

Stähle für Temperaturbeanspruchung

Von Dr. rer. nat. Max Krause, Bochum

Ein bedeutungsvoller Anteil der Schmiedeerzeugnisse wird für Beanspruchungsfälle mit Betriebstemperaturen oberhalb oder unterhalb der Raumtemperatur geliefert. Hierbei handelt es sich einerseits um die in der Kryotechnik auftretenden sehr niedrigen Temperaturen bis in die Nähe des absoluten Nullpunktes der Kelvinskala und andererseits um erhöhte Temperaturen, wie sie in der chemischen und petrochemischen Verfahrenstechnik sowie in der Energietechnik erforderlich sind. In vielen Anwendungsfällen bleibt die Betriebstemperatur der so eingesetzten Erzeugnisse nicht ständig auf gleicher Höhe, sondern ändert sich mit dem Betriebszustand. Zusätzliche mechanische Werkstoffbeanspruchungen sind die Folge. In der chemischen Verfahrenstechnik kommt zu den mechanischen und thermischen Werkstoffbeanspruchungen eine korrosive Beanspruchung hinzu. Gelegentlich ist zu berücksichtigen, daß ein Legierungsbestandteil des Stahls Schutz gegen eine der Angriffsarten bietet, gleichzeitig aber eine zweite Angriffsart fördern kann.

Für den gekennzeichneten Anwendungsbereich von Schmiedestücken steht eine breite Palette von bewährten Stählen zur Verfügung, die vielfach in enger Zusammenarbeit zwischen Stahlherstellern und Verbrauchern optimiert wurden.

Die wichtigen Gruppen der druckwasserstoffbeständigen, der kaltzähnen, der austenitischen und der nichtaustenitischen warmfesten Stähle sollen hier näher dargestellt werden.

Druckwasserstoffbeständige Stähle

Gegen die Schädigung durch Entkohlung und Korngrenzenaufreibungen können unterschiedliche Abhilfemaßnahmen getroffen werden. Sie bestehen entweder darin, den Kohlenstoffgehalt weitgehend zu senken, oder, wenn dies zu technisch nicht interessanten Festigkeitswerten führt — wie beim Weicheisen — darin, die Kohlenstoffaktivität durch Zusatz von Karbidbildnern zum Stahl zu vermindern.

Zur Kohlenstoffabbindung eignen sich z. B. karbidbildende Elemente wie Chrom, Molybdän, Wolfram und Vanadin. In ferritischen druckwasserstoffbeständigen Stählen sind vor allem angehobene Chromgehalte und Zusätze

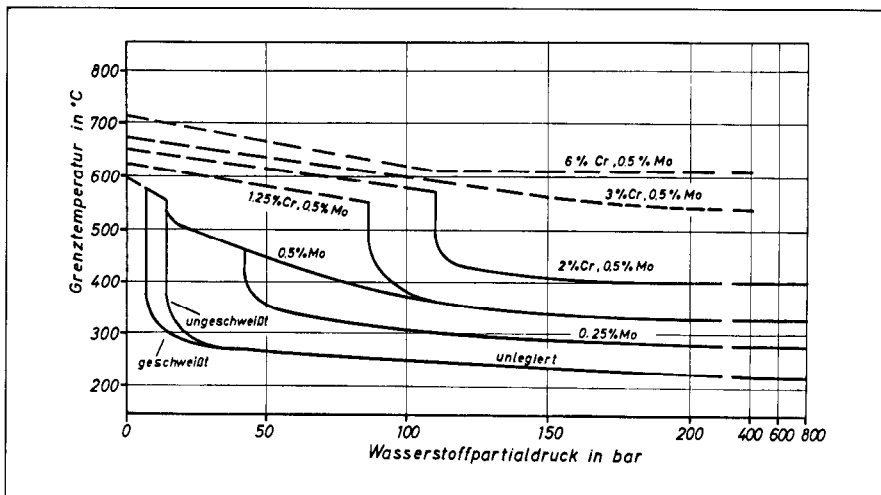


Bild 1: Grenzwerte für Temperaturen und Wasserstoffpartialdrucke, unterhalb deren auch bei langzeitiger Einwirkung Stahl nicht geschädigt wird.

