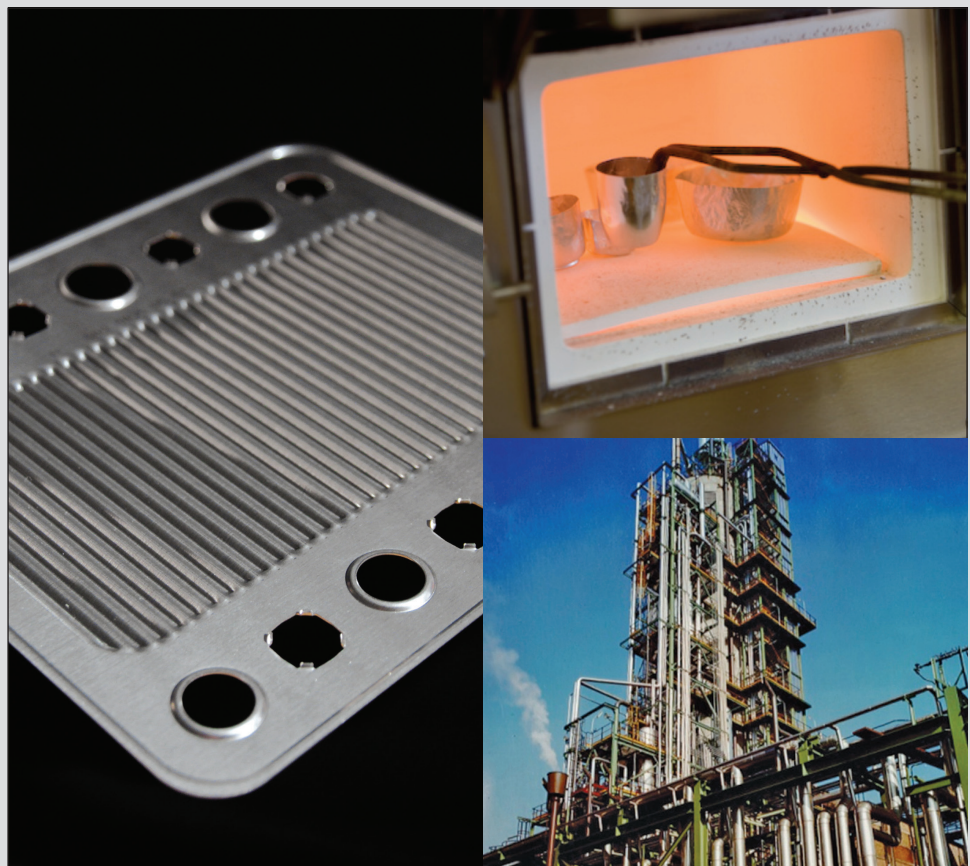


Merkblatt 987

Nichtrostende und hitzebeständige Stähle bei hohen Temperaturen



Die Informationsstelle Edelstahl Rostfrei

Die Informationsstelle Edelstahl Rostfrei (ISER) ist eine Gemeinschaftsorganisation von Unternehmen und Institutionen aus den Bereichen:

- Edelstahlherstellung,
- Edelstahlhandel und Anarbeitung,
- Edelstahlverarbeitung,
- Oberflächenveredelung,
- Legierungsmittelindustrie,
- Marktforschung und Verlage
für nichtrostende Stähle.

Die Aufgaben der ISER umfassen die firmenneutrale Information über Eigenschaften und Anwendungen von Edelstahl Rostfrei. Schwerpunkte der Aktivitäten sind

- praxisbezogene, zielgruppenorientierte Publikationen,
- Online-Informationsplattform unter www.edelstahl-rostfrei.de,
- Pressearbeit für Fach- und Publikumsmedien,
- Messebeteiligungen,
- Durchführung von Schulungsveranstaltungen,
- Errichtung von Kompetenzzentren „Edelstahl-Rostfrei-Verarbeitung“,
- Informationen über Bezugsmöglichkeiten von Produkten aus Edelstahl Rostfrei,
- individuelle Bearbeitung technischer Anfragen.

Alle ISER Publikationen stehen zum kostenfreien Download unter www.edelstahl-rostfrei.de/publikationen zur Verfügung.

Impressum

Merkblatt 987
Nichtrostende und hitzebeständige Stähle bei
hohen Temperaturen
1. Auflage 2020

Herausgeber:

Informationsstelle Edelstahl Rostfrei
Postfach 10 22 05 - 40013 Düsseldorf
Telefon: 0211 / 67 07 - 836
Telefax: 0211 / 67 07 - 344
Internet: www.edelstahl-rostfrei.de
E-Mail: info@edelstahl-rostfrei.de

Autoren:

Dr. Georg Uhlig,
Jürgen Rütters,
Axel Vogel,
Cronicon GmbH, Krefeld (D)

Der Inhalt der vorliegenden Broschüre leitet sich ab aus der Euro-Inox-Publikation „Stainless Steels at High Temperatures“. Autorin: Alenka Kosmač, Brüssel (B); Übersetzung und Bearbeitung der englischen Sprachfassung: Thomas Pauly, Viersen (D)

Titelfotos:

links: Stahl-Informations-Zentrum, Düsseldorf (D)
oben rechts: Acroni, Jesenice (SI)
unten rechts: Centro Inox, Mailand (I)

Die in dieser Broschüre enthaltenen Informationen vermitteln Orientierungshilfen. Gewährleistungsansprüche können hieraus nicht abgeleitet werden. Nachdrucke bzw. Veröffentlichungen im Internet, auch auszugsweise, sind nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers und mit deutlicher Quellenangabe gestattet.

Inhalt

1	Einführung	2
2	Die Rolle der Legierungselemente	3
3	Die Rolle der Gefügestruktur	4
4	Mechanische Eigenschaften bei hohen Temperaturen	8
4.1	Kriechfestigkeit	8
4.2	Zeitstandfestigkeit	9
4.3	Kurzzeit-Zugfestigkeit	12
4.4	Duktilität	12
4.5	Thermische Ermüdung	13
4.6	Temperaturgradienten	13
4.7	Einfluss der Kaltverfestigung auf die Eigenschaften	15
5	Gefügestabilität	16
6	Widerstand gegen Hochtemperatur-Korrosion	18
6.1	Oxidation	18
6.2	Sulfidierung	20
6.3	Aufkohlung und Aufstickung	21
6.4	Korrosion durch Halogengase	23
7	Umformverhalten und Wärmebehandlung	24
8	Konstruktion für verbesserten Oxidationswiderstand	24
9	Auswahl der Legierung	25
9.1	Temperatur	25
9.2	Atmosphäre und Verbrennungsgase	25
10	Anwendungen	27
11	Kostenbetrachtung	30
12	Zusammenfassung	31
	Literaturverzeichnis	32

1. Einführung

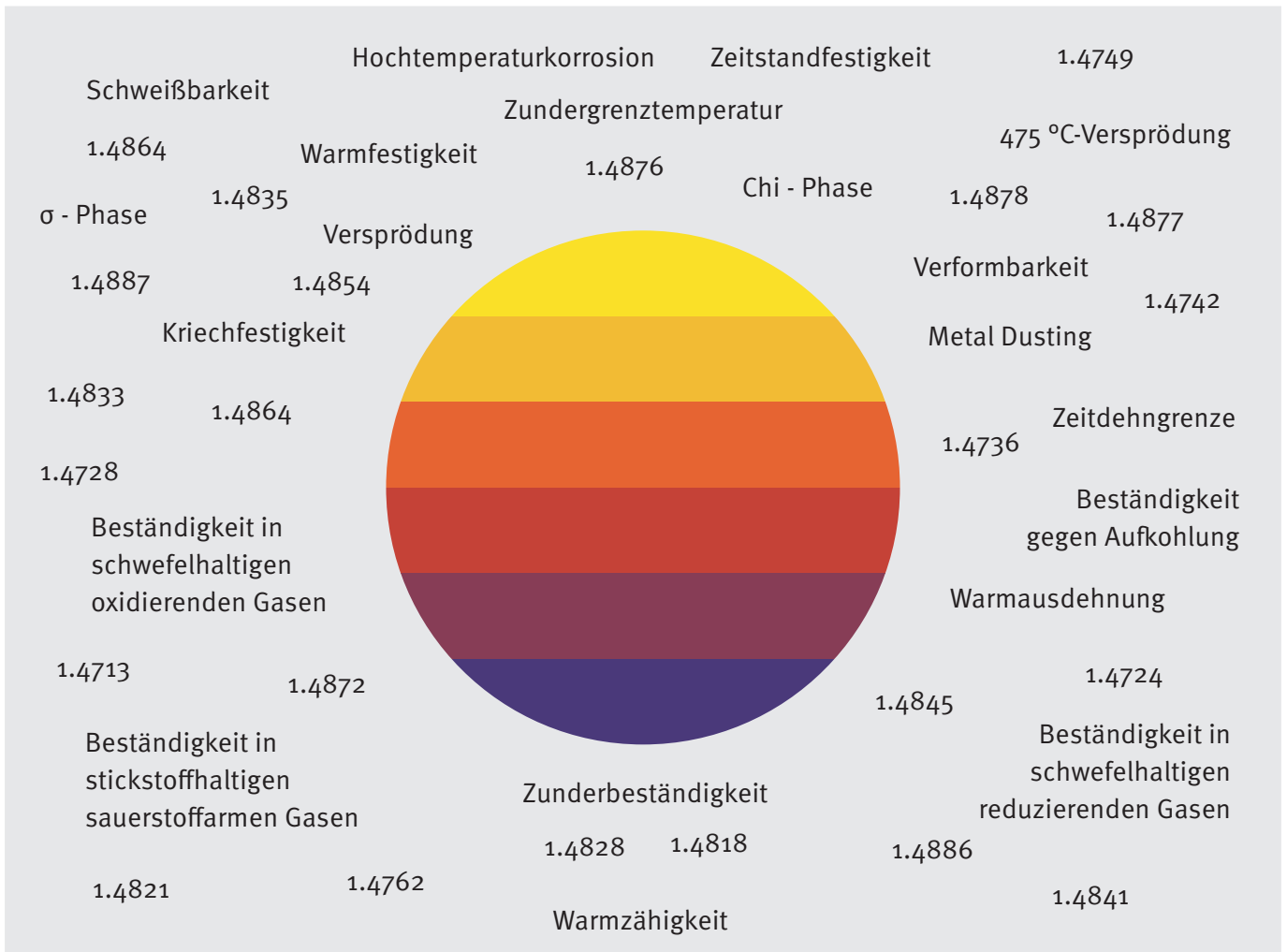
Nichtrostende Stähle werden vor allem wegen Ihres Widerstands gegen Korrosion in wässrigen Medien eingesetzt, werden aber auch häufig bei höheren Temperaturen angewendet, wenn unlegierte oder niedriglegierte Stähle nicht die erforderliche Korrosionsbeständigkeit und/oder Festigkeit aufweisen. Als hitzebeständig gelten Stähle, die bei guten mechanischen Eigenschaften bei Kurz- und Langzeitbeanspruchung aufgrund ihres erhöhten Legierungsgehaltes an Chrom, Nickel, Silizium und Aluminium besondere Beständigkeit gegen die Einwirkung heißer Gase und Verbrennungsprodukte sowie Salz- und Metallschmelzen bei Temperaturen etwa oberhalb von 500 °C aufweisen. Sie können in Anwendungen gefunden werden, die Hochtemperatur-Oxidationsbeständigkeit oder Hochtemperatur-Festigkeit erfordern [1].

Bild 1:
Dimensionen der Werkstoffentscheidung nichtrostender und hitzebeständiger Stähle

Konstruktionswerkstoffe werden in vielen industriellen, technischen Anwendungen einer hohen Temperatur ausgesetzt, manchmal in Verbindung mit einer aggressiven Umgebung. In Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen können die folgenden Anforderungen an den Werkstoff bei hoher Temperatur gestellt werden:

- hohe Kriechfestigkeit (und/oder Zähigkeit)
- gute Beständigkeit gegen Verzunderung und Hochtemperatur-Korrosion
- Gefügestabilität
- guter Widerstand gegen Erosionskorrosion

Die Werkstoffauswahl sollte für jeden Einzelfall aufgrund der spezifischen Anwendung und der Betriebsbedingungen erfolgen [2].



2. Die Rolle der Legierungselemente

Legierungen für Hochtemperatur-Anwendungen sind so aufgebaut, dass sie schützende Zunderschichten bilden können. Die einzigen Oxide, welche die Anforderungen für eine schützende Zunderschicht erfüllen, sind Chromoxid (Cr_2O_3), Aluminiumoxid (Al_2O_3) und Siliziumoxid (SiO_2).

Die Wirkung von Chrom ist bei Temperaturen oberhalb von 500 °C besonders offensichtlich. Dieses Element bildet eine dichte, festhaftende Schicht aus einem chromreichen Oxid auf der Oberfläche des Metalls, welche die Diffusion des Sauerstoffs in das Innere des Werkstoffs verzögert und den weiteren Fortschritt der Reaktion unterbindet [3].

Andere Elemente außer Chrom können ebenfalls zur Verbesserung der Zunderbeständigkeit hinzugefügt werden. Silizium und Aluminium wirken sehr ähnlich wie Chrom. Sie oxidieren selektiv und können, sofern in ausreichender Menge vorhanden, durchgehende Schichten aus SiO_2 und Al_2O_3 bilden.

Bei den ferritischen hitzebeständigen Stählen wird Aluminium in Abhängigkeit vom Chromgehalt mit einer Konzentration bis zu 2,1 % hinzugefügt. Die austenitischen hitzebeständigen Werkstoffe enthalten dagegen einen erhöhten Siliziumgehalt bis max. 2,5 %.

Die Haftung der Zunderschicht kann durch geringe Zugaben von seltenen Erden wie Cer oder Lanthan deutlich verbessert werden [4]. Dies ist besonders hilfreich bei Anwendungen mit zyklischer thermischer Beanspruchung [5]. Cer wird unter anderem bei dem austenitischen hitzebeständigen Werkstoff 1.4835 bis max. 0,08 % sowie einigen weiteren austenitischen hitzebeständigen Stählen hinzugefügt.

Nickel verbessert die Zähigkeit, die Hochtemperaturfestigkeit und den Widerstand gegen Aufkohlung und Aufstickung. Hoch nickelhaltige Legierungen sollten in reduzierenden, sulfidierenden Umgebun-

gen vermieden werden, um die Bildung von niedrigschmelzendem Nickelsulfid zu verhindern. Nickel wirkt der Bildung von Sigmaphase entgegen, kann aber die Neigung einer Legierung zur Bildung von Sigmaphase nicht völlig unterbinden.

Ein höherer Stickstoff- und Kohlenstoffgehalt verbessert die Kriechfestigkeit. Molybdän erhöht die Zeitstandfestigkeit und ist üblicherweise auf max. 3,0 % begrenzt. Ein höherer Molybdängehalt kann ernsthafte Oxidationsprobleme hervorrufen und die Bildung von Sigmaphase begünstigen, sofern nicht durch austenitbildende Elemente wie Nickel entgegengewirkt wird.

Titan in kleinen Mengen von 0,3 bis 0,7 % erhöht die Festigkeit in austenitischen Legierungen. Dasselbe gilt auch für Niob. Beide fördern die Bildung von Sigmaphase. Bor erhöht die Zeitstandfestigkeit und wird in vergleichsweise kleinen Konzentrationen zugesetzt, typischerweise 0,002 %. Dieses auf Zwischen-gitterplätzen gelöste Element hat die Neigung, sich an den Korngrenzen zu konzentrieren [2].



Bild 2:
Chromeisenerz,
Dyne-Mine, Neu-Kaledonien (Foto: Ecole des Mines de Paris, Paris (F))

3. Die Rolle der Gefügestruktur

Die Gefügestruktur ist weniger bedeutend für die Hitzebeständigkeit als die chemische Zusammensetzung oder die geeignete Auswahl der Legierungselemente. Allerdings ist sie für den Einsatz bei erhöhten Temperaturen aus anderen Gründen bedeutsam. Die Sorten gewalzter nichtrostender Stähle und Nickelbasis-Legierungen für Produkte, bei denen die Hauptanforderung in der Beständigkeit gegenüber

heißen Gasen und Verbrennungsprodukten oberhalb von 500 °C liegt, werden in der europäischen Norm DIN EN 10095 „Hitzebeständige Stähle und Nickellegierungen“ spezifiziert [6]. Diese Norm umfasst 6 ferritische Sorten (Tabelle 1), 14 austenitische, hitzebeständige Sorten (Tabelle 2) und einen hitzebeständigen Duplexstahl (Tabelle 3).

