

Verarbeitungshinweise

für austenitische Edelstähle
und Nickelbasislegierungen

219

VDM
Elements

Autoren:

Hardy Decking
Georg Karl Grossmann

VDM Metals GmbH
Plettenberger Str. 2
58791 Werdohl

Inhalt

- 4 Einleitung**
- 5 Umformen**
 - 5 Warmumformung
 - 6 Kaltumformung
- 8 Wärmebehandlung**
- 9 Oberflächenbehandlung**
 - 9 Strahlen
 - 10 Beizen
- 10 Zerspanen**
 - 11 Drehen
 - 12 Fräsen
 - 13 Bohren
 - 15 Senken
Gewindeschneiden
- 15 Danksagung**

Einleitung

In dieser Broschüre werden die wichtigsten im Apparate- und Rohrleitungsbau vorkommenden Bearbeitungs- und Verarbeitungsvorgänge - außer dem Verbinden wie Schweißen, Löten und Kleben - von hochlegierten, austenitischen Edelstählen und Nickelbasislegierungen und ihre speziellen Eigenarten aufgrund ihrer besonderen mechanischen und physikalischen Eigenschaften behandelt.

Die aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und Herstellverfahren korrosions- beziehungsweise hochtemperaturbeständigen Werkstoffe sollen diese Eigenschaften auch am fertigen Bauteil aufweisen, das heißt, dem Lieferzustand der Halbzeugprodukte wie Blech, Rohr oder Stange entsprechen.

In den Tabellen 1 bis 3 werden alle Werkstoffe vorgestellt, die diesen Richtlinien unterliegen. Die Legierungsbestandteile der in den Tabellen 1 bis 3 aufgeführten Werkstoffe führen zu einer

VDM-Bezeichnung				Richtanalyse in Gew.-%				
Cronifer®	Alloy	UNS	W.-Nr.	Ni	Cr	Mo	Fe	Sonstige
1925 hMo	926	N08926	1.4529	25	21	6,5	Rest	Cu 0,9; N 0,19
Nicrofer®	Alloy	UNS	W.-Nr.	Ni	Cr	Mo	Fe	Sonstige
3033	33	R20033	1.4591	31	33	1,6	Rest	Cu 0,6; N 0,4
3127 LC	28	N08028	1.4563	31	27	3,5	Rest	Cu 1,3
3127 hMo	31	N08031	1.4562	31	27	6,5	Rest	Cu 1,3; N 0,2
3620 Nb	20	N08020	2.4660	38	20	2,4	Rest	Cu 3,4; Nb 0,2
4221	825	N08825	2.4858	39	23	3,2	Rest	Cu 2,2; Ti 0,8
4823 hMo	G-3	N06985	2.4619	48	23	7	19	Cu 2; Nb 0,3
6020 hMo	625	N06625	2.4856	63	22	9	2	Nb 3,4
6616 hMo	C-4	N06455	2.4610	66	16	16		Ti 0,3
5716 hMoW	C-276	N10276	2.4819	57	16	16	6	W 3,5; V 0,2
5923 hMo	59	N06059	2.4605	59	23	16		

Tabelle 1 – Korrosionsbeständige Cr-Ni-Stähle und Ni-Cr-Mo-(Fe)-Legierungen

				Richtanalyse in Gew.-%					
VDM-Bezeichnung	Alloy	UNS	W.-Nr.	Ni	Cr	Fe	Cu	Mo	Sonstige
VDM Ni 99.2	200	N02200	2.4066	99,2					
VDM LC-Nickel 99.2	201	N02201	2.4068	99,2					
Nicorros®	400	N04400	2.4360	64		1,8	32		Mn 1
Nicorros® Al	K-500	N05500	2.4375	64		1,0	30		Al 2,8; Mn 0,6; Ti 0,5
Cunifer® 30	CuNi 70/30	C71500	2.0882	31		0,6	67		Mn 0,7
Cunifer® 10	CuNi 90/10	C70600	2.0872	10		1,6	87		Mn 0,8
Nimofer® 6928	B-2	N10665	2.4617	69	0,8	1,7		28	

Tabelle 2 – Nickel, Ni-Cu, Cu-Ni, und Ni-Mo-Legierungen

deutlich höheren Festigkeit im Vergleich zu der von normalen nichtrostenden Chrom-Nickel-Edelstählen, wie zum Beispiel dem weit verbreiteten Werkstoff 1.4571, der auch heute noch vielfach als V4A, seiner ursprünglichen Bezeichnung, bekannt ist. Dies gilt sowohl bei Raumtemperatur als auch bei erhöhten Temperaturen, wie sie bei der Warmformgebung vorkommen.

Die hochlegierten, austenitischen Edelstähle und Nickelbasislegierungen lassen sich nach allen Verfahren der spanlosen und spanabhebenden Formgebung bearbeiten, die auch für andere Metalle üblich sind. Es werden jedoch an Werkzeuge und Werkzeugmaschinen besonders hohe Ansprüche gestellt. Die Bearbeitungsverfahren sind heute gut beherrschbar, sie sind jedoch häufig kostenintensiver, verglichen mit den üblichen Konstruktionsstählen. Dies ist bei der Kalkulation entsprechend zu berücksichtigen.

