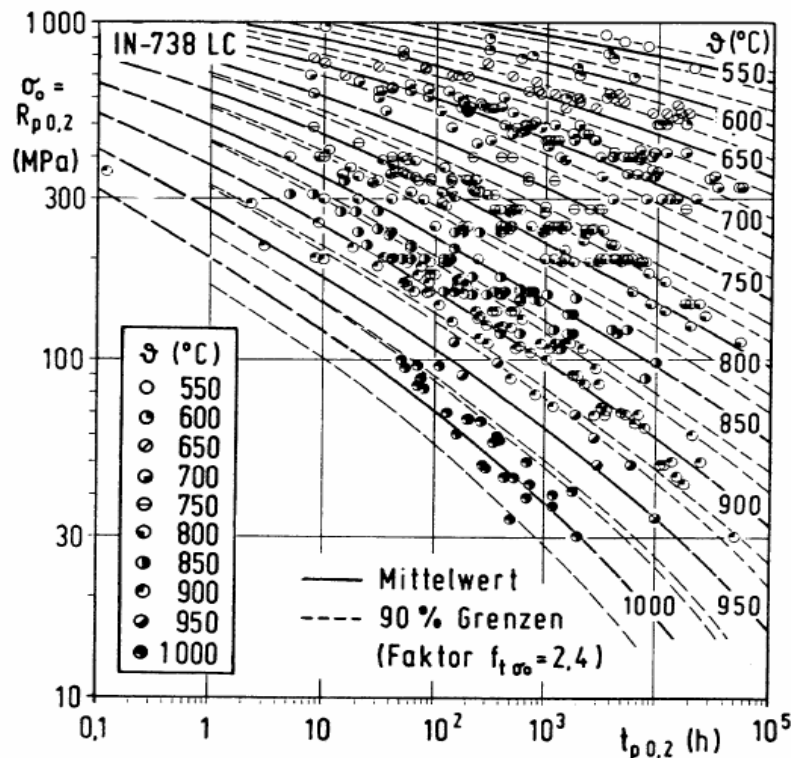


Bild 11. Isotherme Zeitdehngrenze von Alloy 617 bei 900°C

Die so erzeugten Mittelwerte der Zeitdehngrenzen wurden durch Kriechgleichungen approximiert, die bereits zuvor für ausgewählte Einzelwerkstoffe der Werkstoffsorten auf der Basis einer modifizierten Garofalo-Beziehung entwickelt worden waren. Daraus resultierten Kriechgleichungen für Werkstoffsorten, die in FE-Programmen angewendet werden konnten.

**Bild 12.**

Isotherme 0,2%-Zeitdehn-
Grenze für Alloy 738LC [32]

In einem weiteren am Institut für Werkstoffkunde der TU Darmstadt durchgeführten Vorhaben wurde u. a. der Einfluss der Korngröße auf das Zeitstandverhalten an der Werkstoffen Alloy U-520 bei 850°C und Alloy 738LC (Temperaturbereich 530 bis 850 °C) untersucht [35, 36]. Dabei wurde nur ein geringer und uneinheitlicher Einfluss der Korngröße festgestellt. Größere Fehlstellen oder Lunker wirkten sich festigkeitsmindernd aus, Mikroporen dagegen nicht. Außerdem wurde bei der Grobkornvariante des Werkstoffs IN 738 LC bei 650 °C ein leicht kerbentfestigendes Verhalten beobachtet. Die Feinkornvariante zeigte dieses Verhalten dagegen nicht.

Die Nickelbasislegierungen NiCr20Fe25TiAl (Typ 70), NiCr20TiAl (Typ 80A) und NiCr15TiAl (Typ X-750) wurden in [37] auf ihre Eignung und Optimierbarkeit als Schraubenwerkstoff für Dampfturbinen im Temperaturbereich 450 bis 600°C untersucht. Durch Variation der Wärmebehandlung wurde dabei versucht, die teilweise gegenläufigen Werkstoffeigenschaften optimale auf unterschiedliche Anforderungsprofile abzustimmen. Diese Arbeiten wurden im Rahmen von COST 501 und COST 505 durchgeführt und in der Projektgruppe W11 (Relaxationsverhalten) der Arbeitsgemeinschaft für Warmfeste Stähle diskutiert.

Die Relaxation von Schraubenverbindungen lässt sich langfristig mithilfe von Schraubenverbindungsmodellen untersuchen, wie dies beispielsweise für eine Reihe von warmfesten Stählen in [38] erfolgte und ebenso auch für Nickelbasislegierungen möglich ist.