Werkstoff-Nr.	Kurzname	C	Si	Mn (max.)	Cr	Al	Sonstige
1.4713	X10CrAlSi7	max. 0,12	0,5–1,0	1,0	6,0–8,0	0,5–1,0	
1.4724	X10CrAlSi13	max. 0,12	0,7–1,4	1,0	12,0–14,0	0,7–1,2	
1.4742	X10CrAlSi18	max. 0,12	0,7–1,4	1,0	17,0–19,0	0,7–1,2	
1.4762	X10CrAlSi25	max. 0,12	0,7–1,4	1,0	23,0–26,0	1,2–1,7	
1.4749	X18CrN28	0,15–0,20	max. 1,0	1,0	26,0–29,0		N: 0,15–0,25
1.4736	X3CrAlTi18-2	max. 0,04	max. 1,0	1,0	17,0–18,0	1,7–2,1	0,2+4 x (C+N) < Ti < 0,80

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung von ferritischen hitzebeständigen Stählen in Masse-% [6]

Werkstoff-Nr.	Kurzname	C	Si	Mn (max.)	Cr	Ni	Sonstige
1.4878	X8CrNiTi18-10	max. 0,10	max. 1,0	2,0	17,0–19,0	9,0–12,0	Ti: 5xC < Ti < 0,8
1.4828	X15CrNiSi20-12	max. 0,20	1,5–2,5	2,0	19,0–21,0	11,0–13,0	
1.4835	X9CrNiSiNce21-11-2	0,05–0,12	1,4–2,5	1,0	20,0–22,0	10,0–12,0	Ce: 0,03–0,08 N: 0,12–0,20
1.4833	X12CrNi23-13	max. 0,15	max. 1,0	2,0	22,0–24,0	12,0–14,0	
1.4845	X8CrNiSi25-21	max. 0,10	max. 1,5	2,0	24,0–26,0	19,0–22,0	
1.4841	X15CrNiSi25-21	max. 0,20	1,5–2,5	2,0	24,0–26,0	19,0–22,0	
1.4864	X12NiCrSi35-16	max. 0,15	1,0–2,0	2,0	15,0–17,0	33,0–37,0	
1.4876	X10NiCrAlTi32-21	max. 0,12	max. 1,0	2,0	19,0–23,0	30,0–34,0	Al: 0,15–0,60 Ti: 0,15–0,60
1.4877	X6NiCrNbCe32-27	0,04–0,08	max. 0,3	1,0	26,0–28,0	31,0–33,0	Al: max. 0,025 Ce: 0,05–0,10 Nb: 0,60–1,00
1.4872	X25CrMnNiN25-9-7	0,20–0,30	max. 1,0	8,0–10,0	24,0–26,0	6,0–8,0	N: 0,20–0,40
1.4818	X6CrNiSiNce19-10	0,04–0,08	1,0–2,0	1,0	18,0–20,0	9,0–11,0	Ce: 0,03–0,08 N: 0,12–0,20
1.4854	X6NiCrSiNce35-25	0,04–0,08	1,2–2,0	2,0	24,0–26,0	34,0–36,0	Ce: 0,03–0,08 N: 0,12–0,20
1.4886	X10NiCrSi35-19	max. 0,15	1,0–2,0	2,0	17,0–20,0	33,0–37,0	
1.4887	X10NiCrSiNb35-22	max. 0,15	1,0–2,0	2,0	20,0–23,0	33,0–37,0	Nb: 1,00–1,50

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung von austenitischen hitzebeständigen Stählen in Masse-% [6]

Werkstoff-Nr.	Kurzname	C	Si	Mn (max.)	Cr	Ni
1.4821	X15CrNiSi25-4	0,10-0,20	0,8-1,5	2,0	24,5-26,5	3,5-5,5

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung von hitzebeständigem Duplexstahl in Masse-% [6]

In Abhängigkeit von Zeit und Temperatur kann jedes Metall einer Veränderung der Gefügestruktur unterliegen. Bei nichtrostenden Stählen können diese Veränderungen zu thermischer Erweichung, Karbidausscheidung (Chromverarmung) oder Versprödung führen [8].

Die 475 °C-Versprödung tritt im Temperaturbereich von 350-550 °C bei den **ferritischen Chromstählen** mit einem Chromgehalt über 15 % auf. Ferritische Chromstähle mit einem Chromgehalt von 10,5-12,5 % sind dagegen kaum betroffen. Oberhalb von ca. 550 °C können dagegen ferritische Chromstähle ohne Gefährdung eingesetzt werden. Ein Grund hierfür ist, dass die 475 °C-Versprödung durch eine Wärmebehandlung bei höherer Temperatur wieder rückgängig gemacht werden kann. Der Widerstand einiger ferritischer Güten gegenüber atmosphärischer Korrosion und Hochtemperatur-Oxidation sowie ihre vergleichsweise niedrigen Kosten erklären, warum diese Güten in großem Umfang in Abgassystemen von Automobilen zur Anwendung kommen [7]. Die hochlegierten Chromstähle mit

23-27 % Chrom weisen durch ihren hohen Chromgehalt eine ausgezeichnete Zunderbeständigkeit an Luft bei hohen Temperaturen auf. Weitere Einzelheiten zur Gefügestabilität werden später in dieser Publikation erläutert. Mindest-Betriebstemperaturen zur Vermeidung von Versprödung sind in einigen Fällen einzuhalten.

Bild 3 vermittelt einen groben Eindruck von den Vorteilen nichtrostender Stähle bei der Warmfestigkeit im Vergleich zu kohlenstoffarmen unlegierten Stählen. Ferritische Güten zeichnen sich nicht durch eine hohe Festigkeit bei hoher Temperatur aus. Die Hochtemperatur-Festigkeit der ferritischen und martensitischen nichtrostenden Stähle ist vergleichsweise niedrig gegenüber den austenitischen Güten.

Martensitische nichtrostende Stähle werden als kriechbeständige Stähle in den europäischen Normen DIN EN 10088-1 [9] und DIN EN 10302 [10] aufgeführt. Durch ihren niedrigen Chromgehalt (maximal 12,5 %) sind sie nicht vorzugsweise als hitzebeständige Güten gekennzeichnet, sondern

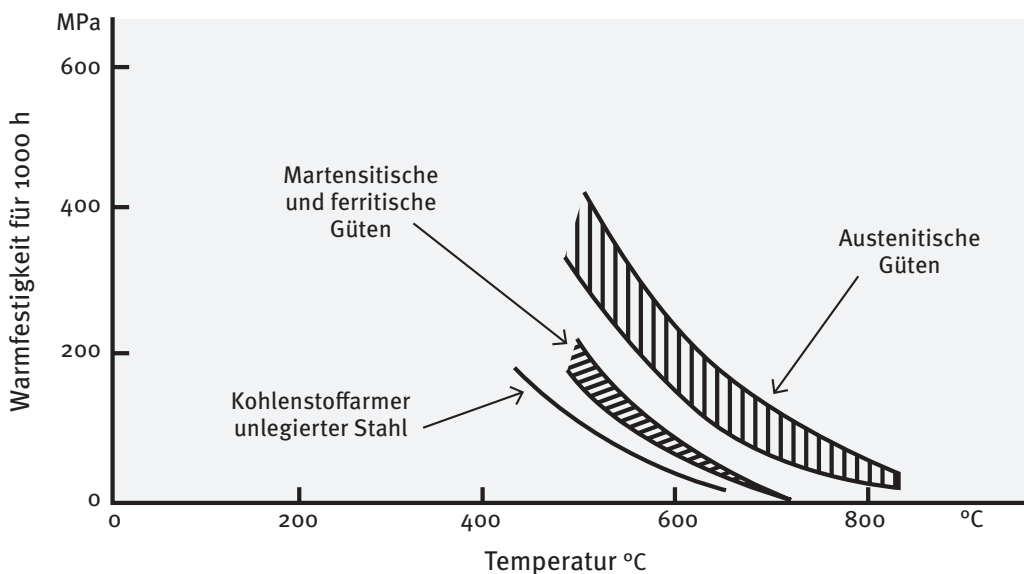


Bild 3: Allgemeiner Vergleich der Hochtemperatur-Eigenschaften von austenitischen, martensitischen und ferritischen nichtrostenden Stählen mit kohlenstoffarmem unlegierten Stahl [8]

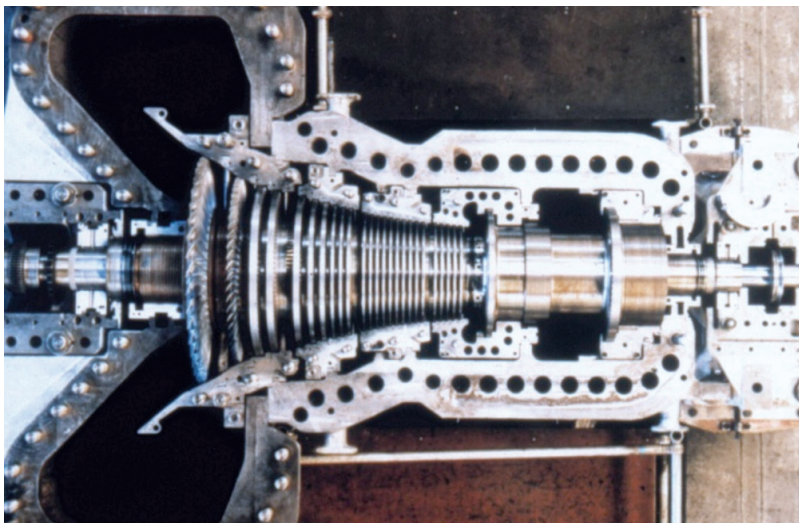
werden überwiegend für solche Anwendungen ausgewiesen, die hohe Zugfestigkeit, Kriech- und Dauerfestigkeit in Verbindung mit hinreichender Korrosionsbeständigkeit und Hitzebeständigkeit bis zu ungefähr 650 °C erfordern. Martensitische nichtrostende Stähle werden zur Optimierung der mechanischen Eigenschaften nach dem Härten angelassen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass bei einer Einsatztemperatur oberhalb der Anlasstemperatur diese Eigenschaften negativ beeinflusst werden. Martensitische Stähle mit niedrigem oder mittlerem Kohlenstoffgehalt werden überwiegend in Dampfturbinen, Flugzeugtriebwerken und Gasturbinen eingesetzt.

Bild 4:
Halbschalen und Rotor einer Dampfturbine. Der Rotor besteht aus martensitischem nichtrostendem Stahl, der für den Einsatz bei erhöhten Temperaturen geeignet ist (Foto: Centro Inox, Mailand (I))

Austenitische nichtrostende Stähle liefern nach den Nickelbasis-Legierungen die beste Kombination aus Hochtemperatur-Korrosionsbeständigkeit und Hochtemperatur-Festigkeit von allen Legierungsgruppen. Aus diesem Grund sind eine Vielzahl von besonders hitzebeständigen austenitischen Güten in der Norm DIN EN 10095 [6] und besonders kriechbeständigen austenitischen Güten in der Norm DIN EN 10302 [10] aufgeführt. Hitzebeständige austenitische Güten sind bevorzugte metallische Werkstoffe für Hochtemperatur-Anwendungen.

Nichtrostende Duplexstähle haben eine gemischte ferritische und austenitische Struktur. Ihre Dehngrenze liegt im geglühten Zustand im Bereich von 550 bis 690 MPa und damit beträchtlich höher als bei ferritischen und austenitischen Vergleichswerkstoffen. Trotz ihrer vergleichsweise hohen Festigkeit bei Raumtemperatur neigen Duplexgüten zu Versprödung und Verlust der mechanischen Eigenschaften, besonders der Zähigkeit, bei längerer Auslagerung unter hoher Temperatur. Als Folge daraus werden nichtrostende Duplexstähle nur bedingt für Hochtemperatur-Anwendungen empfohlen, da oberhalb von 300 °C verschiedene Versprödungsmechanismen auftreten können. Im Temperaturbereich von 350-550 °C sind Duplexstähle aufgrund ihres ferritischen Gefügeanteils durch 475 °C-Versprödung gefährdet. Zwischen 600 °C und ca. 900 °C besteht die Gefahr einer Sigma-Phasenversprödung. Der Hochtemperatur-Einsatzbereich von Duplexstählen begrenzt sich daher auf 900-1100 °C im Dauerbetrieb. Neuere Untersuchungen bestätigen, daß Duplex-Güten im höheren Temperaturbereich einen etwas stärkeren Festigkeitsverlust erleiden als vergleichbare austenitische Güten. Dennoch ist selbst im Hochtemperaturbereich die absolute Festigkeit immer noch ähnlich wie bei austenitischen Güten. Die höchste Einsatztemperatur hängt deshalb von den mechanischen Eigenschaften ab (z.B. bei Druckbehältern) und erfordert eine Qualifizierung für den ausgewählten Stahl.

Ausscheidungshärtende nichtrostende Stähle (PH = precipitation hardening) sind Chrom-Nickel-Güten, deren Festigkeit durch eine Alterungsbehandlung im mittleren Temperaturbereich erhöht werden kann. Diese Stähle verfügen im gealterten Zustand nur über eine begrenzte Verwendbarkeit für den Hochtemperatur-Einsatz, da sie bei Temperaturen oberhalb von 425 °C deutlich an Festigkeit verlieren. Sie werden deshalb hier nicht weiter diskutiert.



Standardgüten für die Korrosionsbeständigkeit in wässrigen Medien können ebenso im Temperaturbereich oberhalb von 500 °C angewendet werden, wenn die Korrosionsbeständigkeit von großer Bedeutung ist. Diese Stahlgüten werden in den Normen DIN EN 10088-1 [9] und DIN EN 10028-7 [13] aufgeführt und unten in **Tabelle 4** dargestellt.

Der Temperaturbereich, in denen die obengenannten nichtrostenden Stähle angewendet werden, ist etwas niedriger als bei Stahlgüten, die speziell auf Hitzebeständigkeit legiert und dafür ausgewiesen sind. Man sollte berücksichtigen, dass die maximale Betriebstemperatur für wechselnden oder kontinuierlichen Betrieb unterschiedlich hoch ist.

Die im Kapitel Gefügestabilität diskutierten Versprödungsmechanismen sind zu beachten, da sie üblicherweise bereits unter der maximalen Betriebstemperatur einsetzen. Unstabilisierte Austenite werden im Temperaturbereich zwischen 600-750 °C durch Chromkarbidausscheidungen auf den Korngrenzen sensibilisiert. Dies kann durch Wahl eines stabilisierten austenitischen Werkstoffes vermieden werden.