von Molybdän und Vanadin gebräuchlich. In Bild 1 sind die mit Chrom-Molybdänstählen erreichbaren Grenzwerte für Temperatur und Wasserstoffpartialdruck angegeben, unterhalb deren noch keine Druckwasserstoffschädigung auftritt.¹⁾

Die Chrom- und Molybdängehalte nichtaustenitischer druckwasserstoffbeständiger Stähle verbessern auch deren Durchvergütung, ein Vorteil bei Erzeugnissen mit größerer Wanddicke. Steigender Chromgehalt erhöht die Beständigkeit ferritischer Stähle gegen Aufschwefelung, was bei einer Verwendung in petrochemischen Prozessen mit sulfidbildenden Bedingungen von Vorteil ist.

Von den Legierungselementen Molybdän und Vanadin ist bekannt, daß sie die Langzeitwarmfestigkeit erhöhen, wenn sie hierfür in den druckwasserstoffbeständigen Stählen auch nicht immer in optimalen Anteilen enthalten sind. Bei den ferritischen druckwasserstoffbeständigen Stählen wird die Kohlenstoffabbindung weitgehend während des Anlassens durch die Bildung legierungsmittelreicher Sonderkarbide abgeschlossen.²⁾

Im Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 590 [2] ist eine Reihe gebräuchlicher ferritischer druckwasserstoffbeständiger Stähle enthalten. Darüber hinaus finden auch weitere Molybdän-, Chrom-Molybdän- bzw. Chrom-Molybdän-Vanadinstähle Verwendung, wie z. B. die Stähle 15 Mo 3, 16 Mo 5, und 12 CrMo 9 10.

Auf den hochlegierten CrMoV-Stahl mit 12% Chrom wird zurückgegriffen, wenn außer der Druckwasserstoffbeständigkeit zusätzlich ein Widerstand gegenüber anderen Arten der Hochtemperaturkorrosion erforderlich ist.

Wenn im Verfahren der chemischen Industrie außer Wasserstoff auch Stickstoff unter erhöhten Drücken und Temperaturen im Prozeßmedium vorhanden ist, werden meist austenitische Stähle eingesetzt. Außer dem im Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 590 genannten Stahl X 8 CrNiMoV Nb 16 13 sind dies die Stähle X 8 CrNi Nb 16 13 und X 8 CrNiMo Nb 16 16.

Die spanabhebende Formgebung zeigt gegenüber der Bearbeitung anderer ferritischer bzw. austenitischer Stähle keine Besonderheiten.

Beim Schweißen ist folgendes zu beachten: Für eine optimale Einstellung der Druckwasserstoffbeständigkeit wäre eine vollständige Vergütung im Anschluß an das Schweißen ein Vorteil. Dies ist im allgemeinen nicht möglich. Es sollte jedoch sowohl zum Spannungsabbau als auch zur weitgehenden Ausscheidung kohlenstoffbindender Sonderkarbide eine Glühung im Bereich der üblichen Anlaßtemperaturen vorgenommen werden.

¹⁾ Es handelt sich um das in metrischen Einheiten umgerechnete, im Jahre 1969 zuletzt revidierte „Nelson-Diagramm“.

²⁾ Der Verlauf dieser Karbidbildungen in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit ist für die Stähle 17 CrMoV 10, 20 CrMoV 13 5 und X 20 CrMo(W)V 12 1 in einer neueren Arbeit detailliert dargestellt worden [1].

Sind Glühungen nach dem Schweißen nicht möglich, so geht man häufig zum Einsatz von stabilisierten austenitischen Stählen über. Bei allen Schweißverbindungen ist ferner zu berücksichtigen, daß Bindungsfehler, Poren und Schlackeneinschlüsse als Sammelstellen für Wasserstoff eine Stahlschädigung begünstigen können.