Umformen

Bei der Herstellung von Apparaten sind Warm- und Kaltumformungen unentbehrliche Verarbeitungsschritte. Warmformgebung findet im Allgemeinen bei Temperaturen oberhalb oder in der Nähe der Rekristallisationstemperatur statt,

während Kaltumformung bei Raumtemperatur oder deutlich unterhalb der Rekristallisationstemperatur erfolgt. Bei der Warmformgebung ist der Widerstand gegen Verformung wesentlich geringer als bei der Kaltverformung. Mit zunehmender Kaltverfestigung nimmt der Widerstand gegenüber weiterer Verformung wesentlich zu.

Warmumformung

Warmumformung findet im Bereich zwischen Rekristallisations- und Solidustemperatur statt. Hierdurch ist die Formänderungsfestigkeit stark herabgesetzt, und die Umformkräfte sind entsprechend geringer.

Reichen die zur Umformung erforderlichen Kräfte bei sinkender Temperatur wegen der zunehmenden Formänderungsfestigkeit nicht mehr aus, muss die Warmformgebung beendet und das Werkstück wieder aufgeheizt oder schnell auf unter etwa 100 °C abgekühlt werden.

In Tabelle 4 sind beispielhaft Warmformgebungs- und Glühtemperaturen einiger Sonderedelstähle und Nickelbasislegierungen dargestellt.

VDM-Bezeichnung				Richtanalyse in Gew.-%				
Nicrofer®	Alloy	UNS	W.-Nr.	Ni	Cr	Mo	Fe	Sonstige
3220 H	800 H	N08810	1.4876 1.4958	31	20		Rest	Si 0,4; Al 0,3; Ti 0,3
3220 HP	800 HP	N08811	1.4959	31	20		Rest	Si 0,4; Al 0,4; Ti 0,4
3718	(330)	(N08330)	1.4864	36	16		Rest	Si 1,5
45 TM	45 TM	N06045	2.4889	45	28		24	Si 2,7; S.E. 0,08
4626 MoW	333	N06333	2.4608	46	25	3	Rest	W 3; Co 3; Mn 1,6
4722 Co	X	N06002	2.4665	Rest	22	9	18	Co 1,5; W 0,6
5520 Co	617	N06617	2.4663	54	22	9	1	Co 12; Al 1; Ti 0,4
6023 H	601 H	N06601	2.4851	60	23		14	Al 1,4
6025 HT	602 CA	N06025	2.4633	60	25		9	Al 2,1; Y 0,1
7216 H	600 H	N06600	2.4816	73	16		9	

Tabelle 3 – Hochwarmfeste und hitzebeständige Nickelbasislegierungen

Bei der Warmformgebung ist zur Vermeidung einer inhomogenen Mischkornstruktur auf eine möglichst gleichmäßige Verformung zu achten. Außerdem sollte die Umformtemperatur bei geringen Umformgraden von etwa ≤ 30 Prozent möglichst an der unteren Grenze liegen, um Grobkornbildung zu vermeiden. Bei Umformungen mit höheren Umformgraden von > 30 Prozent werden höhere Umformtemperaturen empfohlen.

Nach jeder Warmumformung ist eine Wärmebehandlung nach Angabe des Halbzeugherstellers durchzuführen. Details zur Wärmebehandlung sind im Abschnitt Wärmebehandlung beschrieben. Die aktuellen Glühtemperaturen sind dabei den entsprechenden Werkstoffblättern der Thyssen Krupp VDM zu entnehmen.

Kaltumformung

Von den Verfahren der Kaltumformung werden hier nur die für den Apparatebau wichtigsten wie Abkanten, Biegen und Runden behandelt.

Austenitische Edelstähle und Nickelbasislegierungen lassen sich im wärmebehandelten Zustand gut kalt umformen und weisen eine gute Zähigkeit auf. Spezifische Werkstoffeigenschaften wie die 0,2 %-Dehngrenze sowie der Umfang der Kaltverfestigung und der damit zusammenhängende Dehnungsabfall sind bei der Verarbeitung

zu berücksichtigen. Im Gegensatz zu unlegierten oder niedriglegierten Stählen lassen sich austenitische Chrom-Nickel-Edelstähle nur durch Kaltumformen härten. Der durch eine Kaltumformung erzielte Festigkeitsanstieg hängt dabei von der Zusammensetzung des Stahles ab, wobei besonders der Nickelgehalt bestimmend wirkt.

Abbildung 1 zeigt am Beispiel der Werkstoffe 1.4301 (18/8 CrNi) und 2.4856 (Alloy 625), wie eine Kaltumformung die mechanischen Eigenschaften von Werkstoffen verändert.

Alle Werkstoffe neigen zu deutlicher Kaltverfestigung bei gleichzeitiger Abnahme der Bruchdehnung im Zugversuch. Nach den deutschen Regeln für Druckbehälter ist daher zum Beispiel bei austenitischen Edelstählen nach einer Kaltumformung von mehr als 15 Prozent eine nachträgliche Wärmebehandlung gemäß AD-Merkblatt HP 7/3 erforderlich.