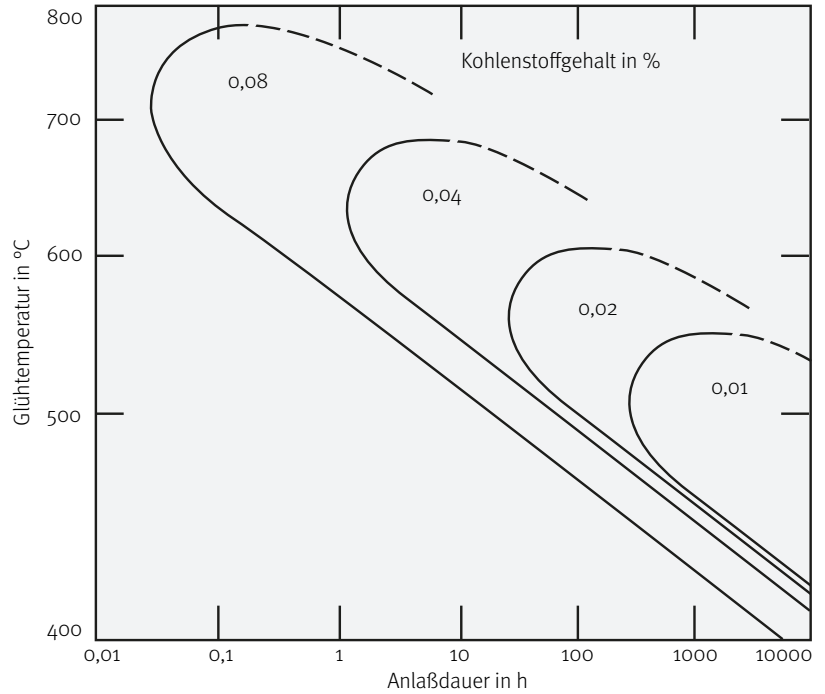


Bild 5: Einfluß von Kohlenstoff auf die Sensibilisierung von ungestabilisierten austenitischen Werkstoffen [34]

Stähle aus DIN EN 10088-1		Stähle aus DIN EN 10028-7	
Werkstoff-Nr.	Kurzname	Werkstoff-Nr.	Kurzname
1.4512	X2CrTi12		
1.4510	X3CrTi17	1.4510	X3CrTi17
1.4509	X2CrTiNb18	1.4509	X2CrTiNb18
1.4301	X5CrNi18-10	1.4301	X5CrNi18-10
		1.4948	X6CrNi18-10
1.4541	X6CrNiTi18-10	1.4541	X6CrNiTi18-10
		1.4941	X7CrNiTiB18-10
		1.4950	X6CrNi23-13
		1.4951	X6CrNi25-20
1.4362	X2CrNi23-4	1.4362	X2CrNi23-4

Tabelle 4: Auswahl von Werkstoffen aus DIN EN 10088-1 und DIN EN 10028-7, die zusätzlich zur DIN EN 10095 im Temperaturbereich oberhalb von 500 °C verwendet werden

4. Mechanische Eigenschaften bei hohen Temperaturen

Bei hohen Temperaturen erfahren Metalle unter Spannung eine elastische sowie plastische Verformung. Die Zeit wird deshalb zu einem kritischen Faktor und konventionelle Zugversuche liefern nicht die Kennwerte, die für eine konstruktive Berechnung nützlich sind. Die erforderlichen Kennwerte geben die Belastung an, welche nicht mehr als eine zulässige prozentuale Dehnung bei einer spezifizierten Temperatur über einer vorgegebenen Prüfdauer erbringt. Hochtemperatur-Festigkeitseigenschaften beinhalten deshalb stets die Einflussgrößen Prüfdauer, Verformung, Spannung und Temperatur [14].

Die Festigkeit von Werkstoffen bei hoher Temperatur wird nicht in derselben Weise gemessen wie bei Raumtemperatur. Für Anwendungen bei Raumtemperatur benötigt der Konstrukteur die Zugfestigkeit, Dehngrenze oder Härte. Wenn der Werkstoff höheren Temperaturen ausgesetzt ist, wird die Kriech- oder Zeitstandfestigkeit zur wichtigsten mechanischen Kenngröße [15].

Zeitstandfestigkeit:

Mechanische Anfangsspannung, die bei einem Werkstoff nach einer bestimmten Beanspruchungsdauer und bei konstanter Temperatur oberhalb der Übergangstemperatur unter konstanter Zugkraft zum Bruch führt.

Zeitdehngrenze:

Ist die Anfangsspannung, die bei einer vorher festgelegten Temperatur und Beanspruchungsdauer unter konstanter Zugbeanspruchung zu einer bestimmten plastischen Dehnung führt.

4.1 Kriechfestigkeit

Werkstoffe verhalten sich bei hohen Temperaturen völlig anders als bei Raumtemperatur. Wenn ein Metallstab bei Raumtemperatur bis unterhalb der Dehngrenze belastet wird, kann die Last dort nahezu unbegrenzt belassen werden. Er wird nicht versagen, außer er korrodiert oder es tritt Spannungsrisskorrosion auf.

Bei hohen Temperaturen beginnt der Werkstoff langsam zu kriechen. Er dehnt sich weiter, bis er schließlich bricht [15]. Die Geschwindigkeit in % pro Stunde, mit dem sich ein Werkstoff dehnt, wird Kriechgeschwindigkeit genannt. Die Hochtemperatur-Festigkeit wird generell ausgedrückt als Kriechfestigkeit und bezeichnet die Fähigkeit, einer Verformung bei einer langzeitigen Einwirkung unter hoher Temperatur zu widerstehen. Kriechen erfolgt in den meisten Anwendungen, wenn die Werkstofftemperatur 500 °C überschreitet. Mit der Zeit kann das Kriechen zu einer ausgeprägten Verformung und sogar zum Bruch führen, und zwar bei Spannungen deutlich unter denen bei Raumtemperatur oder bei Kurzzeit-Warmzugversuchen. Üblicherweise ist es zufriedenstellend, wenn das Kriechen nicht 1 % Verformung in 10.000 Stunden überschreitet. Dies bedeutet aber nicht in jedem Fall, dass diese Kriechgeschwindigkeit über weitere 10.000 Stunden ohne Versagen ertragen wird.

Kriecheneigenschaften unter konstanten Belastungs- und Temperaturbedingungen können für Berechnungen angewendet werden. Sicherheitsfaktoren sollten aber in jedem Fall eingebaut werden. Der Sicherheitsfaktor hängt davon ab, wie kritisch die Anwendung ist [14]. Von den verschiedenen Sorten der nichtrostenden Stähle weisen die Austenite die höchste Kriechfestigkeit auf.

Eine üblicherweise angewendete Berechnungskennzahl für die Spannung von gleichmäßig erhitzten Bauteilen, die nicht einer thermischen oder mechanischen Schockbeanspruchung ausgesetzt sind, beträgt 50 % der Spannung zur Erzeugung von 1 % Kriechen in 10.000 Stunden. Sie sollte jedoch mit Sorgfalt verwendet und mit dem Lieferanten abgestimmt werden [16]. Ein übliches Kriterium ist auch die Belastung, die zu einem Bruch nach 100.000 Stunden führt, verbunden mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5. Zur Orientierung werden Kriecheneigenschaften in den **Tabellen 5 und 6** (Seite 10/11) angegeben.

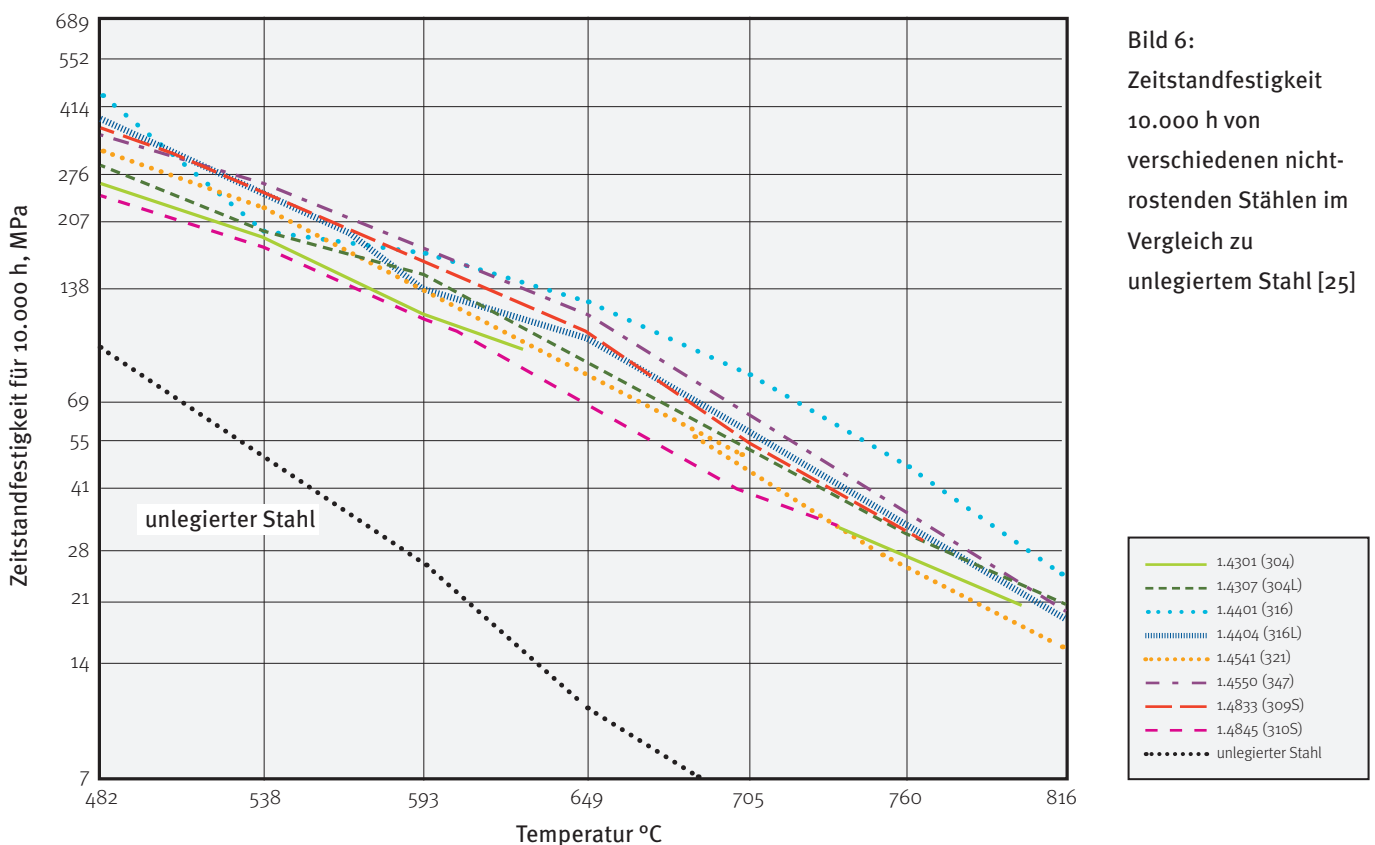
4.2 Zeitstandfestigkeit

Zeitstandfestigkeitswerte, die unter konstanter Last bei konstanter Temperatur bestimmt wurden, sind nützlich bei der Abschätzung der Lebensdauer eines Werkstoffs (Zeit bis zum Bruch) unter speziellen Bedingungen und auch zum Vergleich verschiedener Legierungen. Sie dienen als zusätzliche Information zu Kriechfestigkeitswerten bei der Auswahl von hitzebeständigen Werkstoffen.

Es sollte berücksichtigt werden, dass Langzeit-Kriech- und Zeitstandwerte (z.B. 100.000 h) häufig von Kurzzeit-Versuchen extrapoliert werden, die bei hohen Spannungen durchgeführt wurden. Beträchtliche Streuungen der Versuchsergebnisse können beobachtet werden, selbst bei einer einheitlichen

Schmelze einer Legierung. Deshalb können extrapolierte Werte für die Kriech- und Zeitstandfestigkeit unzuverlässig sein. Typischerweise kann die Variation bei der Spannung $\pm 20\%$ betragen. Differenzen können häufig auf Unterschiede zum Beispiel in der Anlassbehandlung und der Korngröße zurückgeführt werden. Selbst Versuche mit der längstmöglichen Dauer sollten deshalb mit Vorsicht bewertet werden.

Das tatsächliche Werkstoffverhalten kann auch deshalb schwer vorhergesagt werden, weil die tatsächlichen Betriebsspannungen von den idealisierten, gleichförmigen Belastungsbedingungen in standardisierten Versuchen abweichen. Einflüsse wie zyklische Belastung, Temperaturschwankung und Werkstoffverlust durch Korrosion können ebenfalls beeinflussen, wie sich ein Werkstoff im Einsatz verhält [3, 17].



Werkstoff-Nr.	Zeitstandfestigkeit R _m (N/mm ²) 1.000 h						Zeitstandfestigkeit R _m (N/mm ²) 10.000 h						Zeitstandfestigkeit R _m (N/mm ²) 100.000 h					
	Temperatur °C						Temperatur °C						Temperatur °C					
	500	600	700	800	900	1000	500	600	700	800	900	1000	500	600	700	800	900	1000
1.4713	160	55	17	7,5	3,6	-	100	35	9,5	4,3	1,9	-	55	20	5	2,3	1	-
1.4724																		
1.4742																		
1.4762																		
1.4749																		
1.4736																		
1.4878	-	200	88	30	-	-	-	142	48	15	-	-	-	65	22	10	-	-
1.4828	-	190	75	35	15	-	-	120	36	18	8,5	-	-	65	16	7,5	3	-
1.4835	-	238	105	50	24	12*)	-	157	63	27	13	7*)	-	88	35	15	8	4*)
1.4833	-	190	75	35	15	-	-	120	36	18	8,5	-	-	65	16	7,5	3	-
1.4845	-	170	80	35	15	-	-	130	40	18	8,5	-	-	80	18	7	3	-
1.4841	-	170	90	40	20	5	-	130	40	20	10	-	-	80	18	7	3	-
1.4864	-	180	75	35	15	-	-	125	45	20	8	-	-	75	25	7	3	1,5
1.4876	-	200	90	45	20	-	-	152	68	30	10	-	-	114	48	21	8	-
1.4877	-	-	-	-	-	-	-	175	80	24	10	3,5*)	-	140	52	16	5	1,5*)
1.4872	-	-	80	26	11	-	-	-	45	12	5	-	-	-	-	-	-	-
1.4818	-	238	105	46	18	7*)	-	157	63	25	10	4*)	-	88	35	14	5	1,5*)
1.4854	-	200	84	41	22	12	-	127	56	28	15	8	-	80	36	18	9,2	4,8
1.4886	-	190	80	43	22	-	-	130	55	26	13	-	-	-	-	-	-	-
1.4887	-	190	80	43	22	-	-	130	55	26	13	-	-	-	-	-	-	-
1.4821	160	55	17	7,5	3,6	-	100	35	9,5	4,3	1,9	-	-	-	-	-	-	-

*) Der Wert ist über die Zeit und/oder die Spannung extrapoliert

Tabelle 5:

Kriechigenschaften – Anhaltswerte für die Zeitstandfestigkeit bei hohen Temperaturen nach DIN EN 10095 [6]

Werkstoff-Nr.	1 %-Zeitdehngrenze (N/mm ²) 1.000 h						1 %-Zeitdehngrenze (N/mm ²) 10.000 h						1 %-Zeitdehngrenze (N/mm ²) 100.000 h						
	Temperatur °C						Temperatur °C						Temperatur °C						
	500	600	700	800	900	1000	500	600	700	800	900	1000	500	600	700	800	900	1000	
1.4713	80	27,5	8,5	3,7	1,8	-	50	17,5	4,7	2,1	1,0	-	-	-	-	-	-	-	
1.4724																			
1.4742																			
1.4762																			
1.4749																			
1.4736																			
1.4878	-	110	45	15	-	-	-	85	30	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4828	-	120	50	20	8	-	-	80	25	10	4	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4835	-	170	66	31	15,5	8*)	-	126	45	19	10	5*)	-	80	26	11	6	3*)	-
1.4833	-	100	40	18	8	-	-	70	25	10	5	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4845	-	100	45	18	10	-	-	90	30	10	4	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4841	-	105	50	23	10	3	-	95	35	10	4	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4864	-	105	50	25	12	-	-	80	35	15	5	-	-	40	14	4	1,5	-	-
1.4876	-	130	70	30	13	-	-	90	40	15	5	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4877	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4872	-	-	55	15	4	-	-	-	34	8	2	-	-	-	-	-	-	-	-
1.4818	-	147	61	25	9	2,5*)	-	126	42	15	5	1,7*)	-	80	26	9	3	1,0*)	-
1.4854	-	150	60	26	12,5	6,5	-	88	34	15	8	4,5	-	52	21	9,7	5,1	3,0	-
1.4886	-	110	60	25	12	-	-	60	35	20	10	4*)	-	-	-	-	-	-	-
1.4887	-	110	60	25	12	-	-	60	35	20	10	4*)	-	-	-	-	-	-	-
1.4821	80	27,5	8,5	3,7	1,8	-	50	17,5	4,7	2,1	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-