6. Europäische Zusammenarbeit

Die Europäische Arbeitsgemeinschaft „European Creep Collaborative Committee“ (**ECCC**) wurde unter maßgeblicher Beteiligung von J. Ewald (früher Siemens AG) und D. Thornton (jetzt Alstom) Anfang der 90er Jahre gegründet. In unterschiedlichen Arbeitsgruppen (**Tabelle 8**) wurden im Rahmen von jeweils mehrjährigen Arbeitsprogrammen Fragestellungen zum Kriechverhalten, zur Harmonisierung von Prüfverfahren und Auswertemethoden auf den Gebieten Kriechen und Rissverhalten sowie zu Schweißverbindungen angegangen [39]. Eine enge Zusammenarbeit besteht zwischen der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe und den Arbeitsgruppen 3B, 3C und 4.

Tabelle 8. Arbeitsgruppen und Arbeitsgebiete der Europäischen Arbeitsgemeinschaft ECCC

Arbeitsgruppe	Arbeitsgebiete
WG 1	Datenermittlung, Erarbeitung von Empfehlungen für Prüfverfahren und Auswertungsmethoden
WG 2	Veröffentlichungen über die Arbeit der ECCC-Arbeitsgruppen
WG 3A	Ferritische Stähle, moderne Werkstoffe vom Typ P91, P92, u.a.
WG 3B	Austenitische Stähle für Dampfkessel, Wärmetauscher und Dampfleitungen in Kraftwerken, Komponenten in Chemieanlagen und kerntechnischen Anlagen
WG 3C	aktuelle und zukünftige Werkstoffe im Gasturbinenbau
WG 4	Harmonisierung von Auswertungsmethoden für mehraxial beanspruchte Bauteile und Probekörper

7. Fortschritte der Prüftechnik

Die Entwicklung der Hochtemperaturprüftechnik geht einher mit zunehmenden Anforderungen an Umfang und Detaillierungsgrad der Kenntnisse zum Werkstoffverhalten seitens Bauteilberechnung und Simulation, die sich zunehmend verfeinerter Verfahren und Methoden bedient. Art und Umfang der Messungen und Flexibilität der Untersuchungen im Hinblick auf die Nachbildung komplexer Beanspruchungsmuster durch Probekörper mit bauteilnaher Geometrie werden in zunehmendem Maße durch den Einsatz von Prozessoren gelöst.

Aus den Prüfstellen kamen entscheidende Impulse für die Weiterentwicklung der Prüftechnik u. a. bei der Temperaturmessung und Dehnungsmesstechnik sowie der Verbundprüftechnik im Bereich kleiner Dehnungen in Einzelprüfmaschinen und Fortsetzung des Versuchs in Vielprobenprüfmaschinen [40, 41]. Diese Erkenntnisse flossen in die Arbeiten zur Harmonisierung von Prüf- und Auswertungsverfahren im Rahmen der ECCC und schließlich der Normung ein. Hier seien die DIN-Norm für den Zeitstandversuch DIN 50118 und die darauf aufbauende Norm DIN EN 10291 genannt, die unter maßgeblicher Beteiligung von J. Granacher / IfW Darmstadt, der Projektgruppe W13 „Prüftechnik und Auswertungsfragen“ und dem entsprechenden Spiegelgremium WG 1 der ECCC entstanden. Die Arbeiten wurden vom Normenausschuss NMP 143 im DIN unter Federführung von A. Wehrstedt betreut. Die derzeit in der Überarbeitung befindliche ISO-Norm 204 (Metallic Materials – Uniaxial

Creep Testing in Tension – Method of Test) wird auf den unterbrochenen Zeitstandversuch erweitert und berücksichtigt auch die im Rahmen einer ECCC-Untersuchung entwickelte Europäische Kerbprobe [42].

Vor dem Hintergrund steigender Bauteiltemperaturen und entsprechender Prüftemperaturen ergaben sich auch zunehmende Anforderungen an die Temperaturmessung mit geeigneten Thermoelementen sowie an die Messung der Verformung, für die anstelle der früher üblichen Messeinsätze aus Platin heute Messeinsätze aus Keramik verwendet werden [40, 41].