Bedingungen, unter denen nach einer Kaltumformung auf eine Wärmebehandlung verzichtet werden kann, wie nach einer Umformung zu Korbbojenböden, sind ebenfalls im vorgenanntem AD-Merkblatt festgelegt.

Abbildung 2 zeigt, wie der Grad der Kaltverformung in dem relativ einfachen Biegevorgang

VDM-Bezeichnung	Alloy	UNS	W.-Nr.	Warmumformtemperatur °C	Lösungsglühtemperatur °C	Weichglühtemperatur °C
Cronifer® 1925 hMo	926	N08926	1.4529	1200 - 900	1150 - 1180	-
Nicrofer® 3033	33	R20033	1.4591	1200 - 1000	1100 - 1150	-
Nicrofer® 3127 hMo	31	N08031	1.4562	1200 - 1050	1150 - 1180	-
Nicrofer® 5716 hMoW	C-276	N10276	2.4819	1200 - 950	1100 - 1160	-
Nicrofer® 5923 hMo	59	N06059	2.4605	1180 - 950	1100 - 1180	-
Nicrofer® 6020 hMo	625	N06625	2.4856	1150 - 900	-	950 - 1050
Nicrofer® 3220 H	800 H	N08810	1.4876	1200 - 900	1150	-
Nicrofer® 45 TM	45 TM	N06045	2.4889	1180 - 900	1160 - 1200	-
Nicrofer® 4626 MoW	333	N06333	2.4608	1180 - 950	1150 - 1180	-
Nicrofer® 6023 (H)	601 (H)	N06601	2.4851	1200 - 900	(1100 - 1180)	920 - 980
Nicrofer® 6025 HT	602 CA	N06025	2.4633	1200 - 900	1180 - 1220	-
Nicrofer® 7216 (H)	600 (H)	N06600	2.4816	1200 - 900	(1080 - 1150)	920 - 1000

Tabelle 4 – Warmumform- und Wärmebehandlungstemperaturbereiche für ausgewählte Sonderedelstähle und Nickelbasislegierungen

eines Bleches, welches in der Annäherung einem einachsigen Spannungszustand entspricht, ermittelt werden kann. Nach dieser Berechnungsformel ergibt ein Biegeradius (r = innerer Radius) von 3 x Wanddicke einen Umformgrad von etwa 14 Prozent.

Ein Biegeradius von 3 x Wanddicke gestattet daher meist den Einsatz des Bauteils ohne nachfolgende Wärmebehandlung.

Für die meisten VDM-Werkstoffe ist eine Kaltumformung bis zu 15 Prozent ohne nachfolgende Wärmebehandlung zulässig. In einzelnen Fällen kann jedoch auch, je nach Einsatzzweck und

Werkstoff, bereits bei einer Kaltumformung von ≤ 15 Prozent eine Wärmebehandlung erforderlich sein, beispielsweise beim Einsatz lösungsgeglühter Hochtemperaturwerkstoffe. In anderen Fällen wiederum kann ein höherer Umformgrad ohne Wärmebehandlung zugelassen werden, insbesondere, wenn später im Umformbereich nicht geschweißt wird.

Da eine Wärmebehandlung mit den erforderlichen Folgearbeiten wie Beizen und Richten sehr kostenintensiv ist, empfiehlt es sich einerseits, konstruktiv möglichst große Biegeradien vorzusehen, andererseits jedoch, insbesondere bei kritischen Einsatzfällen, diese Problematik frühzeitig zwischen Betreiber, Apparatebauer und Werkstoffhersteller kostenoptimal zu lösen.

Einige Werkstoffe, insbesondere molybdänhaltige, neigen zu Ausscheidungen, wenn nach größeren Kaltumformungen im Bereich der Umformung geschweißt wird. Durch Schweißarbeiten können diese Bereiche sensibilisiert werden, das heißt, an Korrosionsbeständigkeit verlieren.

Wie aus Abbildung 1 ersichtlich ist, steigt die 0,2 %-Dehngrenze bei einem Kaltumformgrad von 15 Prozent auf nahezu den zweifachen Ausgangswert. Einige hoch legierte Sonderedelstähle und Nickelbasislegierungen weisen bereits im Lieferzustand relativ hohe Festigkeitswerte auf, was die benötigte Umformkraft für diese Werkstoffe deutlich erhöht, wie schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

Es kann daher vorkommen, dass Biegewalzen und Abkantpressen die erforderliche Pressbeziehungsweise Durchzugskraft nicht mehr aufbringen können. In diesen Fällen kann man sich behelfen mit einem Anwärmen der Werkstücke auf einen Temperaturbereich, bei dem die Festigkeit des Werkstoffes deutlich unter den Wert bei Raumtemperatur abfällt und der Formgebungswiderstand somit verringert wird.

Im weichgeglühten Zustand sind Chrom-Nickel-Edelstähle unmagnetisch. Durch Kaltumformen können sie allerdings schwach ferromagnetisch werden.