*) Der Wert ist über die Zeit und/oder die Spannung extrapoliert

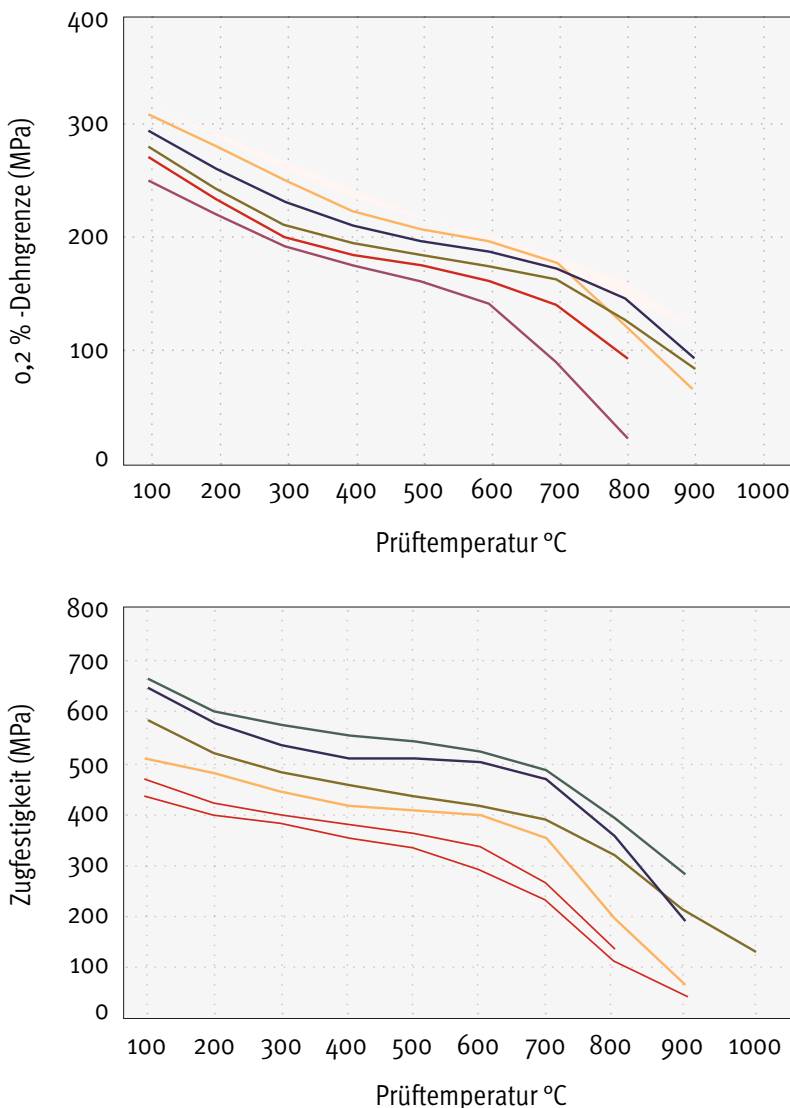
Tabelle 6:

Kriechigenschaften – Anhaltswerte für die 1 % Zeitdehngrenze bei hohen Temperaturen nach DIN EN 10095 [6]

4.3 Kurzzeit-Zugfestigkeit

Historisch betrachtet ist der Kurzzeit-Zugversuch die angewendete Methode zur Untersuchung der Hochtemperatur-Eigenschaften von Metallen und Legierungen gewesen. Mit dieser Methode werden die Kennwerte für die Warmdehngrenze und Warmfestigkeit ermittelt. Während diese Versuche für Konstruktionszwecke weitestgehend durch Langzeit-Kriech- und Zeitstandversuche abgelöst wurden, liefern sie dennoch nützliche Kennwerte für eine erste Einschätzung. Hochtemperatur-Zugversuche verlaufen ähnlich wie Zugversuche bei Raumtemperatur. Üblicherweise ist die Probe von einem elektrischen Widerstandsofen umgeben, um sie während

Bild 7:
Warmdehngrenzen
und Warmfestigkeiten
verschiedener Werk-
stoffe bei höheren
Temperaturen [35]



der Belastung auf der konstanten ausgewählten Temperatur zu halten. Die Dehngeschwindigkeit ist dabei eine der bedeutenden Einflussgrößen [3]. Die dabei erhaltenen Kennwerte liegen bis zu fünf- oder sechsmal höher als die Kriechfestigkeit und überschätzen damit die Belastbarkeit bei einer Langzeitbeanspruchung beträchtlich. Ergebnisse aus Hochtemperatur-Zugversuchen können hilfreich bei der Abschätzung des Widerstands gegen kurzfristige Überlasten sein und sind deshalb in einigen Spezifikationen enthalten.

Oberhalb von 500 °C können die Dehngrenze und Zugfestigkeit nicht als Grundlage für Konstruktionsberechnungen verwendet werden.

4.4 Duktilität

Ein genauer Vergleich der Warmzähigkeit von hitzebeständigen Werkstoffen ist schwierig, da es keinen allgemein anerkannten Vergleichsversuch gibt. Die Bruchdehnungswerte von Kriech- und Zeitstandversuchen werden häufig als Kriterium herangezogen. Ebenso wird die Bruchdehnung aus Kurzzeit-Zugversuchen üblicherweise in Spezifikationen als Indikator für die Hochtemperatur-Zähigkeit verwendet. Unter vielen Betriebsbedingungen mit Unsicherheiten über die tatsächliche Spannung, Temperatur und Festigkeit kann es wichtig sein, dass das Versagen nicht ohne Warnung erfolgt und dass das Metall seine hohe Zähigkeit während der Betriebsdauer behält. In der chemischen und petrochemischen Industrie zum Beispiel erfordern druckbeanspruchte Rohrleitungen eine hohe Langzeit-Duktilität. In diesen Fällen wird der bevorstehende Bruch durch ein Ausbeulen der Rohre sichtbar [3].

4.5 Thermische Ermüdung

Metallische Werkstoffe dehnen sich bei Erhitzung aus und ziehen sich genauso bei Abkühlung zusammen. Dadurch entstehen Spannungen in der Mitte und in der äußeren Randzone. Nach einer Anzahl von diesen Zyklen kann der Werkstoff brechen. Risse können an der Oberfläche starten und ins Innere wachsen, wie zum Beispiel in aufkohlender Umgebung, oder sie können im Inneren (bei einer neutralen Härtebehandlung) beginnen und ohne äußeres Anzeichen auf einen Fehler plötzlich brechen [15]. In vielen Hochtemperatur-Anwendungen werden wechselnde oder stark schwankende Temperaturen (zyklisches Aufheizen) beobachtet, so dass die Fähigkeit zum Widerstand gegen betriebliche thermische Ermüdung in Betracht gezogen werden muss.

Sehr wenig experimentelle Informationen zur thermischen Ermüdung sind verfügbar, die einen Vergleich von verschiedenen Legierungen ermöglichen und kein Standardversuch wurde bisher allgemein anerkannt. Betriebliche Erfahrungen deuten darauf hin, dass sich gewöhnlich der Widerstand gegen thermische Ermüdung mit steigendem Nickelgehalt verbessert. Da ungleichmäßige Spannungen dazu neigen, ein Bauteil zu verformen oder zum Bruch zu führen, ist es manchmal hilfreich, ein Bauteil aus einer Anzahl kleinerer Komponenten zu fertigen, die sich frei dehnen und zusammenziehen können. Scharfe Ecken und abrupte Querschnittsänderungen sind zu vermeiden [14].

Die Festigkeit ist selten die einzige Anforderung bei der Werkstoffauswahl und häufig nicht die bedeutendste. Mehr Versagen tritt durch Sprödbbruch infolge von thermischer Ermüdung im Vergleich zu Kriechen oder Zeitstandsbeanspruchung auf. Die Hochtemperatur-Festigkeit ist jedoch dann bedeutsam, wenn thermische Zyklen mit häufiger und starker Temperaturänderung auftreten.

4.6 Temperaturgradienten

Hitzebeständige Legierungen verfügen über einen hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten und eine niedrige Wärmeleitfähigkeit. Beide Eigenschaften führen zu Temperatur- und Spannungsunterschieden in einem Bauteil oder einer Baugruppe. Der Wärmeausdehnungskoeffizient wird ausgedrückt durch die proportionale Längenänderung für jedes Grad Temperaturanstieg, üblicherweise als 10^{-6} K^{-1} . Andere Einheiten sind manchmal $10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ und $10^{-6} \text{ cm}/\text{cm}/^\circ\text{C}$. Diese sind identisch, entsprechen aber nicht dem internationalen Einheitensystem.

Bild 8:
Bei der Werkstoffauswahl für industrielle Anwendungen sind zahlreiche Einflussfaktoren zu berücksichtigen (Foto: Centro Inox, Mailand (I))



Werkstoff-Nr.	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient 10^{-6} K^{-1} zwischen 20 °C und Temperatur °C					Wärmeleitfähigkeit W/m-K		spezifische Wärmeleitfähigkeit kJ/kg-K	elektrischer Widerstand $\Omega\text{-mm}^2/\text{m}$	Magnetisierbarkeit
	200	400	600	800	1000	20 °C	500 °C			
ferritisch hitzebeständige Stähle										
1.4713	11,5	12,0	12,5	13,0	-	23	25	0,45	0,70	ja
1.4724	10,5	11,5	12,0	12,5	-	21	23	0,50	0,75	ja
1.4742	10,5	11,5	12,0	12,5	13,5	19	25	0,50	0,93	ja
1.4762	10,5	11,5	12,0	12,0	13,5	17	23	0,50	1,10	ja
1.4749	10,0	11,0	11,5	12,0	13,0	17	23	0,50	0,70	ja
1.4736	10,5	10,8	12,0	12,5	13,0	21	23	0,50	0,60	ja
austenitisch hitzebeständige Stähle										
1.4878	17,0	18,0	18,5	19,0	-	15	-	0,50	0,73	nein ¹⁾
1.4828	16,5	17,5	18,0	18,5	19,5	15	21	0,50	0,85	nein ¹⁾
1.4835	17,0	18,0	18,5	19,0	19,5	15	21	0,50	0,85	nein ¹⁾
1.4833	16,0	17,5	18,0	18,5	19,5	15	19	0,50	0,78	nein ¹⁾
1.4845	15,5	17,0	17,5	18,5	19,0	15	19	0,50	0,85	nein ¹⁾
1.4841	15,5	17,0	17,5	18,0	19,0	15	19	0,50	0,90	nein ¹⁾
1.4864	15,0	16,0	17,0	17,5	18,5	12,5	17	0,55	1,00	nein ¹⁾
1.4876	15,0	16,0	17,0	17,5	18,5	12	17	0,55	1,00	nein ¹⁾
1.4877	15,5	16,5	16,5	17,7	18,4	12	20	0,45	0,96	nein ¹⁾
1.4872	16,5	18,0	18,5	19,0	19,5	14,5	20	0,50	0,75	nein ¹⁾
1.4818	16,5	18,0	18,5	19,0	20,0	15	21	0,50	0,85	nein ¹⁾
1.4854	15,5	16,5	17,0	17,5	18,0	11	18,5	0,45	1,00	nein ¹⁾
1.4886	15,5	16,0	17,0	17,7	18,0	12	19,5	0,46	1,00	nein ¹⁾
1.4887	15,5	16,0	17,0	17,7	18,0	12	19,5	0,46	1,00	nein ¹⁾
hitzebeständige Duplexstähle										
1.4821	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	17	23	0,50	0,90	ja

¹⁾ leicht magnetisch nach Kaltumformung

Tabelle 7: Physikalische Eigenschaften verschiedener hitzebeständiger Stähle [6]

Ein Anstieg in der Länge (oder Durchmesser, Dicke usw.) kann leicht durch Multiplizieren der ursprünglichen Abmessung mit der Temperaturänderung und dem Wärmeausdehnungskoeffizienten berechnet werden. Wenn zum Beispiel ein drei Meter langer Stab aus dem Werkstoff 1.4301 mit einem Wärmeausdehnungskoeffizienten von $17,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (oder $17,2 \text{ } \mu\text{m/m/}^\circ\text{C}$) von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $200 \text{ }^\circ\text{C}$ aufgeheizt wird, so vergrößert sich die Länge um:

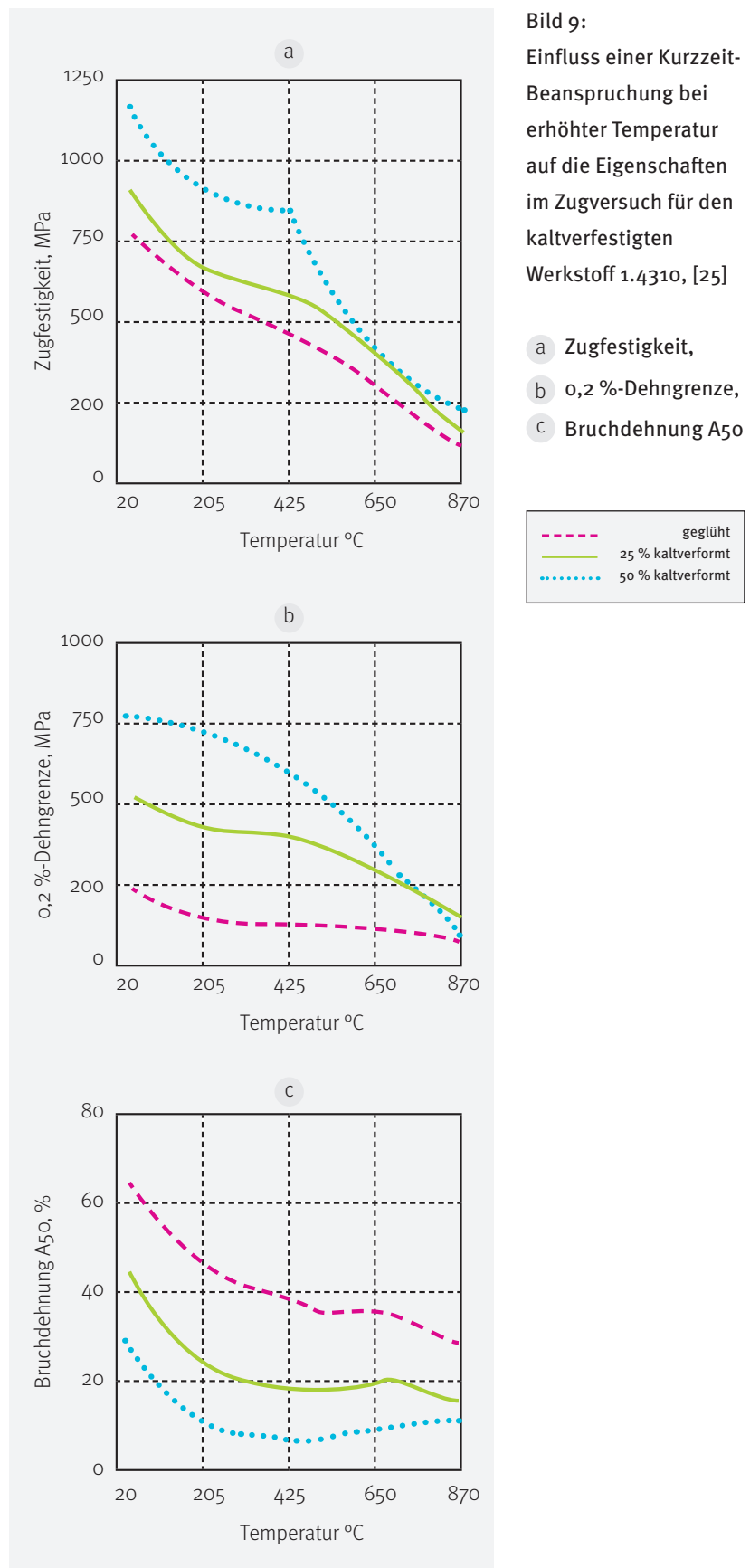
$$L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T = 17,2 \cdot 3,00 \cdot 180 = 9288 \text{ } \mu\text{m} = 9,3 \text{ mm}$$

In der Gleichung steht α für den Wärmeausdehnungskoeffizienten, L_0 für die ursprüngliche Länge und ΔT für die Temperaturänderung. Lineare Ausdehnungskoeffizienten für die einzelnen Stahlsorten werden in **Tabelle 7** aufgeführt.

4.7 Einfluss der Kaltverfestigung auf die Eigenschaften

Die Hochtemperatur-Festigkeit von hitzebeständigen austenitischen Legierungen kann durch Kaltverfestigung, zum Beispiel durch Kaltwalzen gesteigert werden. Die erhöhte Festigkeit wird jedoch nur bis zur Rekristallisationstemperatur beibehalten.

Bild 9 zeigt den Einfluss der Temperatur auf die Eigenschaften im Zugversuch für den kaltverfestigten nichtrostenden Stahl 1.4310. Kaltverfestigte Produkte haben insbesondere einen geringen Widerstand gegen Kriechen, welches generell bei einer Temperatur knapp oberhalb der Rekristallisationstemperatur des Metalls stattfindet. Während einer Langzeit-Hochtemperatur-Auslagerung geht der Vorteil einer Kaltverfestigung verloren und die Zeitstandfestigkeit kann sogar unter diejenige des lösungsgeglühten Zustandes abfallen [25].