Hauptverwendungsgebiete für druckwasserstoffbeständige Schmiedestähle sind Form- und Armaturenteile (Bild 2), Hohlkörper und deren Abschlußplatten sowie Großraumdruckgefäße und Hochdruckhohlkörper der chemischen und petrochemischen Industrie. Ein allgemeiner Überblick über diese Stahlgruppe wird in der neueren Literatur gegeben [3].

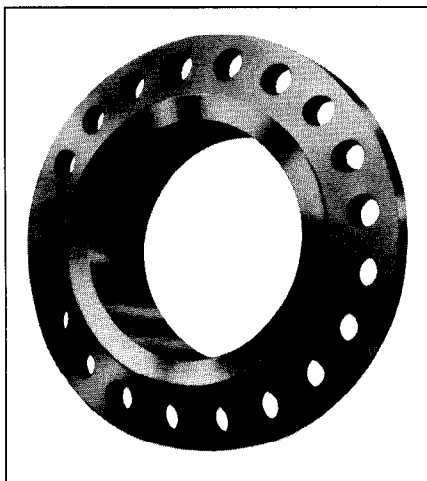


Bild 2: Vorschweißflansch, Werkstoff 10Ni 14, Innendurchmesser 850 mm.

Kaltzähe Stähle

Der Bedarf an kaltzähen Stählen hat mit der rapiden Entwicklung der Sauerstoffblasstahl-Technologie, der Erschließung von Erdgasquellen in aller Welt sowie von chemischen und petrochemischen Verfahrenstechniken schnell zugenommen. Als jüngste Anwendungsgebiete sind Raketentechnik, Raumfahrt und kompakte Hochleistungsgeneratoren hinzugekommen. Unter dem Begriff kaltzähe Stähle faßt man unlegierte und legierte Vergütungsstähle sowie austenitische Stähle für Betriebstemperaturen zwischen ungefähr dem Gefrierpunkt und $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ zusammen. Einige typische Beispiele sind im Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 680 [4] genannt. Darüber hinaus haben sich weitere Werkstoffe unterschiedlich weitgehender Kaltzähigkeit bewährt, wie z. B. alterungsbeständige Stähle nach DIN 17 135 [5], Feinkornbaustähle der TT-Reihe nach Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 089 [6] sowie austenitische Stähle nach DIN 17 440 [7], unter denen gesondert auf die stickstoff-

legierten Güten mit sowohl höheren Streckgrenzen- als auch Zähigkeitswerten hingewiesen wird (vgl. *Tafel 1*). Auch austenitische Stähle, die für eine Verwendung bei erhöhten Temperaturen entwickelt wurden, wie der Stahl X 5 NiCrTi 26 15 und Nickelbasislegierungen, zeichnen sich durch Kaltzähigkeit aus.

Da die Streckgrenzen und Zugfestigkeiten der erwähnten Stähle mit fallender Temperatur im allgemeinen nicht abfallen, sondern in der Regel ansteigen, ist die wesentliche Größe für die Werkstoffauswahl im Einzelfall die Duktilität bei Betriebstemperatur. Zu ihrer quantitativen Darstellung wird neben der Kerbschlagarbeit auch das Kerbzugfestigkeitsverhältnis benutzt, das insbesondere bei sehr tiefen Temperaturen meist einfacher zu ermitteln ist als die Kerbschlagarbeit. Für die Abschätzung des Betriebsverhaltens wechselbeanspruchter Bauteile bei tiefen Temperaturen sind Werte der Reißbruchzähigkeit K_{Ic} und der Reißfortpflanzungsgeschwindigkeit da/dN bei Betriebstemperatur besonders wertvoll, aus meßtechnischen Gründen aber noch nicht in großem Umfang ermittelt worden. Beispiele sind in einer neueren Arbeit [8] angegeben.