Bei der Umformung austenitischer Chrom-Nickel-Edelstähle und Nickelbasislegierungen werden oft die gleichen Werkzeuge, Vorrichtungen und Maschinen benutzt wie für die Umformung von C-Stählen. Auf der Oberfläche der Werkzeuge

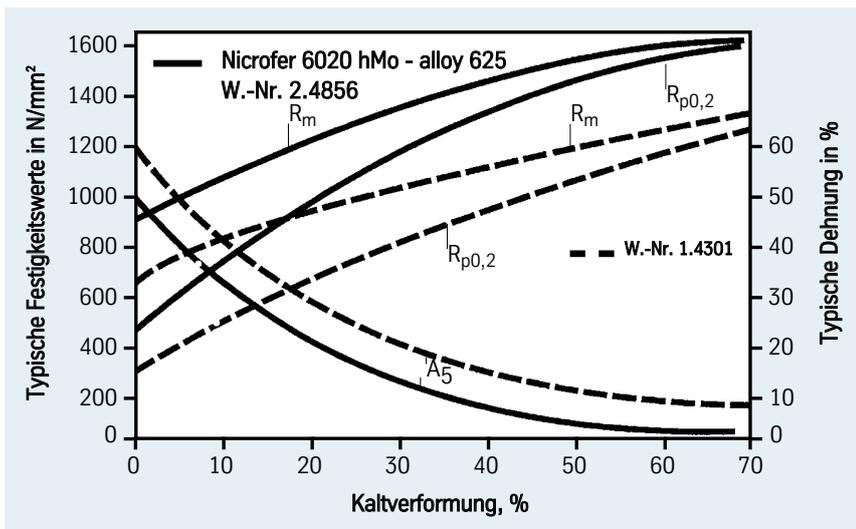


Abb. 1 – Einfluss der Kaltverfestigung auf die mechanischen Werte

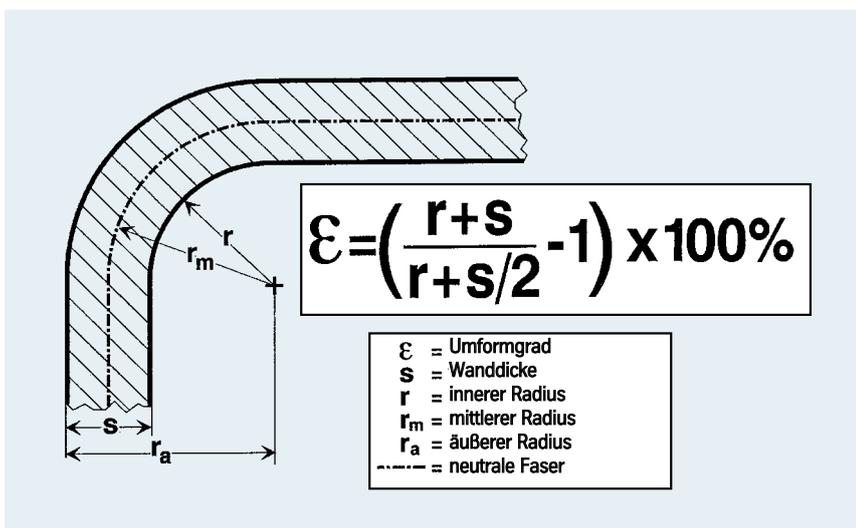


Abb. 2 – Berechnung des Kaltumformgrades beim Biegen

können daher Ferritpartikel haften, die die Passivschicht des Bauteils zerstören können und damit die Korrosionsbeständigkeit lokal vermindern, was im späteren Einsatz zu Korrosionsangriff führen kann. Es ist deshalb darauf zu achten, dass Werkzeuge oder Auflagen gründlich gesäubert werden, so dass kein ferritischer Abrieb von C-Stahl auf die hochlegierten Werkstücke aufgebracht werden kann.

Die Oberflächen von Bauteilen, die im späteren Betrieb Feuchtigkeit oder korrosiven Medien ausgesetzt sind, sollten daher vor Ablieferung/Inbetriebnahme auf Ferritfreiheit überprüft werden. Dies kann durch Bestreichen der zu prüfenden Oberfläche mit einer frisch hergestellten grüngelblichen Lösung aus 5 Prozent Kaliumhexacyanoferrat und 1 Prozent Salpetersäure vorgenommen werden. Nach einer Einwirkzeit von etwa 30 Sekunden ist ein Filterpapier auf die bestrichene Fläche zu legen. Stellen, an denen freies Eisen vorliegt, sind dann am Auftreten blauer Pünktchen zu erkennen. Dieser so genannte "Ferroxyl-Test für freies Eisen" ist in der ASTM Spezifikation A380 ausführlich beschrieben. Sollten auf dem fertigen Bauteil ferritische Partikel festgestellt werden, muss das Bauteil einem weiteren Reinigungsschritt - Beizen mit anschließender Passivierung - unterzogen werden, ehe es ausgeliefert und in Betrieb genommen wird.