5. Gefügestabilität

Bild 10:
Die Gefügestruktur
eines Stahls wird bei
starker Vergrößerung
beurteilt (Foto: Institut
für Werkstoffuntersu-
chungen, Essen (D))



Einige Werkstoffe verändern sich nach einigen hundert oder tausend Stunden im Einsatz. Sie werden spröde, anstatt zäh und duktil zu bleiben. Das häufigste Problem besteht darin, dass die Legierung eine harte, spröde und unmagnetische Phase bildet, die sogenannte Sigmaphase. Die Bildung von Sigmaphase findet im Temperaturbereich von 600-900 °C statt [15]. Diese Veränderung kann bei nichtrostenden austenitischen, ferritischen oder Duplexstählen auftreten, wobei der Vorgang von der Temperatur und der Zeit abhängig ist. In Ergänzung zu der Temperatur hängt die erforderliche Zeit zur Bildung von Sigmaphase stark von der Zusammensetzung und der Behandlung ab (zum Beispiel der Höhe der Kaltverformung). Die Versprödung durch Bildung von Sigmaphase beginnt sehr schnell, wenn der Werkstoff kaltverfestigt wurde.

Mit einem hinreichend hohen Gehalt an Nickel kann die Bildung von Sigmaphase weitgehend unterdrückt werden. Wenn ein Werkstoff im Bereich der Sigmaphasenbildung betrieben werden soll, ist eine Abschätzung wichtig, wieviel Versprödung während der Betriebsdauer wahrscheinlich auftritt und welchen Einfluss diese auf das Bauteilverhalten ausübt.

Die Versprödung stellt üblicherweise kein Problem dar, wenn der Werkstoff sich auf Betriebstemperatur befindet (außer wenn thermische Ermüdung beteiligt ist), kann aber kritisch bei Raumtemperatur werden [19]. Im Allgemeinen sind solche Phasen besonders bedenklich, wenn die betroffenen Bauteile auf Raumtemperatur abgekühlt werden. Bei hohen Temperaturen stellen diese Phasen im Hinblick auf die Zähigkeit und Duktilität kein größeres Problem dar. Andere intermetallische Phasen neben der Sigmaphase sind häufig die Laves- und die Chi-Phase. Im Fall der Laves-Phase können solche intermetallischen Verbindungen sogar die Hochtemperatur-Kriechfestigkeit verbessern.

Die Versprödung durch intermetallische Phasen ist vorwiegend ein Betriebsproblem und erfordert eine langzeitige Auslagerung bei hoher Temperatur. Diese Phasen können durch eine Glühung oberhalb von 1000 °C wieder aufgelöst werden [12].

Bei Temperaturen zwischen 350 und 550 °C neigen ferritische nichtrostende Stähle zur Aufteilung in zwei separate Phasen, mit jeweils hohem und niedrigem Chromgehalt. Die Geschwindigkeit der Reaktion erreicht ihr Maximum bei 475 °C und wird deshalb als 475 °C-Versprödung bezeichnet. Die 11 %igen Chromstähle sind am wenigsten empfindlich gegenüber diesem Phänomen, welches auch bei 17 %igen Chromstählen nur in begrenztem Umfang auftritt, während 25 %ige Chromstähle einschließlich der Duplexstähle sehr anfällig hierfür sind [23].

Bei hohen Temperaturen kann auch Kornwachstum auftreten, was möglicherweise die Kriechfestigkeit etwas erhöht, aber gleichzeitig die Zähigkeit drastisch reduziert. Selbst wenn diese Gefügeveränderungen zu einer Beeinträchtigung der Werkstoffeigenschaften führen, können sie hingenommen werden, wenn man sich ihrer bewusst ist und sie während des Betriebs und ebenso bei Unterbrechungen für Instandhaltungsmaßnahmen berücksichtigt [2].

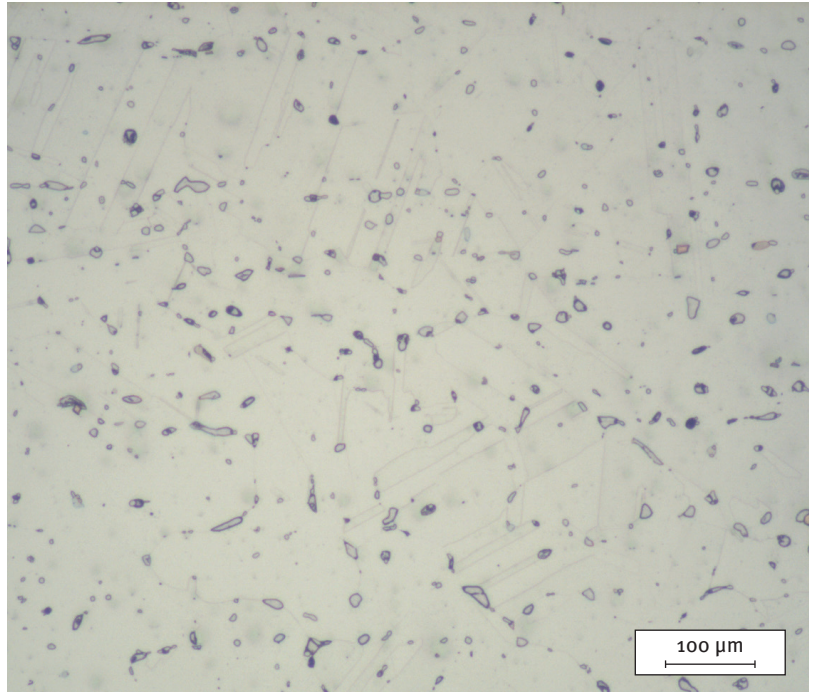


Bild 11:

Sigma-Phasen-Ausscheidungen im austenitischen Grundgefüge von Werkstoff 1.4841 nach Langzeitauslagerung bei ca. 800 °C

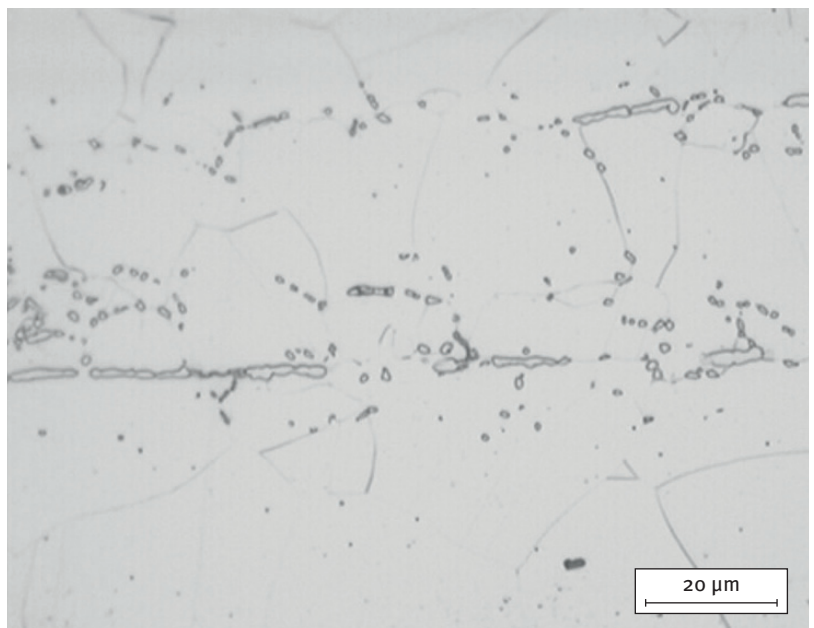


Bild 12:

Chi-Phasen-Ausscheidungen im austenitischen Werkstoff 1.4439

6. Widerstand gegen Hochtemperatur-Korrosion

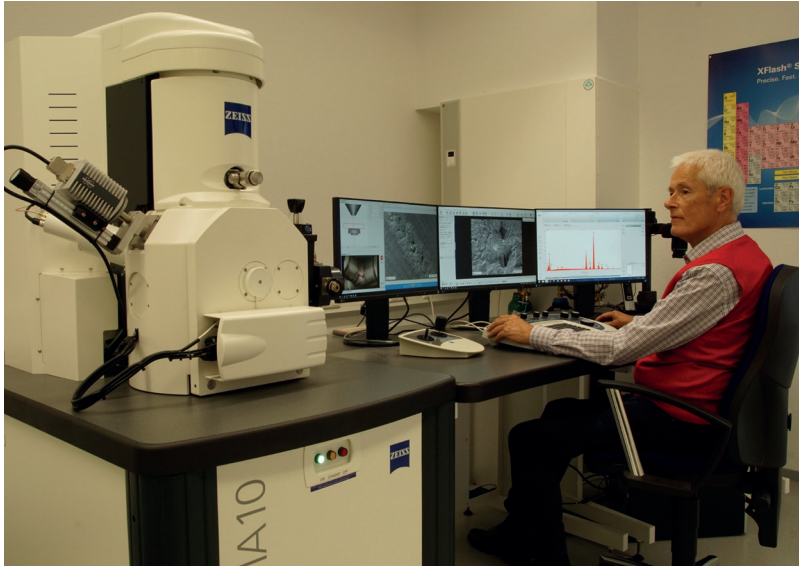


Bild 13:
Rasterelektronen-
mikroskop zur
EDX-Analyse von
Ausscheidungen und
intermetallischen Pha-
sen (Foto: Institut für
Werkstoffuntersuchun-
gen, Essen (D))

Der Begriff „Hochtemperatur-Korrosion“ ist nicht genau definiert und behandelt generell „trockene“ Korrosion, üblicherweise in Gasen. Für den Fall der nichtrostenden Stähle bedeutet dies 500 °C und höher.

Bei Temperaturen oberhalb 500 °C unterscheiden sich die Korrosionsmechanismen signifikant in Abhängigkeit von dem Sauerstoffpotential der Atmosphäre und den vorgegebenen Korrosionsbedingungen. Atmosphären mit einem hohen Sauerstoffpotential enthalten Anteile wie Sauerstoff, Wasserdampf, Schwefel und ihre Oxide (SO_2 und SO_3), Kohlendioxid (CO_2), Stickstoffoxide (NO_x), Chlor usw. Atmosphären mit einem niedrigen Sauerstoffpotential werden üblicherweise bestimmt durch Wasserstoff, möglicherweise in Gegenwart von Schwefelwasserstoff (H_2S), Kohlenmonoxid (CO), Wasserstoffchlorid (HCl), Kohlenwasserstoffen, Ammonium usw. Diese Atmosphären werden jeweils mit den landläufigen Begriffen „oxidierend“ und „reduzierend“ bezeichnet. Es sollte darauf hingewiesen werden, dass keine einzige Legierung eine zufriedenstellende Beständigkeit in allen verschiedenen Hochtemperatur-Umgebungen aufweist.

6.1 Oxidation

Wenn ein Werkstoff einer oxidierenden Atmosphäre bei hoher Temperatur ausgesetzt wird, bildet sich üblicherweise eine Oxidschicht auf der Oberfläche. Diese Schicht verzögert eine weitere Oxidation. Wenn die Temperatur des Werkstoffs ansteigt, erhöht sich die Wachstumsgeschwindigkeit des Oxids und die Schicht bricht schließlich auseinander und fällt ab, wenn die Zundergrenztemperatur erreicht wird. Dadurch verliert sie ihre schützende Wirkung [25].

Chromlegierte Stähle haben einen höheren Widerstand gegen Oxidation als unlegierte Kohlenstoffstähle, bedingt durch die Gegenwart von Chrom und einem Chromoxid-Eisenoxid-Gemisch in der Oxidschicht. Chromoxid-Eisenoxid-Gemische haben eine bessere Schutzwirkung gegenüber einer reinen Eisenoxid-Schicht. Wenn der Chromgehalt von 0 % auf 27 % erhöht wird, steigt die maximal zulässige Betriebstemperatur von rund 500 °C auf 1150 °C an. Bei Temperaturen oberhalb von 1000 °C verfügen Aluminiumoxide über eine bessere Schutzwirkung als Chromoxide. Der erforderliche Gehalt an Aluminium zur Bildung einer schützenden Schicht macht die Legierung ziemlich spröde, so dass sie schwierig und teuer in der Herstellung ist [26]. Aus diesem Grund sind die ferritischen hitzebeständigen Stähle

Zundergrenztemperatur:

Ist der Temperaturwert, ab dem der Materialverlust durch Verzunderung unzulässig ansteigt und dadurch die Konstruktion ihre Tragfähigkeit verliert.

mit max. 2,1 % Aluminium legiert. Ein steigender Nickelgehalt minimiert das Abplatzen des Zunders unter zyklischer Temperaturbeanspruchung [25]. Wasserdampf besitzt eine spezifische Wirkung auf die Oxidation. Während die Oxidationsgeschwindigkeiten an Luft im Allgemeinen etwas niedriger als in reinem Sauerstoff sind, erhöht Wasserdampf signifikant die Korrosionsgeschwindigkeit, besonders in

eisenreichen Legierungen. Die gebildete Oxidschicht scheint porös und weniger schützend zu werden. Dies wird der Bildung von flüchtigen Chromoxid- und Hydroxidverbindungen zugeschrieben. Eine kaltverfestigte Oberfläche führt zu einem verbesserten Verhalten in Wasserdampf gegenüber einem geglähten Gefüge, da es die Bildung einer kompakten Schicht aus Cr_2O_3 fördert [4]. Wenn ein erhöhter Wasserdampfgehalt vorliegt, kann die maximal empfohlene Betriebstemperatur um 50 bis 150 °C sinken, in Abhängigkeit vom Dampfgehalt [27].

Historisch betrachtet wurde der Oxidationswiderstand einer Legierung durch die „Zundergrenztemperatur“ spezifiziert. Diese entspricht derjenigen Temperatur, bei der die Oxidationsgeschwindigkeit inakzeptabel hoch wird. Die maximalen Anwendungstemperaturen an Luft werden in DIN EN 10095 [6] angegeben. Sie können sich durch andere Bestandteile in der Gasatmosphäre in der Regel zu niedrigeren Temperaturen verändern.

Katastrophale Oxidation liegt vor, wie der Name vermuten lässt, wenn die Oxidation so schnell fortschreitet, dass ein vollständiges Versagen des Werkstoffs bereits nach sehr kurzer Zeit erfolgt.

Bestimmte Elemente wie Molybdän, Niob, Vanadin und Wolfram bilden Oxide, die bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen flüchtig sind. Wenn diese Oxide gebildet werden und im Zunder verbleiben, wirken sie wie eine flüssige Phase und zerstören die Schutzschicht. Katastrophale Oxidation kann unter gewissen Betriebsbedingungen zu einem ernsthaften Problem werden, zum Beispiel bei extremen Temperaturen sowie stagnierender Atmosphäre oder festen Ablagerungen [15, 29].

Bild 14:
Wärmebehandlung nach der Warm- oder Kaltumformung ist ein fester Bestandteil des Verarbeitungsprozesses (Fotos: H. Butting GmbH, Knesebeck (D))

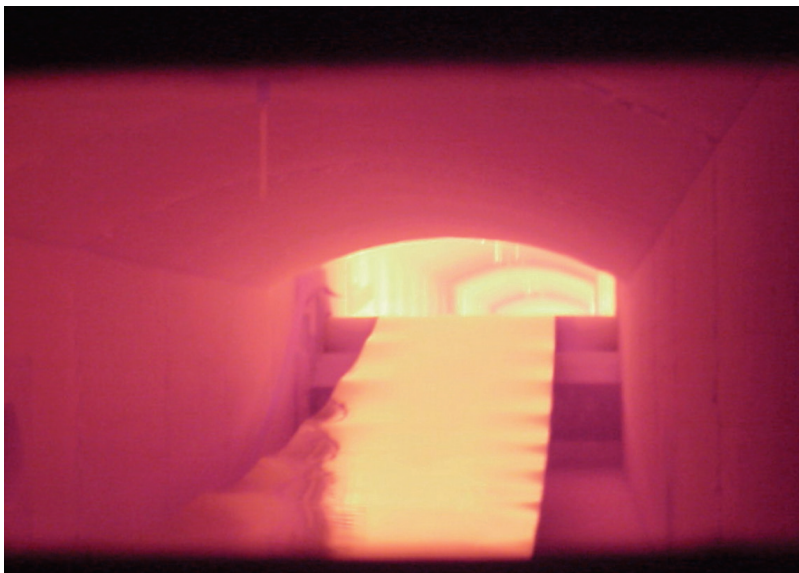


6.2 Sulfidierung

Wie auch bei der Oxidation hängt der Widerstand gegen Sulfidierung vom Chromgehalt ab. Unlegiertes Eisen wird vergleichsweise schnell in Eisensulfid umgewandelt, aber wenn das Eisen mit Chrom legiert ist, erhöht sich der Widerstand gegen Sulfidierung. Legierungselemente, die einen gewissen Schutz gegen Sulfidierung bieten, sind Silizium, Aluminium und Titan.