Bei austenitischen Stählen nimmt die Zähigkeit mit fallender Temperatur deutlich langsamer ab als bei vergütbaren Nickelstählen und liegt insbesondere bei sehr tiefen Temperaturen zum Teil bedeutend über deren Werten. Je höher die Chrom-, Nickel- und ggf. Stickstoffgehalte im Stahl sind, desto stabiler ist der Austenit gegen eine zähigkeitsmindernde Martensitbildung, die entweder unter der Einwirkung tiefer Temperaturen oder infolge von Kaltverformungen auftreten kann. Bleibende Veränderungen der bei Raumtemperatur beobachteten Gefüge, Festigkeits- und Zähigkeitswerte wurden nach einer größeren Anzahl von Temperaturzyklen zwischen 4 K und Raumtemperatur weder an ferritischen noch an austenitischen Stählen noch an einem Nickelbasiswerkstoff gefunden [8].

Angaben über die tiefsten zulässigen Betriebstemperaturen einer Reihe im Behälterbau häufig verwendeter kaltzäher Stähle finden sich im AD-Merkblatt W 10 [9].

Kaltzähe Stähle können als gut schweißbar angesehen werden. Vorschläge für Schweißzusatzwerkstoffe sowie Empfehlungen zum Vorgehen beim Schweißen sind in der neueren Literatur zusammengestellt [10].

Die Anwendung austenitischer Stähle im Tieftemperaturbereich erfordert die Berücksichtigung ihrer großen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Die

Stahlgruppe	Temperaturgrenze ($^{\circ}\text{C}$)
Alterungsbeständige Stähle nach DIN 17 135	-20 bis -30
Feinkornbaustähle nach SEW 089	-40 bis -60
Nichtaustenitische kaltzähe Stähle nach SEW 680	-50 bis -196
Austenitische kaltzähe Stähle nach SEW 680	-253
Austenitische Chromnickelstähle nach DIN 17 440	-196
Austenitische Chromnickel-molybdänstähle nach DIN 17 440	-60
Stickstofflegierte austenitische Chromnickel- und Chromnickel-molybdänstähle nach DIN 17 440	-253

Tafel 1: Niedrigste Anwendungstemperaturen kaltzäher Stähle je nach Zusammensetzung. Nach AD-Merkblatt W 10, Beanspruchungsfall 1

Schrumpfung austenitischer Bauteile bei Abkühlung auf tiefe Temperaturen kann unter ungünstigen Umständen zu erheblichen Spannungen führen. In besonderen Fällen kann sich daher die Verwendung des kaltzähen Stahles Ni 36 (Werkstoff-Nr. 1.3912) empfehlen, dessen Wärmeausdehnung innerhalb eines weiten Temperaturbereichs niedriger ist als der aller übrigen Stähle.

Austenitische warmfeste Stähle

Schmiedestücke aus austenitischen Stählen zur Verwendung bei hohen Dampftemperaturen wurden erstmalig in den Jahren 1949/50 bei der Planung von Kraftwerken mit einer Frischdampftemperatur von $610\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorgesehen und in den darauffolgenden Jahren allein in der Bundesrepublik in rund 35 Anlagen mit Frischdampftemperaturen bis zu $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingebaut. Es handelt sich meist um Kraftwerke von 20 bis 100 MW zur Eigenversorgung von Industrieunternehmen mit Dampf und elektrischer Energie. Sie enthalten im Kesselbereich geschmiedete austenitische Bauelemente wie Sammler, Armaturen und andere Formstücke und auch in den Turbinen austenitische Schmiedeteile. Die Anlagen haben sich betrieblich bewährt, wie die günstigen Zeitverfügbarkeitswerte von Kesseln (88 bis 92%) und Turbinen (86—91%) erkennen lassen.

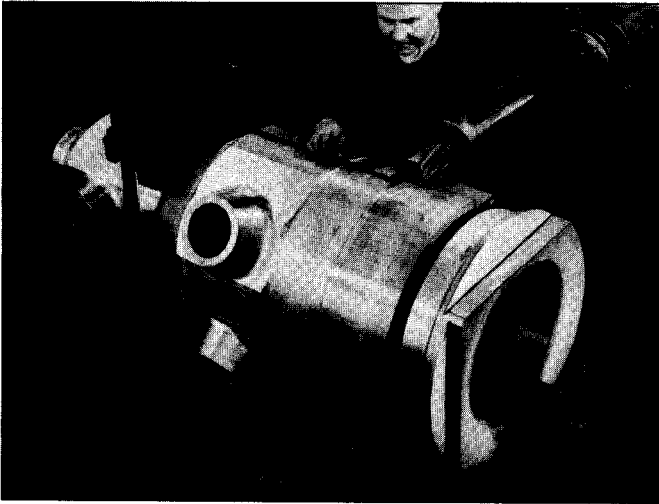


Bild 3: Ventilgehäuse, Werkstoff X 8 CrNiNb 16 13, Länge ohne Probescheibe 1290 mm, Wanddicken zwischen rd. 35 bis rd. 145 mm.