Faktor		1,0	1,5	2,0
Werkstoff	Alloy	W.-Nr.	Zugfestigkeit min. R_m , N/mm ²	
Kesselblech H II		1.0425	420	
NIROSTA 4571	316	1.4571	520	
Cronifer® 1925 LC	904 L	1.4539	520	
Nicrofer® 45 TM	45 TM	2.4889	620	
Cronifer® 1925 hMo	926	1.4529	650	
Nicrofer® 3127 hMo	31	1.4562	650	
Nicrofer® 6025 HT	602 CA	2.4633	675	
Nicrofer® 5923 hMo	59	2.4605	690	
Nicrofer® 5520 Co	617	2.4663	750	
Nimofer® 6928	B-2	2.4617	760	
Nicrofer® 6020 hMo	625	2.4856	830	

Abb. 3 – Vergleich der Kräfte für die Kaltumformung verschiedener Legierungen

Wärmebehandlung

Durch Kalt- oder Warmumformung werden beim Verarbeiter die im Anlieferungszustand vorliegenden mechanischen und korrosionschemischen Eigenschaften verändert. Diese sind jeweils nur durch eine gezielte rekristallisierende Wärmebehandlung wieder einzustellen. Die Wärmebehandlung bewirkt eine Neubildung des Gefüges und damit einen vollständigen Abbau der durch die Umformung eingetretenen Eigenschaftsänderungen. Wärmebehandlungen sind jedoch aufwändig und oft nicht ohne weiteres an einem Bauteil durchzuführen.

Nach der Warmumformung ist das Bauteil einer Wärmebehandlung zu unterziehen. Nach der Kaltumformung kann unter Umständen auf eine Wärmebehandlung verzichtet werden. Ob ein Fertigteil einer Wärmebehandlung unterzogen werden muss, hängt vom Umfang der Kaltumformung ab (siehe Kapitel **Kaltumformung**) und ist - sofern nicht in Vorschriften festgelegt - im Einzelfall mit dem Besteller zu vereinbaren.

Vor einer Wärmebehandlung sind die Werkstückoberflächen von Verunreinigungen wie Schmierfetten, Ölen, Markierungsfarben etc. mit chlorfreien Lösungsmitteln wie Azeton oder Isopropanol zu reinigen. Vom Einsatz von Trichloräthylen (TRI), Perchloräthylen (PER) und Tetrachlorkohlenstoff (TETRA) ist jedoch unter allen Umständen abzuweichen. Verunreinigungen können unter anderem Schwefel, Phosphor und niedrig schmelzende Metalle enthalten, die in Verbindung mit Nickel niedrig schmelzende Phasen bilden können. Diese können zur Zerstörung des Werkstoffgefüges und damit zu einem Schadensfall beim Einsatz des Bauteils führen. Wärmebehandlungen sollten daher aufgrund der Abwesenheit von Verunreinigungen und enger Temperaturführung bevorzugt in Elektroöfen unter Vakuum oder Schutzgas vorgenommen werden.

Wärmebehandlungen in Öfen mit Gas- oder Ölfeuerungen unter normaler Luftatmosphäre sind ebenfalls zulässig, wenn nur eine sehr geringe Verunreinigung der Ofenatmosphäre auftritt, die die Einstellung einer neutralen oder leicht oxidierenden Ofenatmosphäre erlaubt. Schwankungen in der Ofenatmosphäre zwischen oxidierenden und reduzierenden Bedingungen sind zu vermeiden, wie auch eine direkte Beaufschlagung der Werkstücke durch Flammen. Das Erreichen einer möglichst schwefelarmen Ofenatmosphäre setzt weiterhin voraus, dass eingesetzt

te Brennstoffe einen möglichst niedrigen Schwefelgehalt aufweisen. Erdgas sollte einen Anteil von weniger als 0,1 Gew.-% Schwefel enthalten. Heizöl mit einem Anteil von max. 0,5 Gew.-% Schwefel ist ebenfalls geeignet.

Empfohlene Glühtemperaturen sind den einzelnen Werkstoffblättern zu entnehmen. In Tabelle 4 sind diese für ausgewählte Sonderedelstähle und Nickelbasislegierungen aufgeführt.

Werkstücke aus hoch molybdänlegierten Werkstoffen sind schnell zu erhitzen und deshalb möglichst in den bereits auf Sollwert aufgeheizten Ofen einzulegen. Zu diesen Werkstoffen gehören die 6 Prozent-Molybdän-Edelstähle Cronifer 1925 hMo – alloy 926 und Nicrofer 3127 hMo – alloy 31 sowie die Nickelbasislegierungen Nicrofer 6020 hMo - alloy 625, Nicrofer 6616 hMo - alloy C-4, Nicrofer 5716 hMoW – alloy C-276 und Nicrofer 5923 hMo - alloy 59.

Allgemein empfohlene Richtwerte für Haltezeiten nach Erreichen der Solltemperatur sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Die Abkühlung der molybdänreichen austenitischen Edelstähle und Nickelbasislegierungen muss rasch erfolgen, um unerwünschte Ausscheidungen zu vermeiden. Eine verzögerte Abkühlung – zum Beispiel im Ofen – ist unter allen Umständen zu vermeiden. Dabei entstehen Ausscheidungen, die sich bevorzugt auf Korngrenzen bzw. entlang korngrenznaher Bereiche ausbilden. Derartige Ausscheidungen beeinträchtigen Korrosionsbeständigkeit und Zähigkeitseigenschaften eines Werkstoffes.