In Rauchgas und anderen Prozessgasen sind häufig verschiedene Schwefelverbindungen zugegen. Sie haben einen sehr schädlichen Einfluss auf die Lebensdauer der Ihnen ausgesetzten Komponenten. Durch kinetische Einflüsse können sich Sulfide im Ungleichgewicht bilden und unter nominell oxidierenden Bedingungen wachsen. Selbst wenn ursprünglich gebildete Sulfide später von Oxiden überlagert oder aufgelöst werden, wird die Oxidschicht durch ihre frühere Anwesenheit weniger schützend. In bestehenden Oxidschichten kann ein Angriff in Poren und Rissen erfolgen. Es ist deshalb notwendig, dass der Werkstoff eine dünne, zähe, homogene und haftfeste Oxidschicht bilden kann. Dies erfordert einen hohen Chromgehalt und vorzugsweise auch die Zugabe von Silizium, Aluminium und seltenen Erden (Cer).

Bild 15:
Werkstoffe können extremen Bedingungen ausgesetzt sein
(Foto: Drever International, Angleur (B))



In Ergänzung zu den üblichen Einflussgrößen Zeit, Temperatur und Konzentration hängt die Sulfidierung auch von der Form ab, in welcher der Schwefel vorliegt. Von besonderem Interesse sind die Wirkungen von Schwefeldioxid, Schwefeldampf, Schwefelwasserstoff und Rauchgasen. Verbrennungsgase enthalten üblicherweise Schwefelverbindungen. Schwefeldioxid ist als ein oxidierendes Gas zugegen, zusammen mit CO, CO₂, Stickstoff und Sauerstoff im Überschuss. In der Regel werden schützende Oxide gebildet und in Abhängigkeit von den Bedingungen wird die Korrosionsgeschwindigkeit annähernd dieselbe oder etwas größer als in Luft sein. Der Widerstand der nichtrostenden Stähle gegen normale Verbrennungsgase steigt mit steigendem Chromgehalt.

Erfahrungswerte besagen, dass nickelhaltige Legierungen in reduzierenden, sulfidierenden Umgebungen vermieden werden sollten, da die Bildung von niedrigschmelzenden Nickel-Schwefel-Verbindungen zu einer schnellen Beeinträchtigung des Werkstoffs führen kann. In der Praxis kann jedoch eine reduzierende Atmosphäre einen ausreichend hohen Sauerstoffgehalt aufweisen (gegebenenfalls in der Form von SO₂), um die Bildung einer schützenden Oxidschicht zu ermöglichen, sofern der Chromgehalt der Legierung ausreichend hoch ist [30].

Das niedrigschmelzende Nickel-Nickelsulfid-Eutektikum kann in austenitischen nichtrostenden Stählen mit mehr als 25 % Nickel gebildet werden, selbst in Gegenwart von hohen Chromgehalten. Das Auftreten von geschmolzenen Phasen während des Hochtemperatur-Einsatzes kann zu einer katastrophalen Zerstörung der Legierung führen.

Reduzierende Rauchgase enthalten unterschiedliche Gehalte an CO, CO₂, Wasserstoff, Schwefelwasserstoff und Stickstoff. Die Korrosionsgeschwindigkeiten in diesen Umgebungen sind empfindlich im Hinblick auf den Gehalt an Schwefelwasserstoff und die Temperatur. Eine zufriedenstellende Werkstoffauswahl erfordert oft Betriebsversuche. In wirklich reduzierenden schwefelhaltigen Atmosphären wird

sich jedes Oxid schnell auflösen und das reine Metall wird dem Angriff ausgesetzt. Unter solchen Umständen sollten nickelfreie Legierungen verwendet werden.

6.3 Aufkohlung und Aufstickung

Eine Aufkohlung der nichtrostenden Stähle kann in CO, Methan (CH_4) und anderen Kohlenwasserstoffhaltigen Gasen wie zum Beispiel Propan (C_3H_8) bei hohen Temperaturen stattfinden. Die Aufkohlung kann auch erfolgen, wenn mit Öl oder Fett verunreinigte nichtrostende Stähle gegläht werden, ohne dass ausreichend Sauerstoff zum Verbrennen des Kohlenstoffs vorhanden ist. Dies kann beim Vakuum- oder Inertgasglühen stattfinden, ebenso wie beim Glühen von verölten Teilen in offener Atmosphäre, wenn deren Kontur den Zutritt von Luft verhindert.

Probleme beim Aufkohlen treten häufig bei Wärmebehandlungsanlagen für das Einsatzhärten von unlegierten Stählen auf. In der petrochemischen Industrie ist die Aufkohlung eine der häufigsten Arten von Hochtemperaturkorrosion in der Prozesstechnik [25]. Eine starke Aufnahme von Kohlenstoff führt zu einer Volumenänderung, die Verzug oder Verformung hervorrufen kann. Der zusätzliche Kohlenstoffgehalt führt auch zu Schwierigkeiten, wenn eine Reparaturschweißung erforderlich sein sollte [14].

Wenn sie unerwünscht ist, kann auch Aufstickung als eine Art von Korrosion betrachtet werden und kann zu einem Problem werden, wenn nichtrostende Stähle in einer Umgebung mit aktivem Stickstoff aufgeheizt werden [3]. Aufstickung erfolgt gewöhnlich durch Überhitzung in einem stickstoffhaltigen Gas oder bei der Aufspaltung von Ammoniak.

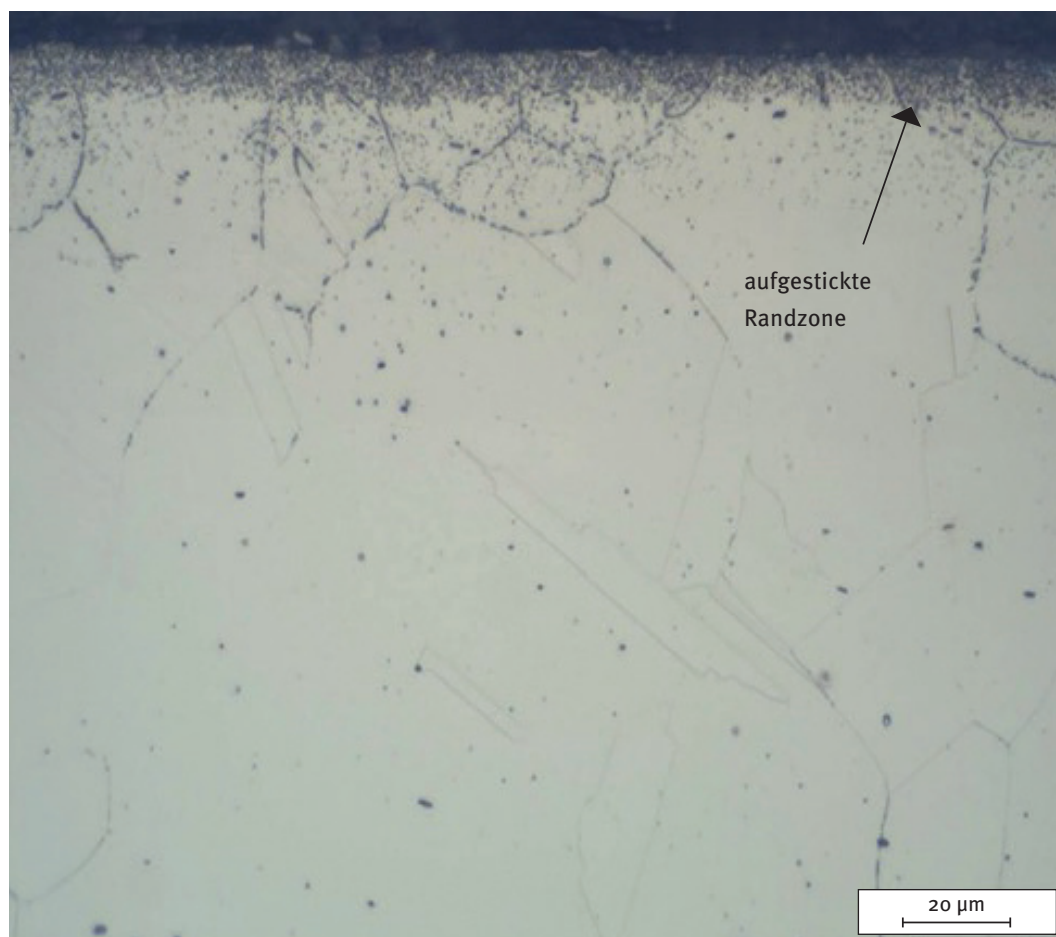
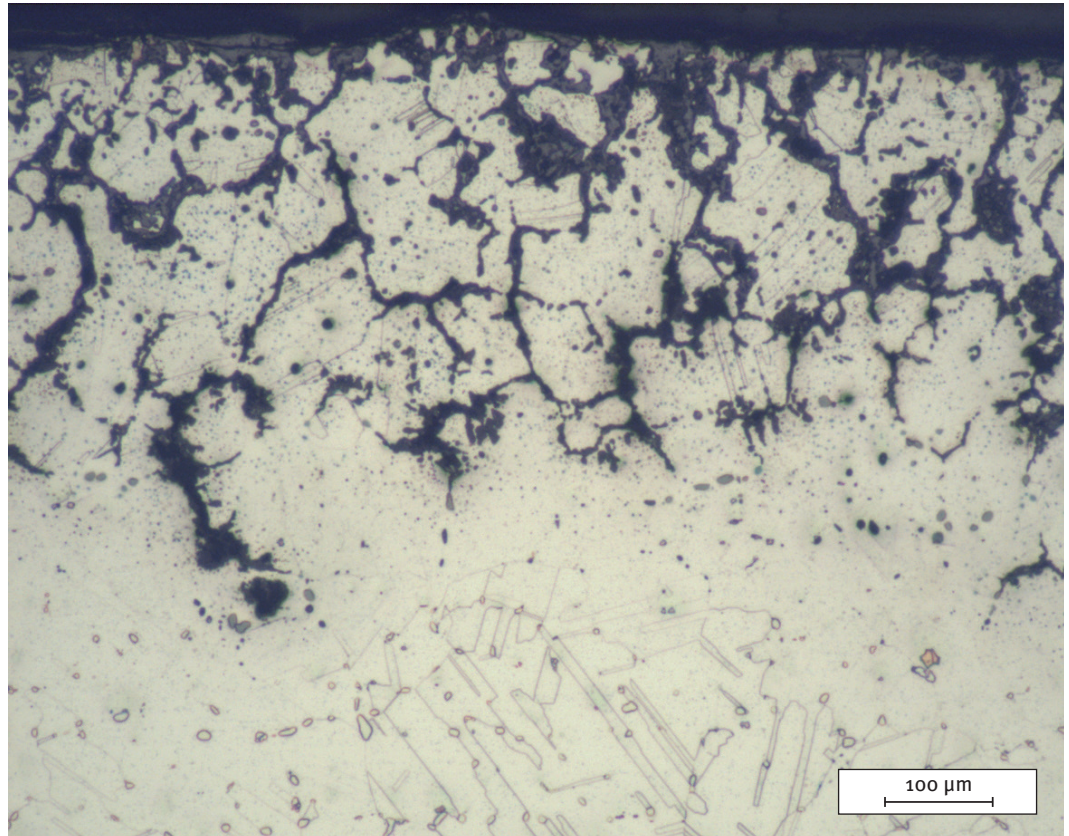


Bild 16:
Randaufstickung in stickstoffhaltiger Ofenatmosphäre, Werkstoff 1.4509

Bild 17:
Aufkohlung in der
Randzone bei Werk-
stoff 1.4841



Bei der Wärmebehandlung in stickstoffhaltiger Ofenatmosphäre kann eine Reaktion des Stickstoffs mit dem Chrom zu Chromnitrid führen. Dadurch wird der gelöste Chromgehalt gesenkt und die Korrosionsbeständigkeit verringert. Gleichzeitig tritt eine lokale Versprödung in der Randzone auf. In der Wärmebehandlungsindustrie erlauben nur hochnickelhaltige Chromlegierungen einen zufriedenstellenden Betrieb unter aufstickenden Bedingungen [14].

Die Beständigkeit von Hochtemperatur-Legierungen gegenüber Aufkohlung sinkt besonders mit ansteigendem Chrom- und Nickelgehalt. Ferritische hitzebeständige Stähle verhalten sich tendenziell unter aufkohlenden Bedingungen besser.

Ein Problem in aufkohlenden Atmosphären stellt das sogenannte „metal dusting“ dar, teilweise auch bekannt als katastrophale Aufkohlung oder Kohlen-

stoff-Zerfall. Dieses tritt bei niedrigeren Temperaturen während der Wärmebehandlung, beim Raffinieren oder in der petrochemischen Verfahrenstechnik sowie anderen Behandlungen auf [25], typischerweise zwischen 430 °C und 650 °C [15]. Über den genauen Mechanismus gibt es unterschiedliche Auffassungen, aber im Ergebnis löst sich das Metall auf. Sehr häufig erscheint das Metall „porös“ an der Oberfläche.

Metal dusting ist von folgenden Faktoren abhängig:

- Einsatztemperatur,
- chemische Werkstoffzusammensetzung,
- Ofenatmosphäre,
- Kohlenstoffpotential des Einsatzgutes,
- Geometrie des Systems,
- Reaktionskinetik,
- Diffusionsverhalten.

6.4 Korrosion durch Halogengase

Korrosion durch Halogengase beinhaltet eine Reaktion zwischen Metallen und Chloriden, Fluoriden und Halogenwasserstoffen wie Chlorwasserstoff (HCl) und Fluorwasserstoff (HF). Halogene und Halogenverbindungen greifen über die Gasphase oder als geschmolzene Salzverbindungen an. Salze führen zu einer Verschlackung und Auflösung der Oxidschicht und gasförmige Halogene dringen tief in den Werkstoff ein, ohne die Oxidschicht zu zerstören. Eine Voroxidation liefert deshalb keinen Vorteil.

In chlorhaltigen Umgebungen ohne messbaren Sauerstoff sind Eisen und Kohlenstoffstähle sehr

empfindlich gegen einen Angriff durch Chlor. Eine Zugabe von Chrom und/oder Nickel zum Eisen verbessert die Korrosionsbeständigkeit der Legierung. Deshalb widerstehen ferritische und austenitische nichtrostende Stähle besser einem Angriff durch Chlor bei erhöhten Temperaturen als Gusseisen oder Kohlenstoffstahl. Nickel und Nickelbasislegierungen sind generell sogar noch beständiger gegen Chlor als nichtrostende Stähle.

In oxidierenden Hochtemperatur-Gasatmosphären mit Chlor und Sauerstoff sind Molybdän und Wolfram schädlich für den Widerstand einer Legierung gegen einen Angriff durch Chlor.

Werkstoff-Nr.	Gasatmosphäre			
	schwefelhaltig		stickstoffhaltig	aufkohlend
	reduzierend	oxidierend	sauerstoffarm	
Ferrite				
1.4713	mittel	sehr hoch	gering	hoch
1.4724	mittel	sehr hoch	gering	mittel
1.4742	hoch	sehr hoch	gering	mittel*
1.4762	hoch	sehr hoch	gering	mittel*
Austenite				
1.4878	gering	mittel	hoch	mittel
1.4828	gering	mittel	hoch	gering*
1.4833	gering	gering	hoch	mittel*
1.4835	gering	mittel	hoch	mittel*
1.4841	sehr gering	gering	hoch	gering*
1.4845	sehr gering	gering	hoch	sehr gering

* bei Temp. > 900 °C

Tabelle 8:
Beständigkeit der
hitzebeständigen
Werkstoffe in
verschiedenen
Gasatmosphären

7. Umformverhalten und Wärmebehandlung

Die Warmumformung sollte innerhalb des Temperaturbereichs durchgeführt werden, der in **Tabelle 9** angegeben wird. Wie auch die anderen austenitischen Stähle können auch die hitzebeständigen Stähle kaltverformt werden. Bedingt durch ihren vergleichsweise hohen Stickstoffgehalt ist die mechanische Festigkeit einiger Stähle höher und demzufolge werden höhere Umformkräfte benötigt. Die vergleichsweise hohe Härte der austenitischen Stähle sowie ihre starke Kaltverfestigung müssen bei der Zerspanung berücksichtigt werden.