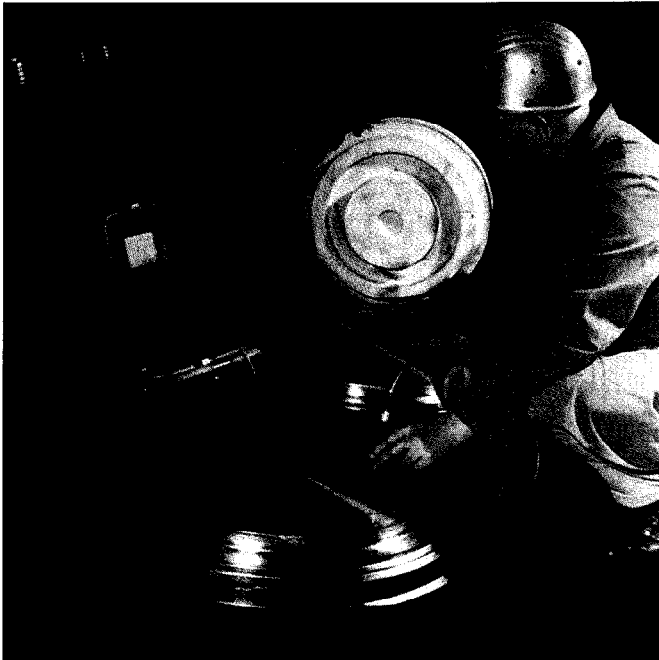


Bild 4: Zwischenprüfung geschmiedeter Vorstücke für Gasturbinenscheiben. Werkstoff X6NiCrTi 26 15.