Ringversuche stellen ein wichtiges Instrument zum Abgleich der Prüfverfahren in Prüflabors dar. So wurde beispielsweise im Jahre 1983 ein Ringversuch durch KWU und NEI-Parsons initiiert, um den Prüfstellen- und Probenherstellungseinfluss auf das Kerbzeitstandverhalten von Alloy 80 A zu untersuchen. In diesem Zusammenhang sei auch auf einen internationalen Ringversuch hingewiesen, der unter der Führung der British Steelmakers Creep Committee durchgeführt wurde. Am Beispiel eines 1%CrMoV-Stahles sowie des 17%CrNiMo-Stahles wurden Daten aus mehr als 35 Labors gegenübergestellt [41]. Schließlich sei auch auf einen Ringversuch zum LCF-Verhalten hingewiesen [43], der im Rahmen der Arbeitsgemeinschaften betreut wurde und Ergebnisse auch aus einem früheren internationalen VAMAS-Ringversuch gegenüberstellt. In beiden Fällen zeigte sich, dass sich die Einzelergebnisse der Prüfstellen im Streuband sehr gut einordneten.

8. Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe werden in enger Koordination mit der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle langfristig ausgerichtete Untersuchungen zu den unterschiedlichsten Werkstoffen und deren Schweißverbindungen, ergänzt um Fragestellungen zu Korrosionsschutzschichten, seit nunmehr 5 Jahrzehnten erfolgreich durchgeführt.

Durch die Arbeit der Arbeitsgemeinschaft gelang es, die Entwicklung der Werkstoffe voranzutreiben und in nachhaltiger Modernisierung und Anpassung der Prüftechnik langzeitige, verlässliche Kennwerte für das Langzeitverhalten bei hohen Temperaturen zu generieren und darüber hinaus in Forschungsvorhaben vertiefte Kenntnisse zu erlangen. Die Arbeit der Arbeitsgemeinschaft wird im Rahmen von Spiegelgremien der Europäischen Arbeitsgemeinschaft ECCC auf europäischer Ebene begleitet mit dem Ziel der Harmonisierung der Prüf- und Auswertungsmethoden zum Zeitstand-, Riss- und mehraxialen Verhalten bei hohen Temperaturen sowie der Schaffung von Kennwerten für Werkstoffnormen.

Wertvolle Langzeitdaten von Schmiede- und Gusslegierungen stehen in einer modernen Datenbank zur Verfügung mit direktem Zugriff durch die Mitgliedsfirmen der Arbeitsgemeinschaft. Zusammenfassend betrachtet, handelt es sich um ein weltweit einmaliges Konzept zur Schaffung verlässlicher Auslegungskennwerte unter aktiver Beteiligung aller betroffenen Industriegruppen.

Literatur

- [1] Kobayashi, T., Y. Koizumi, et. Al.: Design of a Third Generation DS Superalloy TMD-103, in: Lecomte-Beckers, J., F. Schubert, Ph. J. Ennis: (Hrsg.): Materials for Advanced Power Engineering, Proc. of Liege Conf., Lüttich, Belgien, 5.-7. Okt. 1998, Teil II, S. 1079/1087, Forschungszentrum Jülich GmbH 1998.
- [2] Kern, T.-U., H.-J. Wieland: Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle – Aufgaben und Ziele der Gemeinschaftsarbeit, 25. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Nachrichten aus dem Fachbereich Werkstofftechnik, Prüftechnik, Sonderheft Nr. 2/2002, Düsseldorf: Stahlinstitut VDEh, 2002.
- [3] Ewald, J., W. Bendick, K. Jäger, G. Gnirß, R.-U. Husemann, K.-H. Mayer, B. Melzer und E. Tolksdorf: Fünf Jahrzehnte Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle – Notwendige Auslegungsdaten für den langfristig sicheren Betrieb bei hoher Temperatur-, 21. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Tagungsband, Düsseldorf: Stahlinstitut VDEh, 1998, S. 27/38.
- [4] Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe – Aufgabenstellungen im Wandel der technischen Anforderungen, VDEh, Düsseldorf, März 1979.
- [5] Rohde, W. (Ed.): Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle, Arbeitsgemeinschaft für Hochtemperaturwerkstoffe - Richtlinien für die Untersuchungen in den Arbeitsgemeinschaften, Stahlinstitut VDEh (Hrsg.), 5. Ausgabe, Mai 2001, unveröffentlicht.
- [6] Ergebnisse Deutscher Zeitstandversuche langer Dauer, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1969.
- [7] Dathe, G., W. Rohde: Dokumentation von Zeitstanddaten und Vorbereitung zur Auswertung mit dem Programmsystem ZSF, 15. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Tagungsband, Düsseldorf, VDEh, 1992, S. 1/12.
- [8] Linn, S., M. Schvienheer, A. Scholz, C. Berger, U. Stegemann und A. Pleiner: EDV-System langzeitige Stahlanwendung „Lambda“, 28. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Tagungsband, Düsseldorf: Stahlinstitut VDEh, 2005, S. 5/14.
- [9] Brill, U.: Hochtemperaturwerkstoffe, Historische Entwicklung, Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten unter besonderer Berücksichtigung der Gasturbine, Habilitationsschrift (1998).
- [10] Granacher, J.: Zeitstandverhalten von hitzebeständigen Werkstoffen für Ofeneinbauten der Erdölchemie, Arch. Eisenhüttenwes. 47 (1976) Nr. 12, S. 745/750.
- [11] Brill, U.: Neue Ergebnisse mit dem Werkstoff Nicrofer 6025 HT im Ofen- und Wärmebehandlungsanlagenbau, Stahl (1999), Heft 3, S. 54/56.
- [12] Steinkusch, W.: Hitzebeständiger Stahlguss für Wärmebehandlungsanlagen, Gas Wärme International 36 (1987) Heft 6, S. 340/350.
- [13] Scholz, A., M. Monsees, U. Brill und J. Sundermann: LCF-Verhalten einiger hochwarmfester Werkstoffe, 23. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf, 2000, S. 115/130.