Eine Wärmebehandlung nach der Warm- oder Kaltumformung wird häufig nicht benötigt, wenn der Werkstoff während des Betriebs einer hohen Temperatur ausgesetzt wird. Wenn dies jedoch nicht ausreichend ist, besteht die beste Option in einer Lösungsglühung für die austenitischen Stähle und ferritischen nichtrostenden Stähle. Ferritische hitzebeständige Stähle werden im Vergleich zu austenitischen Stählen aufgrund ihrer Neigung zur Martensitbildung bei deutlich niedrigeren Temperaturen lösungsgeglüht. Geeignete Temperaturbereiche sind in **Tabelle 9** angegeben.

Tabelle 9:
Wärmebehandlungstemperaturen
verschiedener
hitzebeständiger
Stähle [6]

Werkstoff-Nr.	Kurzname	Warmformgebungstemperatur °C	Lösungsglühung °C
1.4713	X10CrAlSi7	800–1100	780–840
1.4724	X10CrAlSi13	800–1100	800–860
1.4742	X10CrAlSi18	800–1100	800–860
1.4762	X10CrAlSi25	800–1100	800–860
1.4878	X8CrNiTi18-10	800–1150	1020–1120
1.4828	X15CrNiSi20-12	800–1150	1050–1150
1.4835	X9CrNiSiNc21-11-2	900–1100	1020–1120
1.4833	X12CrNi23-13	900–1100	1050–1150
1.4845	X8CrNi25-21	900–1100	1050–1150
1.4841	X15CrNiSi25-21	800–1150	1050–1150
1.4821	X15CrNiSi25-4	800–1150	1000–1100

8. Konstruktion für verbesserten Oxidationswiderstand

Legierungen für den Einsatz in Hochtemperatur-Umgebungen erfordern die Bildung einer kontinuierlichen, kompakten, langsam wachsenden Oxidschicht und die Beständigkeit gegen Hochtemperatur-Korrosion. Für die Schutzwirkung muss die Oxidschicht chemisch, thermodynamisch und mechanisch stabil sein. Eine erfolgreiche Werkstoffauswahl für oxidierende Umgebungen wird am besten erreicht durch

die Bildung von gut haftendem Zunder aus entweder Aluminiumoxid (Al_2O_3), Chromoxid (Cr_2O_3) oder Siliziumoxid (SiO_2).

Die beste Prüfmethode zur Beurteilung des Oxidationswiderstands besteht darin, den Werkstoff auszulagern, die Kinetik zu überwachen und nachfolgend die Oxidationsprodukte und das Grundmaterial zu

charakterisieren. Auslagerungen werden am häufigsten an Luft durchgeführt, können aber auch in jeder Mischung aus korrosiven Gasen erfolgen, wie zum Beispiel H_2/H_2S , CO/CO_2 oder O_2/SO_2 .

Die Oxidationskinetik wird üblicherweise aufgetragen als Gewichtsänderung, kann aber auch über die Veränderung der Zunderdicke verfolgt werden. Die kontinuierliche Gewichtsveränderung erhält man gewöhnlich über eine thermogravimetrische Analyse (TGA). Die Gewichtsänderung stellt eine sehr hilfreiche Maßnahme dar, um die Umwandlung des Metalls in Oxid zu bestimmen und erlaubt den Vergleich zwischen den Legierungen. Das entscheidende Kriterium zur Beurteilung der Oxidationsbeständigkeit ist die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften nach der Auslagerung. Zeitstandfestigkeitswerte aus Prüfungen in Inertgas-Atmosphäre können für Konstruktionszwecke nicht verwendet werden, wenn der Werkstoff unter Bedingungen mit starker Oxidation ausgelagert wird [25].



Bild 18:

Austenitische nichtrostende Stähle werden unter Bedingungen eingesetzt, bei denen eine Kombination von Hochtemperatur-Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit erforderlich ist (Foto: Stappert Spezial-Stahl Handel, Düsseldorf (D))

9. Auswahl der Legierung

Technische Datenblätter, welche die Eigenschaften der hitzebeständigen Legierungen darstellen, sind ein sehr nützlicher Ratgeber für die Auswahl der passenden Legierung. Eine Langzeit-Auslagerung in unterschiedlichen Umgebungen und Temperaturen kann jedoch weder vollständig dokumentiert noch durch Laborversuche beschrieben werden. Erfahrungen aus zahlreichen Anwendungsbereichen sind dabei sehr hilfreich.

9.1 Temperatur

Die Temperatur ist häufig die erste und manchmal die einzige Information, die für die Werkstoffauswahl zur Verfügung steht, aber eine erfolgreiche Werkstoffauswahl kann nicht allein basierend auf der Temperatur erfolgen. Eine einfache erste Anleitung

für die Werkstoffauswahl besteht darin, die maximale Temperatur zu kennen, bei der eine vorgegebene Legierung Langzeit-Berechnungseigenschaften besitzt. Dünne Bleche verfügen dabei über eine geringere Grenztemperatur, da ihr proportionaler Verlust durch Oxidation größer ist.

9.2 Atmosphäre und Verbrennungsgase

Vakuum

Da ein Gewichtsverlust durch Oxidation tatsächlich nicht stattfinden kann, können vergleichsweise einfache Legierungen bis zu einer sehr hohen Temperatur verwendet werden, sofern ihre mechanischen Eigenschaften geeignet sind.

Luft

Die Legierungen, die in reiner heißer Luft geeignet sind, sind auch für oxidierende Verbrennungsprodukte wie Erdgas oder sogar Kohle passend. Im Allgemeinen bilden nur die Oxidation und die Festigkeit das Problem. Unter Oxidation versteht man den Metallverlust, aber auch die Verunreinigung des Produkts durch die Zunderbildung stellt manchmal ein Problem dar.

Das Verfeuern von fossilen Brennstoffen, Biobrennstoffen oder Abfall erzeugt Verbrennungsgase mit unterschiedlich aggressiven Verunreinigungen. Der am wenigsten verunreinigte Brennstoff ist das natürlich vorkommende Erdgas, dessen Verbrennungsprodukte im wesentlichen Kohlenmonoxid,

Kohlendioxid und Wasser sind. Es kann kleinere Mengen an Schwefel enthalten. Die Reduzierung der maximalen Betriebstemperatur gegenüber reiner Luft ist nur gering und beträgt etwa 50 bis 100 °C. Schwefel ist reichlich vorhanden in Kohle und Öl. Zusätzlich enthält Kohle auch Chlor, während vergleichsweise hohe Gehalte an Vanadin in Öl gefunden werden. Die Gehalte an Verunreinigungen hängen von der Art und dem Ursprung des Brennstoffs ab und können zu einem Abfall von mehr als 500 °C bei der maximalen Betriebstemperatur im Vergleich zu einem Betrieb an Luft führen (Tabelle 10). Hoch nickelhaltige Legierungen werden in hochchlorhaltigen oder hochfluorhaltigen Atmosphären bevorzugt [26].

Tabelle 10:
Gefügeveränderungen
und Zundergrenztemperatur an Luft für
verschiedene
Werkstoffe

Werkstoff-Nr.	Gefügeveränderung	Einwirkzeit*	Versprödung	Zundergrenztemperatur an Luft
Ferrite				
1.4512	> 900 °C Kornwachstum	kurz	gering	800 °C
1.4509	475 °C-Versprödung	lang	gering	900 °C
	> 950 °C Kornwachstum	kurz		
Austenite				
1.4301	600–750 °C Korngrenzenkarbide	kurz	gering	800 °C
	650–850 °C Sigmaphase	lang		
	> 1000 °C Kornwachstum	mittel		
1.4541	650–850 °C Sigmaphase	lang	gering	900 °C
	> 1050 °C Kornwachstum			
1.4828	650–900 °C Sigmaphase	mittel	mittel	1000 °C
	> 1050 °C Kornwachstum			
1.4833	650–900 °C Sigmaphase	mittel	stark	1000 °C
	> 1050 °C Kornwachstum			

* kurz = Sekunden-Minuten, mittel = Minuten-Stunden, lang = Tage-Monate

10. Anwendungen

Eine Auflistung typischer Anwendungen kann in zwei Kategorien unterteilt werden. Die erste besteht aus Teilen, die durch einen Ofen laufen und dabei einem thermischen und/oder mechanischen Schock ausgesetzt werden. Diese beinhalten Tablettis, Halterungen, Förderketten und -bänder sowie Abschreckvorrichtungen. Die zweite Kategorie enthält Teile, die im Ofen verbleiben und deshalb weniger thermischem oder mechanischem Schock unterliegen. Diese beinhalten Stützbalken, Herdplatten, Brenner, Thermo-Schutzrohre, Rollen- und Gleitschienen, Förderrollen, Hubbalken, Drehrohröfen, Schachtöfen, Muffeln, Rekuperatoren, Lüfterantriebe und Leerlauf-Trommeln. In Ergänzung gibt es Anwendungen wie Boiler, Reaktionsgefäße, Abgassysteme und Gasturbinen, die Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit erfordern und bei denen die Anwendung von hitzebeständigen Stählen vorteilhaft ist.

Stahlgüten mit Beständigkeit gegen wässrige Korrosion können auch als hitzebeständige Güten verwendet werden [3, 22, 32, 33].

Klassische nichtrostende Stähle nach DIN EN 10088-1 [9] mit einer hohen Beständigkeit gegen atmosphärische Korrosion bei niedrigen Temperaturen können auch bei Temperaturen oberhalb von 500 °C eingesetzt werden. Sie sind allerdings legierungstechnisch nicht speziell auf einen Hochtemperatur-Einsatz ausgelegt. Hinsichtlich ihrer Einsatztemperatur sind die nichtrostenden Stähle auf maximal 900 °C begrenzt. Oberhalb von 900 °C ist die Verwendung von hitzebeständigen Stählen nach DIN EN 10095 [6] dagegen zwingend erforderlich. In **Tabelle 10** sind einige gängige nichtrostende Stähle sowie hitzebeständige Stähle mit ihrer Zundergrenztemperatur an Luft aufgeführt. Die Tabelle enthält darüber hinaus einige grundsätzliche Angaben zu möglichen Gefügeveränderungen bzw. Versprödungsmechanismen für die jeweiligen Werkstoffe.

Austenite

1.4301 besitzt eine gute Beständigkeit gegen atmosphärische Korrosion. Die Zundergrenztemperatur an Luft beträgt etwa 800 °C. Bei mehrstündigem Betrieb im Temperaturbereich von etwa 600 °C bis 750 °C kann es zur Ausscheidung von Chromkarbiden auf den Korngrenzen kommen. Dies hat eine Sensibilisierung und Anfälligkeit gegen interkristalline Korrosion bei einem nachfolgenden Einsatz bei niedrigen Temperaturen zur Folge. Der Werkstoff 1.4301 besitzt aufgrund seiner Legierungszusammensetzung nur eine geringe Neigung zur Bildung von Sigmaphase, die zudem auch erst nach sehr langen Verweilzeiten im kritischen Temperaturbereich zwischen 650 °C bis 850 °C auftreten kann.

1.4541 (und ebenso **1.4550**) können angewendet werden, wenn eine Lösungsglühbehandlung nach dem Schweißen nicht machbar ist, wie zum Beispiel bei Dampfleitungen, Überhitzerrohren und Abgassystemen von Kolbenmotoren und Gasturbinen, die bei

Bild 19:
Kaminrohre erreichen im Inneren Temperaturen bis zu 650 °C (Foto: EKA-Edelstahlkamine GmbH, Untersteinach (D))



Temperaturen von 425 °C bis 850 °C arbeiten. Durch Zulegieren der sogenannten Stabilisierungselemente Titan (und Niob) sind diese Werkstoffe beständig gegen die Ausscheidung von Chromkarbiden bei erhöhter Temperatur und damit dem Werkstoff 1.4301 überlegen. Die Zundergrenztemperatur des Werkstoffs 1.4541 an Luft beträgt rund 900 °C und liegt damit ebenfalls über derjenigen des Werkstoffs 1.4301.

1.4948 ist die kriechfeste Variante des Werkstoffs 1.4301 mit einem genormten Mindestgehalt an Kohlenstoff für einen Betrieb bis zu 800 °C in trockener Luft. Er wird angewendet in Natrium-gekühlten schnellen Reaktoren, Rohrleitungen und Druckgefäßen.

1.4878 ist eine hitzebeständige Variante des Werkstoffs 1.4541 mit einem geringfügig höheren Kohlenstoffgehalt. Die empfohlene maximale Betriebstemperatur für diesen Stahl beträgt 800 °C an trockener Luft. Es gibt auch eine kriechfeste Variante des Werkstoffs 1.4541, die Sorte 1.4941, welche in den Normen DIN EN 10028-7 [13] und ASTM A 240 enthalten ist. Anwendungen für die Stahlgüte 1.4878 sind Glühhauben und Muffeln sowie Aufkohlungs- und Härtekörbe. Bei der Güte 1.4941 sind es Druckgefäße und Dampfkessel.

1.4828 wird verwendet für einen Betrieb bis zu einer Temperatur von 950 °C bis 1000 °C an trockener Luft. Die langzeitige Anwendung im Temperaturbereich von 600-900 °C kann zu einer Versprödung des Werkstoffs durch Bildung von Sigmaphase führen. Die Versprödungsneigung ist allerdings schwächer als bei den höherlegierten hitzebeständigen Stählen 1.4833, 1.4835, 1.4841 und 1.4845. Der Werkstoff 1.4828 wird für Teile eingesetzt, die sowohl hohen Temperaturen als auch hohen mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Typische Beispiele beinhalten Stützelemente und Röhren in Öfen, Glühhauben, Aufkohlungs- und Härtekörbe sowie Glüh-töpfe.

1.4833 wird aufgrund seines höheren Chrom- und Nickelgehalts höher eingestuft als 1.4828 und erreicht an trockener Luft eine Zundergrenztemperatur von rund 1000 °C. Bedingt durch den höheren Chromgehalt steigt auch die Neigung zur Versprödung durch Sigmaphase im Vergleich zu dem Werkstoff 1.4828. Dieser Stahl wird verwendet für Feuer-raum-Bleche, Ofenverkleidungen, Kessel-Leitbleche, Thermoelement-Schutzrohre und Düsentriebwerks-Verkleidungen.

1.4835 erreicht bei vergleichsweise geringen Chrom- und Nickelgehalten eine hohe Zundergrenztemperatur an trockener Luft von etwa 1150 °C und ist damit etwa vergleichbar mit dem Werkstoff 1.4841. Dies wird im Wesentlichen durch das Zulegieren von Cer in einer Konzentration von max. 0,08 % erreicht. Der Werkstoff 1.4835 wird sehr oft in Wasserstoff- und/oder Stickstoff-Atmosphären angewendet, sollte aber nicht in aufkohlenden Umgebungen zum Einsatz kommen. Der am besten geeignete Temperaturbereich beträgt 850-1100 °C. Wenn der Werkstoff längerzeitig bei Temperaturen zwischen 600 °C und 850 °C angewendet wird, kann eine verringerte Kerbschlagzähigkeit bei Raumtemperatur als Folge einer Versprödung durch Sigmaphase auftreten. Der Werkstoff 1.4835 wird in Ofenkonstruktionen und petrochemischen Anlagen eingesetzt.

1.4841 ist eine Variante des 1.4845 mit einem erhöhten Siliziumgehalt für eine verbesserte Zunderbeständigkeit. Aufgrund seines vergleichsweise hohen Chrom- und Nickelgehalts erreicht er eine Zundergrenztemperatur an trockener Luft von 1150 °C. Der hohe Chromgehalt bewirkt gleichzeitig eine höhere Versprödungsneigung im Vergleich zu den Werkstoffen 1.4828, 1.4833 und 1.4835 durch Ausscheidung von Sigmaphase bei längerzeitigem Betrieb im Temperaturbereich zwischen 600-900 °C. Ein Betrieb in diesem Temperaturbereich sollte deshalb nach Möglichkeit vermieden werden. Der Werkstoff 1.4841 wird häufig verwendet für Überhitzer-Aufhängungen, Glüh-töpfe und Emailliergitter.