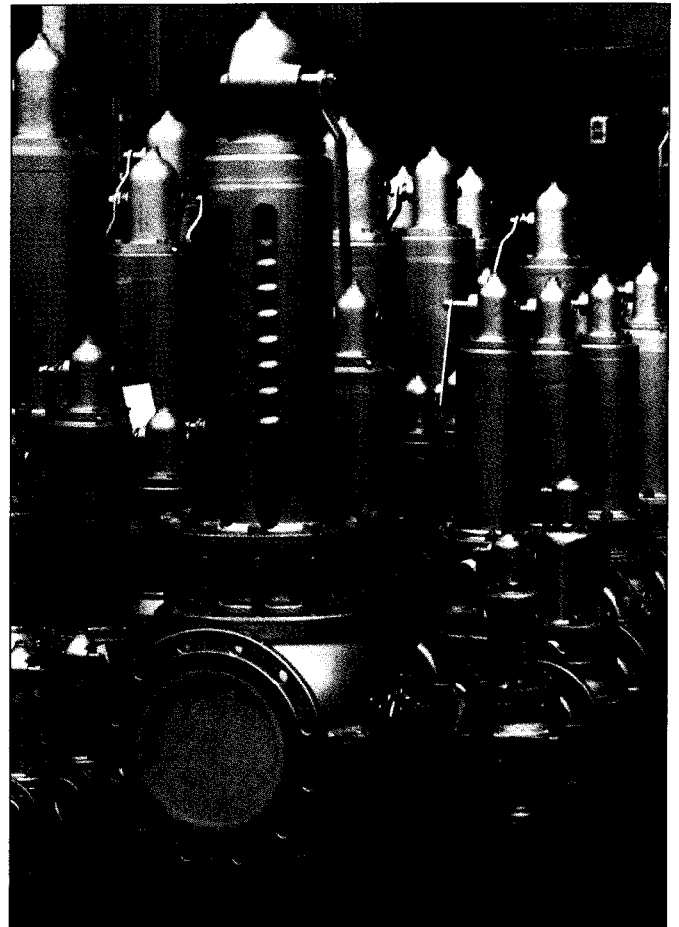


Bild 5: Vollhub-Sicherheitsventile für Apparate und Energieerzeugungsanlagen, einsetzbar zwischen $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Kesselaufzeiten von 188 000 Stunden und Turbinenlaufzeiten von 165 000 Stunden sind überschritten [11]. Als Werkstoffe wurden hauptsächlich die Stähle X 8 CrNiNb 16 13 und X 8 CrNiMoNb 16 16 verwendet, deren Eigenschaften dem Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 670 [12] entnommen werden können. *Bild 3* zeigt als Beispiel den mechanisch vorbearbeiteten Körper eines Ventilgehäuses aus dem Stahl X 8 CrNiNb 16 13. Gleichfalls für die Verwendung bei erhöhten Temperaturen, z. B. für dickwandige Armaturen in konventionellen und nuklearen Energieerzeugungsanlagen, sind die beiden unstabilierten Schmiedestähle X 6 CrNi 18 11 und X 6 CrNiMo 17 13 vorgesehen, deren Eigenschaften im

Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 640 [15] enthalten sind.

Wegen ihrer günstigen mechanischen Eigenschaften und chemischen Beständigkeit fanden darüber hinaus Stähle des Typs X 6 NiCrTiMo 26 15 Verwendung für Gasturbinenscheiben (*Bild 4*), aber auch z. B. für bestimmte Bauelemente von Sicherheitsventilen mit einem weiten Betriebstemperaturbereich im Apparate- und Energiemaschinenbau (*Bild 5*).

Neben Verwendungszwecken, bei denen es auf eine langzeitige mechanische Beanspruchbarkeit von Bauelementen bei erhöhten Temperaturen ankommt und bei denen infolgedessen Zeitdehngrenzen und Zeitstandfestigkeiten für die Beanspruchungsdauer von

10^5 Stunden (elf Jahre) und mehr als Grundlage für Dimensionierungsrechnungen eine Rolle spielen, werden Stähle auch bei Dauerbetriebstemperaturen eingesetzt, bei denen die Betriebsbeanspruchungen eine Berücksichtigung von Zeitdehngrenzen- oder Zeitstandfestigkeitswerten nicht rechtfertigen. Es werden dann Warmstreckgrenzenwerte zugrundegelegt. Bei austenitischen Stählen ist dies z. B. der Fall für die Stahlsorten nach DIN 17 440 [7], die langfristig meist nicht oberhalb von rund $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingesetzt werden.

Die erwähnten austenitischen Stähle nach Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 640 und 670 sowie nach DIN 17 440 sind schweißbar. Je nach Zusammensetzung des Grundwerkstoffes stehen bewährte Schweißzusatzwerkstoffe zur Verfügung. Bezüglich der Auswahl und einer evtl. Wärmenachbehandlung wird auf Angaben im Schrifttum [14] verwiesen.

Austenitische Stähle sind durch eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit und einen höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten gekennzeichnet als nichtaustenitische Stähle. Dies führt bei Temperaturänderungen von austenitischen Bauteilen zu größeren Wärmespannungen als

bei nichtaustenitischen Bauteilen unter gleichen Bedingungen. Die Spannungshöhe hängt ab von der Temperaturänderungsgeschwindigkeit an der beaufschlagten Oberfläche, steigt mit dem Quadrat der Wanddicke bei einfach geformten Bauteilen, mit zunehmendem Wärmeausdehnungskoeffizienten und mit abnehmender Wärmeleitfähigkeit. Insbesondere in Anlagen mit ständig wechselnder Betriebstemperatur ist dies zu berücksichtigen.