Bewährt haben sich Abkühlgeschwindigkeiten von ≥ 150 Grad Celsius/min von werkstoffspezifischen Lösungsglühtemperaturen bis auf unter etwa 500 Grad Celsius. Während dünnwandige Werkstücke sich auch in ruhender Luft schnell abkühlen, ist dies bei dickwandigen nur durch ein Abschrecken in Wasser beziehungsweise durch Gebläsewind zu erreichen. Als Faustregel

kann gesagt werden, dass die Abkühlung so einzurichten ist, dass das Werkstück innerhalb von drei Minuten schwarz wird.

Oberflächenbehandlung

Metallisch blanke Oberflächen von Chrom-Nickel-Edelstählen und Nickelbasislegierungen, die für nasschemisch beanspruchte Bauteile in der Regel erforderlich sind, liegen nur nach einer Wärmebehandlung in Schutzgasöfen in trockener Wasserstoffatmosphäre oder in Ammoniakspaltgas vor, wobei das Spaltgas vor dem Eintritt in den Ofenraum vollständig gespalten sein muss, um eine Aufstickung speziell bei Chrom-Nickel-Edelstählen zu vermeiden. Bei hiervon abweichenden Wärmebehandlungen in Luft entstehen auf der Oberfläche von Werkstücken Oxide, die für Anwendungen unter nasschemischen Bedingungen durch eine Oberflächenbehandlung wie Strahlen und Beizen entfernt werden müssen.

Bei Bauteilen, die im Hochtemperaturbereich eingesetzt werden, ist eine oxidierte Oberfläche allerdings eher wünschenswert, da eine Oxidschicht, besonders wenn sie fest haftend ist, Schutzwirkung hat und einem Korrosionsangriff durch Hochtemperatur entgegenwirkt. Die Notwendigkeit des Strahlens/Beizens sollte in solchen Fällen immer vor der Fertigung eines Bauteils mit dem Endkunden festgelegt werden.

Strahlen

Da Oxide auf der Oberfläche höher nickelhaltiger Werkstoffe sehr fest haften, empfiehlt sich für solche Bauteile, sofern sie oberflächenbehandelt werden müssen, vor dem Beizen die Oberflächen mit geeignetem Strahlkies oder mit Glasperlen zu strahlen oder beispielsweise mit Fächerscheiben, die mit einem Korn von 80 bis 120 beschichtet sind, zu schleifen. Sofern dem Strahlen ein Beizvorgang folgt, ist die Verwendung eines Strahlguts in Form kleiner C-Stahlkugeln im Durchmesser < 1 Millimeter ebenfalls eine ausreichende und wirtschaftliche Alternative.

Halbzeugdicke	Haltezeit
≤ 10 mm	3 min/mm Dicke
> 10 mm bis ≤ 20 mm	30 min + 2 min/mm Dicke > 10 mm
> 20 mm	50 min + 1 min/mm Dicke > 20 mm

Tabelle 5 – Temperaturhaltezeiten bei der Wärmebehandlung in Abhängigkeit von der Halbzeugdicke

Beizen

Um Oxide auf wärmebehandelten Oberflächen oder im Bereich von Schweißungen zu entfernen, werden die fertigen Bauteile üblicherweise in Beizbäder getaucht, die 10 bis 22 Prozent Salpetersäure und 1 bis 3 Prozent Flußsäure enthalten. Der Flußsäureanteil ist der wirksame Teil der Beize, der den Zunder auflöst. Er ist daher der Dicke und Haftfähigkeit der Oxidschicht, die maßgebend von der Ofenatmosphäre, der Glühzeit und der Temperatur der Wärmebehandlung abhängt, anzupassen. Die Salpetersäure hingegen dient dazu, die entzundern Oberflächen zu passivieren. Alternativ können handelsübliche Sprühbeizen oder Beizpasten benutzt werden. Diese Beizprodukte bieten sich insbesondere zur Behandlung großer Bauteile an, die nicht in konventionelle Beiztanks passen.

Typische Beizeiten bei Raumtemperatur für verschiedene Werkstoffgruppen zeigt Tabelle 6. Die erforderlichen Beizeiten sind abhängig vom Werkstoff, der Zunderschichtdicke und der Temperatur des Beizbades. Im Zweifelsfall sollten optimale Beizparameter anhand von Beiztests vor dem Beizen an dem Bauteil ermittelt werden.

Sofern technische Voraussetzungen gegeben sind, die das Einhalten gesetzlicher Vorgaben zum Schutz der Umwelt sicherstellen, wie zum Beispiel das Absaugen schädlicher säurehaltiger Abluft, ist das Erwärmen des Beizbades auf etwa 40 Grad Celsius vorteilhaft. Diese Maßnahme verkürzt den Beizvorgang wesentlich.

Bei Werkstoffen mit hohen Anteilen an Kohlenstoff und bei Nickel-Molybdän- und Nickel-Kupfer-Werkstoffen ohne oder nur mit sehr niedrigen Chromanteilen muss die Länge des Beizvorgang sehr genau überwacht werden, da diese Werkstoffe sehr empfindlich auf ein Überbeizen reagieren. Sofern Beizbäder auf der Basis von Schwefel- und Salzsäure zum Einsatz kommen, ist die Gefahr des Überbeizens jedoch weniger gegeben.