1.4845 wird bei Temperaturen bis zu 1100 °C an trockener Luft eingesetzt. Dieser Stahl neigt ebenfalls zur Versprödung bei Einsatz im Temperaturbereich zwischen 600-900 °C. Der Werkstoff 1.4845 ist vorteilhaft im Vergleich zu 1.4833, wenn zyklische Aufheiz- und Abkühlbedingungen vorliegen, da er einen fester haftenden Zunder bildet als der Werkstoff 1.4833. Es gibt auch eine kriechfeste Variante des 1.4845, die Sorte 1.4951, der in der Norm DIN EN 10028-7 [13] und in der ASTM A 240 enthalten ist. Anwendungen findet man im Industrieofenbau, bei Heizkesseln und in petrochemischen Produktionsstätten.

1.4854 erreicht eine maximale Betriebstemperatur an trockener Luft von 1150 °C, aber nach Betrieb bei Temperaturen unter rund 950 °C besteht ähnlich wie bei Werkstoff 1.4841 und 1.4845 das Risiko einer verringerten Kerbschlagzähigkeit bei Raumtemperatur durch Sigmaphasen-Versprödung. Ein längerzeitiger Betrieb bei Temperaturen unter 950 °C sollte deshalb nach Möglichkeit vermieden werden.

Ferrite

1.4512 wird umfangreich eingesetzt aufgrund seiner guten Verarbeitbarkeit, insbesondere des Schweißverhaltens und Umformvermögens, und seiner guten Verfügbarkeit. Die Zundergrenztemperatur an trockener Luft beträgt rund 800 °C. Die bekanntesten Hochtemperatur-Anwendungen betreffen die Automobil-Abgasanlagen, wo die Werkstoff-Temperaturen oberhalb von 500 °C liegen. Hierzu zählen Krümmerrohre, Verbindungsrohre sowie Bauteile des Schalldämpfers. Der Werkstoff 1.4512 wird auch für Abgas-Führungskanäle und Schalldämpfer in Gasturbinen eingesetzt.

1.4510 weist eine Zundergrenztemperatur in trockener Luft von ca. 850 °C auf. Dieser Werkstoff wird eingesetzt für Wärmetauscher, Warmwasser-Tanks und Ofenteile.



1.4509 erzielt durch seine Doppelstabilisierung mit Titan und Niob eine Zundergrenztemperatur an Luft von rund 900 °C. Dieser Werkstoff wird ebenfalls in Automobil-Abgasanlagen verwendet. Zu den Anwendungsgebieten gehören unter anderem Krümmerrohre und Verbindungsrohre sowie auch Katalysator-Mantelrohre.

1.4749 wird angewendet in Industrieöfen, Gebläsen, Abgassystemen, Ofenzubehör, Glühkörben, Ofenauskleidungen und Pyrometer-Schutzrohren.

1.4713 ist am besten geeignet für Betriebstemperaturen im Bereich 500-800 °C. Er bildet keine spröden Phasen, sollte aber aufgrund seines geringen Chromgehalts nur schwach korrosiven Medien ausgesetzt werden. Er weist eine gute Beständigkeit in oxidierender, schwefelhaltiger Umgebung auf. Die häufigsten Anwendungen sind Überhitzer-Aufhängungen, Glühhauben und Pyrometer-Schutzrohre.

1.4724 ist eine hitzebeständige Hochtemperaturgüte mit einem Chromgehalt von rund 13 %. Die Zundergrenztemperatur an trockener Luft beträgt rund 850 °C. Der Werkstoff kann in oxidierenden sulfathaltigen Atmosphären eingesetzt werden. Er ist nicht empfindlich im Hinblick auf Versprödung. Der Werkstoff wird verwendet für Schwingstangen, Schienen, Gitter und Thermolement-Schutzrohre.

Bild 20:
Doppelwandiger, elektrisch beheizbarer Katalysatorträger. Für den Mantel wird wahlweise der Werkstoff 1.4509 oder 1.4828 eingesetzt, während die metallische Matrix aus dem Werkstoff 1.4767 besteht (Foto: Fischer Edelstahlrohre GmbH, Achern (D); Vitesco Technologies Emitec GmbH, Lohmar (D))

Bild 21:
Pyrometerschutzrohr
aus Werkstoff 1.4762
(Foto: A. Zwick GmbH,
Hagen (D))



1.4742 weist eine bessere Zunderbeständigkeit als 1.4724 auf und erreicht eine Zundergrenztemperatur an trockener Luft von rund 1000 °C. Er kann auch in reduzierenden schwefelhaltigen Umgebungen eingesetzt werden. Aufgrund seines Chromgehaltes von etwa 18 % unterliegt er der 475 °C-Versprödung. Kornvergrößerung setzt bei diesem Werkstoff oberhalb von 950 °C ein. Sigmaphase kann sich bei einer

Langzeit-Auslagerung bei Temperaturen im Bereich 600-850 °C bilden. Dieser Werkstoff wird vorwiegend für Ofenbeschläge, Transportelemente, Bolzen, Glührohre und -körbe im Temperaturbereich von 800-1000 °C verwendet.

1.4762 weist den höchsten Chromgehalt von ca. 24 % auf und erreicht deshalb die höchste Zundergrenztemperatur an trockener Luft von 1150 °C. Er ist gleichzeitig der Werkstoff mit der besten Beständigkeit in reduzierenden, schwefelhaltigen Gasen. Er ist noch empfindlicher gegen Versprödungsercheinungen als der Werkstoff 1.4742, wobei sich die Sigmaphase bei einer Langzeit-Auslagerung ebenfalls im Temperaturbereich von 600 °C bis 850 °C bilden kann. Mögliche Anwendungen sind Kohlenstaub-Brenner und Leiterbahnen für Dampfkessel-Überhitzer sowie Pyrometer-Schutzrohre in einem Temperaturbereich von 800 °C bis 1150 °C.

11. Kostenbetrachtung

Einige die Lebensdauer bestimmende Einflussgrößen, nicht notwendigerweise in der Reihenfolge ihrer Bedeutung, sind die Werkstoffauswahl, die Konstruktion, die Instandhaltung, die Ofen- und Temperaturkontrolle, die Atmosphäre, die Verunreinigung bzw. Belastung der Atmosphäre, Unfälle, die Anzahl der Schichten, die thermischen Zyklen und Überlasten. Hochlegierte Teile können in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen von einigen Monaten bis zu mehreren Jahren betrieben werden. Bei der Auswahl eines hitzebeständigen Stahls sollten alle Eigenschaften im Hinblick auf die betrieblichen Anforderungen betrachtet werden, um den wirtschaftlichsten Betrieb sicherzustellen.

Die erwartete Lebensdauer wird am besten in Zyklen statt in Stunden ermittelt, besonders wenn die Teile gehärtet sind. Es kann günstiger sein, alle Teile nach einer bestimmten Anzahl von Zyklen zu ersetzen, um kostenintensive Stillstände durch den Ausfall des Ofens zu vermeiden. Ketten oder Transportbänder, die mehrmals pro Schicht von Raumtemperatur auf Betriebstemperatur wechseln, werden nicht eine so lange Lebensdauer erreichen wie stationär betriebene Teile, die nicht einer Temperaturänderung unterliegen. Teile für aufkohlende Öfen werden nicht eine so lange Lebensdauer erreichen wie solche für eine einfache Glühung [16].

Aus Wettbewerbssicht muss die Legierungsauswahl auf der erwarteten Kosteneffizienz basieren. Die beste Auswahl ist gewöhnlich der preisgünstigste Werkstoff, welcher die Konstruktionskriterien erfüllt. Es kann jedoch gerechtfertigt sein, ein hochwertigeres Material mit besseren Eigenschaften einzusetzen, wenn das System kritisch ist und/oder ein Stillstand für die Instandhaltung teuer ist.

Hitzebeständige Legierungen werden entweder in gewalzter oder gegossener Form geliefert. In manchen Fällen kann es auch eine Kombination aus beiden sein. Die Eigenschaften und auch die Kosten beider Ausführungen können unterschiedlich sein, obwohl ihre chemische Zusammensetzung ähnlich ist.

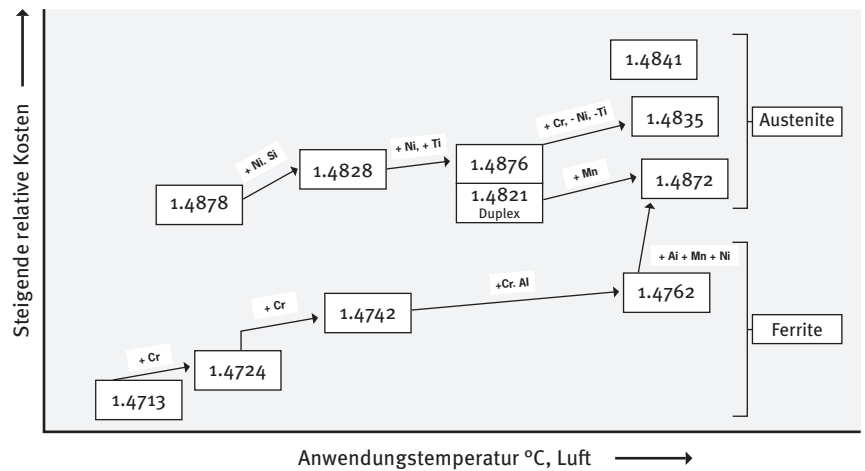


Bild 22:

Werkstoffkosten für unterschiedliche hitzebeständige Stähle [36]

12. Zusammenfassung

Die intelligente Auswahl einer Legierung für den Hochtemperatur-Einsatz stellt ein komplexes Gebiet dar und sollte deshalb nicht leichtfertig oder ohne ausreichende Erfahrung erfolgen. Es wird verdeutlicht, dass die Werkstoffauswahl in Verbindung mit den Anforderungen des Konstrukteurs durchgeführt werden muss.

Die sehr komplexen Zusammenhänge der Hochtemperatur-Korrosion und der Mangel an genormten Prüfverfahren machen es nahezu unmöglich oder zumindest nicht sinnvoll, Korrosionsergebnisse in Tabellen darzustellen.

Die Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit hängen von den zugehörigen Prozessen und Konstruktionen ab. In einigen Anlagen können Komponenten mit nur wenig oder gar keiner Störung

des normalen Betriebs instandgehalten, repariert oder ausgetauscht werden, während bei anderen Anwendungen die Instandhaltung und Reparatur sorgfältig geplant werden muss und nur während eines jährlichen oder halbjährlichen Stillstands durchgeführt werden kann. In diesen Fällen muss natürlich eine sorgfältigere Werkstoffauswahl getroffen werden.

Die Werkstoffauswahl für Hochtemperatur-Anwendungen erfordert eine umfassende Kenntnis der existierenden oder erwarteten Betriebsbedingungen, wie zum Beispiel die Gastemperatur und -zusammensetzung sowie die Werkstofftemperatur. Kenntnisse über zuvor verwendete Werkstoffe, ihr Betriebsverhalten und die Gründe für vorheriges Versagen sind gewöhnlich eine große Hilfe bei der optimalen Werkstoffauswahl [26].

Literaturverzeichnis

- [1] **”Stainless Steel – High Temperature Resistance”**
<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1175>
- [2] **”Stainless Steel for high service temperature”**
[http://www.outokumpu.com/Produkte/Therma-Einsatz bei hohen Temperaturen](http://www.outokumpu.com/Produkte/Therma-Einsatz-bei-hohen-Temperaturen)
- [3] **”Stainless Steel at High Temperatures”**
ASM International, Course 18, 1994
- [4] Cunat, P.-J.
”The Euro Inox Handbook of Stainless Steel”
Euro Inox, Materials and Application Series, Volume 1, 2002
- [5] Itoh, I.; et.al.
”Development of Ferritic Stainless Steel Foil as Metal Support for Automotive Catalytic Converter”
Nippon Steel Technical Report No. 64, 1995
- [6] DIN EN 10095:2018-02
Hitzebeständige Stähle und Nickellegierungen
- [7] **”Our offer for automotive exhaust: a range of tailored solutions”**
<http://www.aperam.com/uploads/stainlesseurope/brochures>
- [8] **”High Temperature Properties”**
<http://www.ssina.com/composition/temperature.html>
- [9] DIN EN 10088-1:2014-12
Nichtrostende Stähle – Teil 1: Verzeichnis der nichtrostenden Stähle
- [10] DIN EN 10302:2008-06
Warmfeste Stähle, Nickel- und Cobaltlegierungen
- [11] Shedin, E.; Ivarsson, B.; Andersson, M.; Lindstrom, R.
”Duplex stainless steel in fire”
Proceedings of Stainless Steel Science and Market 2011 Conference, Como, Italy
- [12] Davis, J.R.
”Stainless Steels”
ASM Specialty Handbook, ASM International, 1994
- [13] DIN EN 10028-7:2017-10
Flacherzeugnisse aus Druckbehälterstählen – Teil 7: Nichtrostende Stähle
- [14] **”Heat and corrosion resistant castings: Their engineering properties and applications”**
Nickel Institute, Publication No. 266
- [15] **”Rolled Alloys, Heat Resistant Alloys Handbook”**
<http://www.rolledalloys.fr/trcdocs/heatresist/handbook.pdf>
- [16] Lay, G.Y.
”Heat-Resistant Materials for Furnace Parts, Trays and Fixtures”
ASM Handbook, Vol. 4, ASM International, 1991
- [17] **”Korrosion nichtrostender Stähle”**
ThyssenKrupp Nirosta, Nirosta Werkstoffdatenblätter, Ausgabe 3, 2006
- [18] **”The Atlas Steels Technical Handbook of Stainless Steels”**
<http://www.atlassteels.com.au/documents/atlas-technical-handbook>

- [19] **”Better high temperature strength than other grades”**
 Nickel Institute, Stainless Steel Focus,
 July 2009
- [20] **”Hitzebeständige Stähle Thermax”**
 ThyssenKrupp Nirosta, Ausgabe 2, 2002
- [21] **”Microstructural Stability”**
<http://www.outokumpu.com/en/products/grades/stainless-properties/high-temperature-grades/structural-stability>
- [22] **”High Temperature Austenitic Stainless Steel”**
<http://www.outokumpu.com/produkte/therma-range-datasheet>
- [23] Cunat, P.-J.
”Working with Stainless Steels”
 Euro Inox, 2nd Edition, 2009
- [24] **”Heat Treating”**
 ASM Handbook, Vol. 4, ASM International, 1991
- [25] Davis, J.R.
”Heat-Resistant Materials”
 ASM Specialty Handbook, ASM International,
 1997
- [26] **”Corrosion Handbook”**
 Outokumpu Corrosion Handbook, Tenth
 Edition, 2009
- [27] **”Resistance to Oxidation”**
<http://www.outokumpu.com/en/products/grades/stainless-properties/high-temperatures-grades/oxidation/pages-default.aspx>
- [28] **”High Temperatures Stainless Steel”**
[http://www.outokumpu.com/produkte/Therma-Einsatz bei hohen Temperaturen](http://www.outokumpu.com/produkte/Therma-Einsatz-bei-hohen-Temperaturen)
- [29] Leffler, B.
”Stainless Steels and Their Properties”
http://static.gest.unipd.it/esercici/IIP_pmmi/accai_inox.pdf
- [30] **”Resistance for sulphur containing gases”**
[http://www.outokumpu.com/produkte/Therma range datasheet](http://www.outokumpu.com/produkte/Therma-range-datasheet)
- [31] **”Resistance to carburizing and nitriding”**
[http://www.outokumpu.com/produkte/Therma range datasheet](http://www.outokumpu.com/produkte/Therma-range-datasheet)
- [32] Wegst, C.; Wegst, M.
”Stahlschlüssel”
 Verlag Stahlschlüssel Wegst, 2004
- [33] **”High Temperature Ferritic Stainless Steel”**
http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/High_temperature_ferritic_grades_datasheet.pdf
- [34] Gumpel, P.
”Rostfreie Stähle – Grundwissen, Konstruktions- und Verarbeitungshinweise”
 Expert Verlag, Renningen, 2. Auflage 2000
- [35] **”Nichtrostende Stähle für Abgassysteme im Automobil”**
 ThyssenKrupp Nirosta, Ausgabe 1, 09/2001
- [36] **”Stammbaum der Hitzebeständigen Stähle”**
<http://www.dew-stahl.com/service/technischebibliothek/werkstoffdiagramme>



Informationsstelle Edelstahl Rostfrei
Postfach 10 22 05
40013 Düsseldorf
www.edelstahl-rostfrei.de