Nichtaustenitische warmfeste Stähle

Einen Überblick über einige Beispiele warmfester nichtaustenitischer Stähle gibt *Tafel 2*. Aus den darin aufgeführten NiCrMo-Stählen werden die größten heutzutage herstellbaren Schmiedestücke für Generator- und Niederdruckturbinenwellen im Gewicht von rd. 240 t aus 500-t-Schmiedeblocken hergestellt. Die Anforderungen, die der Energemaschinenbauer an solche Stücke stellt, sind in einer kürzlich erschienenen Arbeit beschrieben [15].

Eine gesonderte Entwicklung führte zu den heutigen schweißbaren warmfesten Feinkornbaustählen. Es sind Güten auf der Basis Mangan-Kohlenstoff, Mangan-Kohlenstoff-Nickel oder auch Mangan-Kohlenstoff-Nickel-Kupfer, deren Warmstreckgrenzen durch wahlweise Zusätze von Molybdän, Vanadin oder Niob angehoben sind. Wichtige Werkstoffe dieser Gruppe werden in der neueren Literatur beschrieben [16]. Auf die warmfesten Varianten der Stähle nach Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 089 [17] sei in diesem Zusammenhang hingewiesen.

Die Mitteldruck-Dampfturbinenläuferstähle 28 CrMoNiV 49 und 30 CrMoNiV 5 11, die in *Tafel 2* angeführt sind, sind als vorläufige Endstufen einer längeren Optimierungsarbeit in engem Zusammenwirken von Stahlherstellern und Verbrauchern und als wirtschaftlichste warmfeste Stähle für diesen Verwendungszweck zu sehen, wenn man den Einsatz von Legierungselementen und die damit erzielten Festigkeits- und Warmfestigkeitswerte berücksichtigt.

Aus dem CrMoV-Stahl X 21 CrMoV 12 1 wurden seit rund 30 Jahren Dampfturbinen- und vor allem Gasturbinenläufer bis zu 1100 mm Fertigdurchmesser hergestellt. *Bild 6* gibt als Beispiel den mechanisch bearbeiteten Läuferkörper der ersten europäischen 50 MW-Heliumturbine für ein Heizkraftwerk der öffentlichen Stromversorgung wieder.

Bildnachweis:

Bild 2: Krupp Stahlwerke Südwestfalen/Siegen;
Bilder 3 und 4: Krupp Stahl, Bochum;
Bild 5: Albert Sempell, Mönchengladbach;
Bild 6: GHF, Sterkrade.

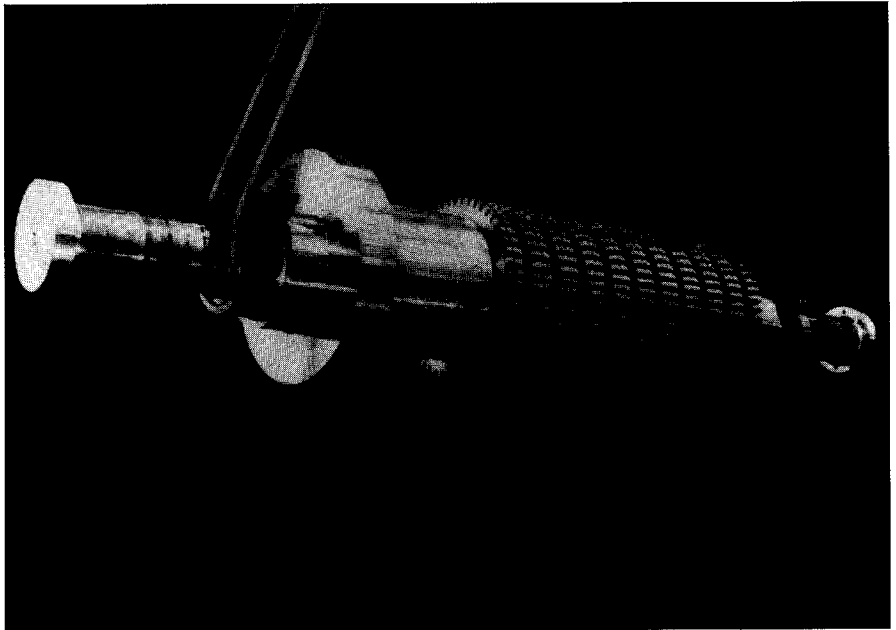


Bild 6: Turbinenläufer aus einem CrMoV-Stahl mit rd. 12% Chrom für die erste europäische 50 MW-Heliumturbine in einem städtischen Stromversorgungsunternehmen.