Direkt nach dem Beizen sind die Bauteile gründlich mit sauberem Wasser zu spülen und eventuell verbliebene Beizrückstände abzubürsten. Nach dem Beizen noch anhaftende Oxidreste sind mit einer Edelstahlbürste zu entfernen. Bei Bedarf ist der Beizvorgang zu wiederholen.

Weitere Entzunderungsverfahren bedienen sich geschmolzener Alkalien, die nur den Zunder, jedoch nicht den Grundwerkstoff angreifen. Diese Verfahren werden häufig bei warmgewalzten Erzeugnissen als Vorbehandlung vor dem eigentlichen Beizen angewandt. Für den nachfolgenden Beizvorgang kommt sodann verdünnte, gegen Grundwerkstoffangriff inhibierte Schwefelsäure zum Einsatz.

Sofern Sprühbeizen und Beizpasten verwendet werden, ist eine zusätzliche Passivierung des Bauteils nicht erforderlich, da diese bereits während des Beizvorgangs eintritt.

Für alle Beizschritte sind die gesetzlichen Abwasservorschriften zu beachten. Es dürfen nur ordnungsgemäß neutralisierte Abwässer zur Entsorgung kommen. In vielen Fällen ist das Beizen durch entsprechende Fachbetriebe eine wirtschaftliche Alternative.

Je nach Bauteilform und Größe bietet sich das mechanische Entzundern mittels Schwabbel- oder Fächerscheiben an. Für den letzten Schliff ist - ggf. in Abstimmung mit dem Besteller – eine Korngröße von 80 oder feiner zu verwenden.

Um Bauteilen optimale Korrosionsbeständigkeit zu verleihen ist es vorteilhaft, nach dem Schleifen stets ein Beizen und Passivieren der medienberührten Oberflächen vorzunehmen.

Zerspanen

Hohe Kaltverfestigung und Zähigkeit sowie schlechte Wärmeleitfähigkeit sind charakteristische Merkmale austenitischer Edelstähle und Nickelbasislegierungen. Bei der Zerspanung ist

Werkstoffgruppe	Typische Beizezeit
Cr-Ni-Edelstähle	2 - 8 h
Ni-Cr-Mo-(Fe)-Legierungen	8 - 24 h
Nickel und Ni-Cu-Legierungen	10 - 15 min
Ni-Mo-Legierungen	8 - 10 min

Tabelle 6 – Typische Beizeiten für verschiedene Werkstoffgruppen bei Raumtemperatur

auf diese Eigenschaften durch folgende Maßnahmen Rücksicht zu nehmen:

- Verwendung ausschließlich gut geschliffener, scharfer Werkzeuge mit glatten Oberflächen.
- Voraussetzung zur Erzielung eines sauberen Schnittes ist höchste Stabilität von Werkzeug und Werkzeugmaschine sowie eine sichere Werkstückeinspannung.
- Reichliche Kühl- und Schmiermittelzufuhr.
- Das Werkzeug muss ständig im Eingriff sein. Bei relativ niedriger Schnittgeschwindigkeit ist der Vorschub eher größer als zu klein zu wählen, um eine Kaltverfestigung des Werkstoffes zu vermeiden.
- Falls Schwingungen auftreten, muss die Ursache sofort festgestellt und beseitigt werden. Schwingungen führen immer zur Zerstörung der Schneide.

Von den verschiedenen Bearbeitungsverfahren werden hier hauptsächlich Drehen, Fräsen und Bohren angesprochen. Für die meisten übrigen Arbeitsverfahren wie Hobeln, Sägen etc. gelten ähnliche Regeln wie für das Drehen.

Drehen

In der Praxis werden heute bei der Bearbeitung metallischer Werkstoffe vorwiegend Werkzeuge mit Hartmetall-Wendeschneidplatten eingesetzt. Der Einsatz dieser Werkzeuge, mit denen die höchsten Abtragsraten erzielt werden können, wird für die meisten Dreharbeiten empfohlen, bei denen ein kontinuierlicher Abtrag vorgesehen ist.

Um Schnittgeschwindigkeit und Vorschub festzulegen, sind Werkzeugbeanspruchung und Werkzeugverschleiß zu beachten.

Der Verschleiß der Werkzeuge wird durch folgende Vorgänge beeinflusst:

- Abtrag durch mechanische Überbeanspruchung (z.B. Ausbrechen bei Schwingungen)
- Abrieb
- Abscheren von Pressschweißstellen
- Belagbildung
- Oxidation

Der Abtrag durch mechanische Überbeanspruchung ist im Verhältnis der Eigenschaften des zu bearbeitenden Werkstoffes zu denen des Werkzeugs zu sehen. Bei zähen Werkzeugen wird die Schneidkante plastisch verformt. Dieser Fall tritt auch ein, wenn die Temperatur an der Schneidkante zum Erweichen des Werkzeuges führt. Für die hier behandelten Werkstoffe, die eine schlechte Wärmeleitfähigkeit haben, trifft dies besonders zu. Während die Wärmeleitfähigkeit bei Chrom-Nickel-Edelstählen und Nickelbasislegierungen 8 bis 15 W/m·K beträgt, liegt der Wert für C-Stahl mit etwa 58 W/m·K im Vergleich vier bis sieben mal so hoch.