- [14] Diehl, H.: Auswertungen zur Zeitstandfestigkeit des Stahles X10NiCrAlTi32-20 unter Berücksichtigung metallurgischer Einflussgrößen, 9. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf, 1986, S. 16/23.
- [15] Diehl, H.: Langzeitverhalten von Alloy 800 im kaltverformten Zustand, Vortrag auf der 13. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe am 30. November 1990 in Düsseldorf, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf, 1990, S. 108/17.
- [16] Bendick, W.; Weber, H.: Werkstoffeigenschaften warmfester ferritischer und austenitischer Stähle nach Kaltumformung, 10. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf, 1987, S. 5/13.
- [17] Kloos, K. H., J. Granacher und A. Holdinghausen: Einfluss der Zunderung auf das Zeitstandverhalten hitzebeständiger Stähle, Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 24 (1993) 440-445.
- [18] Jakobeit, W.: Warmfestigkeit von Nimonic 80A und Nimonic 90; BBC-Untersuchungsbericht Nr. 75 220 vom 10.02.1971.
- [19] Ergebnisse deutscher Zeitstandversuche langer Dauer an den hochwarmfesten Legierungen X 40 CoCrNi 20 20 (Typ S-590) und X 12 CrCoNi 21 20 (Typ N-155), Bericht FVHT/FVV Nr. 2-87, Düsseldorf, Aug. 1987.
- [20] Bürgel, R.: Long-term creep behavior of austenitic steel S-590 (X 40 CoCrNi 2020), Mat.-wiss. und Werkstofftech., 23 (1992) S. 287/92, siehe auch: Bürgel, R., W. Jakobeit, Langzeitkriechverhalten der Legierung S-590 bis 200000h, 11. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf, 1988, S. 82/106.
- [21] Ebeling, W., J. Granacher und K. E. Hagedorn: Wirkung von Oberflächenschutzmaßnahmen auf hochfeste Gasturbinenwerkstoffe, Teil 1: Beeinflussung des Zeitstandverhaltens, 9. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf, 1986, S. 60/67.
- [22] Kloos, K. H., J. Granacher and H. Demus: Creep Rupture Strength of Cast Alloys for Gas Turbine Blades Under Hot Gas Corrosion, European Symposium on the Interaction between Corrosion and Mechanical Stress at High Temperatures, 13. - 14.05.1980, Petten, The Netherlands, eds.: V. Guttman und M. Merz, Appl. Sci. Publ., London, 1981, pp. 243/55.
- [23] Kloos, K. H., J. Granacher and U. Struth: Environmental effects and protection - combined stress-environmental effects, High Temperature Alloys for Gas Turbines, Eds.: Betz, W. et al., D. Reidel Publ. Comp. Dordrecht, 1986, Part II, pp. 1279/93.
- [24] Lugscheider, E., U. Müller, A. Holdinghausen: Hochtemperatureigenschaften von MCrAlY(Ti,Hf) beschichtetem Ventilstahl X 45 CrSi 9 3 bei 600 und 700°C, Mat.-wiss. und Werkstofftech. 24 (1993) S. 397/403.
- [25] Kloos, K.H., J. Granacher und M. Maier: Zeitstandverhalten einiger fortschrittlicher Schaufelwerkstoffe für Industriegasturbinen, Mat.-wiss. und Werkstofftech. 25 (1994) S. 273/83.
- [26] Kloos, K.H., J. Granacher und H. Kirchner: Mechanisches Verhalten des Schutzschicht-Grundwerkstoff-Verbundes von Gasturbinenschaufeln unter betriebsähnlicher zyklischer Beanspruchung, Mat.-wiss. und Werkstofftech. 25 (1994) S. 209/17.
- [27] Forschungsvorhaben P195 - Bewertung der Zeitstandfestigkeit von Stählen für den Einsatz bei erhöhten Temperaturen, Stiftung Stahlanwendungsforschung/ Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl, Düsseldorf, 7/1989 bis 6/1993.