Stahlsorte	Norm	Anwendungsbeispiel	obere Betriebstemperatur (°C)
WStE 26 bis 36 WStE 39 bis 51	SEW 089	Formstücke, Armaturen	350—400
15 MnNi 6 3 20 MnMoNi 55	— SEW 640	Formstücke, Schmiedestücke in Energieerzeugungsanlagen	350 400
19 Mn 5 15 Mo 3 13 CrMo 44 10 CrMo 9 10 14 MoV 6 3	DIN 17 243 (in Vorbereitung)	Formstücke, Armaturen, Flansche im Dampferzeuger- u. Apparatebau	500 500 500 500 550
26 NiCrMoV 8 5 26 NiCrMoV 11 5 26 NiCrMoV 14 5	SEW 555 (In Vorbereitung)	Niederdruck-Dampfturbinen	300—350
28 CrMoNiV 49 30 CrMoNiV 5 11	SEW 555 (in Vorbereitung)	Mitteldruck- u. Hochdruck-Dampfturbinenwellen	530—550
X 12 CrNiMo 12	Luftfahrtwerkstoff	Verdichterscheiben und -Schaufeln	550
X 21 CrMoV 12 1	SEW 555 + 670 DIN 17 243	Formstücke, Dampf- und Gasturbinenläufer	580—600
X 19 CrMoVNi 11 1	(DIN 17 240)	Stäbe, Schaufeln, Ringe, Scheiben für Gasturbinen	580—600

Tafel 2: Beispiele für warmfeste nichtaustenitische Stähle

Literaturhinweis:

- [1] Petri, R., E. Schnabel, P. Schwaab, Hauptversammlung des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, 8. 11. 1979, Archiv für Eisenhüttenwesen 51 (1980), S. 355/60 u. 52 (1981), S. 27/32 u. 65/76.
- [2] Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 590-61, „Druckwasserstoffbeständige Stähle“, 2. Ausg. 1961.
- [3] Jäkel, U., in „Werkstoffkunde der gebräuchlichen Stähle“, Teil 2, S. 151/158, Verlag Stahl Eisen 1977.
- [4] Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 680-70 „Kaltzähe Stähle“ 2. Ausg. 1970.
- [5] DIN 17 135 „Alterungsbeständige Stähle“, Ausg. 1964.
- [6] Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 089-70 „Schweißbare Feinkornbaustähle“, 1. Ausg. 1970.
- [7] DIN 17 440 „Nichtrostende Stähle“, Ausg. 1972.
- [8] Schwarz, W., O. Gründer, Berg- u. Hüttenmänn. Monatshefte 122 (1977), S. 521/28.
- [9] AD-Merkblatt W10 „Werkstoffe für tiefe Temperaturen, Eisenwerkstoffe“, Ausg. 1976.

- [10] Piehl, K. H., C. Pütter in „Werkstoffkunde der gebräuchlichen Stähle“, Teil 2, S. 139/50, Verlag Stahl Eisen 1977.
- [11] Baumann, K., J. Schulte, G. Waltenberger, VBG Kraftwerkstechnik H. 10 (1978), S. 760/64.
- [12] Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 670-69 „Hochwarmfeste Stähle“, Ausg. 1969.
- [13] Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 640-75 „Stähle für Bauteile im Primärkreislauf von Kernenergieanlagen“, Ausg. 1975.
- [14] Gerlach, H., in „Werkstoffkunde der gebräuchlichen Stähle“, Teil 2, S. 106/120, Verlag Stahl Eisen 1977.
- [15] Wiemann, W., VBG Kraftwerkstechnik 59 (1979), S. 937/951.
- [16] Forch, K., in „Festigkeits- und Bruchverhalten bei höheren Temperaturen“, Verlag Stahl und Eisen, 1980.
- [17] Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 089 „Schweißbare Feinkornbaustähle“, Ausgabe Juli 1970.