- [28] Schubert, J.: Einfluss der Legierungszusammensetzung auf das Zeitstandverhalten der austenitischen Stahlgussorten GX5CrNiNb19-11 und GX5CrNiMoNb19-11-2, Forschungsprogramm P195, 23. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf, 2000, S. 146/55.
- [29] Granacher J., H. Bartsch: Ermittlung und Beschreibung des Langzeitkriechverhaltens hochwarmfester Gasturbinenwerkstoffe, FVV-Forschungsberichte, Heft 344, (1982).
- [30] Granacher J., T. Preussler: Langzeitkriechverhalten hochwarmfester Gasturbinenwerkstoffe unter konstanter und veränderlicher Beanspruchung, FVV-Forschungsberichte Heft 393 (1985).
- [31] Granacher J., T. Preussler: Numerische Beschreibung des Kriechverhaltens hochwarmfester Legierungen, FVV-Forschungsberichte, Heft 375 (1988).
- [32] Granacher J., T. Preussler: Rechnergestützte Beschreibung des Kriechverhaltens ausgewählter hochwarmfester Legierungen, Heft 534 (1991).
- [33] Granacher J., A. Pfenning: Optimierung und Verifizierung von Kriechgleichungen für Hochtemperaturwerkstoffe, FVV-Forschungsberichte, Heft 592 (1994).
- [34] Granacher, J., M. Monsees, P. Hillenbrand and C. Berger: Software for the assessment and application of creep and rupture data, Nuclear Engineering and Design - Special Issue on SMIRT 1997, Post Conference Seminar No. 13.
- [35] Kloos, K.H. und O. Jahr: Feingusslegierungen, FVV Forschungsberichte, Heft 286, 1980.
- [36] Wiegand H., O. Jahr: Langzeiteigenschaften einiger warmfester und hochwarmfester Werkstoffe (Teil 2) - Ergebnisse aus Festigkeitsuntersuchungen bei verschiedenen Temperaturen, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, No. 6, 1976, S. 212/219.
- [37] Kloos, K. H., J. Granacher, K. Löser: Mechanisches Verhalten von Nickelbasislegierungen für Dampfturbinenverschraubungen, 11. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf, 1988, S. 171/83.
- [38] Granacher, J., B. Kaiser, P. Hillenbrand und V. Dünkel: Relaxation von hochfesten Schraubenverbindungen bei mäßig erhöhten Temperaturen, Konstruktion 47, Springer Verlag (1995) S. 318/24.
- [39] Coordination of Advanced Creep Activities to Improve Safety and Durability of High Temperature Plant Materials, „European Creep Collaborative Committee” (ECCC), <http://www.ommi.co.uk/etd/eccc/advancedcreep/int.html>.
- [40] Kloos, K. H., J. Granacher, A. Scholz und R. Tscheuschner: Prüfung metallischer Werkstoffe bei hohen Temperaturen, Teil 1: Warmzugversuch und Zeitstandversuch in Einzel- und Vielprobenprüfmaschinen, Materialprüf. 30 (1988) S. 93/98.
- [41] Kloos, K. H., J. Granacher, A. Scholz und R. Tscheuschner: Prüfung metallischer Werkstoffe bei hohen Temperaturen, Teil 2: Besondere Probleme des Zeitstandsversuchs und Entspannungsversuchs, Materialprüf. 30 (1988), S. 151/55.
- [42] Scholz, A., M. Schwenheer, P. F. Morris: European Notched Test piece for Creep Rupture Testing, 21. Vortrags- und Diskussionstagung des Stahlinstituts VDEh und des DVM, Werkstoffprüfung 2003 „Herausforderung durch den industriellen Fortschritt“, 04. und 05. Dezember 2003, Bad Neuenahr, Tagungsband, O. W. Buchholz, S. Geisler (Hrsg.), S. 308/14.
- [43] Scholz, A.: Results of a Low Cycle Fatigue Inter-Laboratory Comparison on 1 CrMoNiV Rotor Steel, 19. Vortragsveranstaltung Langzeitverhalten warmfester Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf, 1996, S. 51/63.