Die Wärme- und Temperaturverteilung in der Kontaktzone Werkstück-Werkzeug-Span ist in Abbildung 4 dargestellt; eindeutig zu erkennen ist die starke thermische Belastung der Schneide. Deshalb ist es gerade bei der Zerspanung von austenitischen Edelstählen und Nickelbasislegierungen wichtig, für eine ausreichende Wärmeableitung durch Kühlung zu sorgen.

Emulsionen oder emulgierbare Öle sind bei allen maschinellen Vorbearbeitungsschritten und bei der Endbearbeitung mit Hartmetallwerkzeugen anzuwenden. Wasserlösliche Kühlmittel werden aufgrund ihrer größeren Kühlwirkung bevorzugt bei der maschinellen Bearbeitung mit hohen Geschwindigkeiten, wie beim Drehen und Fräsen, eingesetzt. Dies können wässrige Ölemulsionen oder unter Markennamen vertriebene chemische Kühlmittel sein.

Zerspanung mit Werkzeugen aus Schnellarbeitsstahl lässt sich durch den Einsatz geschwefelter Mineralöle oder chlorierter Schneidöle verbessern. Bei langsameren Zerspanungsvorgängen wie zum Beispiel beim Bohren und Gewindeschneiden wird der Einsatz

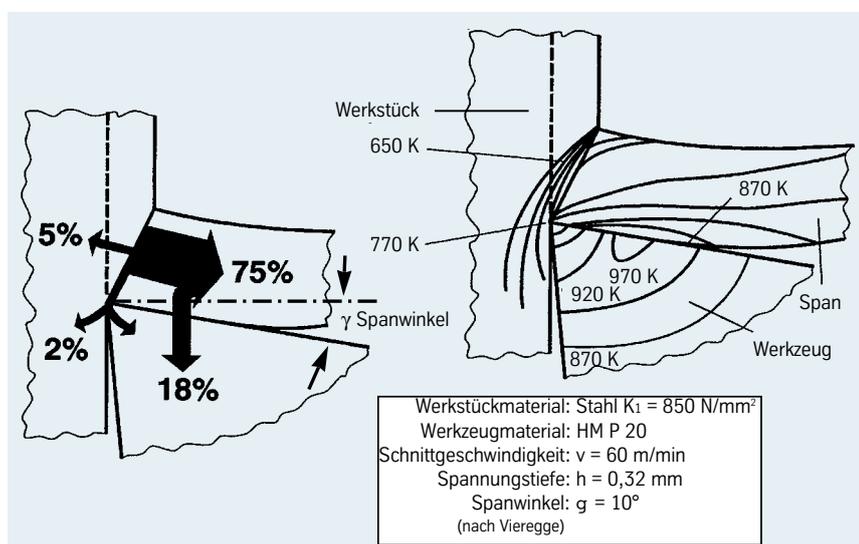


Abb. 4 – Wärme- und Temperaturverteilung im Werkstück, Span und Werkzeug während der zerspanenden Bearbeitung von Stahl, nach Kronenberg

schwerer und extra schwerer Schneidöle und stark angereicherter Emulsionen vorgeschlagen. In jedem Fall ist es empfehlenswert, die Ölhersteller zu Rate zu ziehen.

Sprühnebelkühlung ist für einfache Dreharbeiten an allen Edelstählen und Nickelbasislegierungen ausreichend.

Als Werkzeuge sollten vornehmlich Hartmetalle der ISO-Anwendungsgruppen P 10 bis P 50 und K 10 bis K 40 verwendet werden.

Tabelle 7 zeigt Zerspanungsrichtwerte für unbeschichtete Hartmetall-Wendeschneidplatten unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Standzeiten; diese Angaben sind bislang nicht nach ISO genormt.

Durch Versuche in neutraler Atmosphäre konnte nachgewiesen werden, dass Oxidation an Hartmetallschneiden den Verschleiß fördert.

Eine Beschichtung wirkt der Neigung zum Aufschweißen entgegen. Die Schnittgeschwindigkeit bei beschichteten Schneidplatten kann um bis zu 20 Prozent erhöht werden.

Fräsen

Wegen der großen Schnittkräfte, die beim Fräsen insbesondere von Nickel-Chrom-Edelstählen auftreten, sind Fräsarbeiten auf sehr schweren Maschinen auszuführen, die möglichst starr sein sollten, um Rattermarken zu vermeiden. Zur Erzielung besserer Oberflächen und längerer Werkzeugstandzeiten wird das Gegenlaufräsen, bei dem Vorschub und Schnittrichtung einander entgegengesetzt sind, dem Gleichlaufräsen vorgezogen.

Für Stirn- und Walzenfräser werden nachschleifbare HSS-E-Stähle verwendet. Ebenfalls eingesetzt werden Messerköpfe mit Wendeschneidplatten der ISO-Gruppe P 10 - P 30, beispielsweise SPUN 120308 P 30. Richtwerte für Schnittdaten beim Fräsen zeigt Tabelle 8.

Werkstoffgruppen	Schnittdaten							
	Spanquerschnitt: starr und/oder kontinuierlich				Spanquerschnitt nicht starr und/oder nicht kontinuierlich			
	Schnitttiefe a_a mm	Vorschub f mm/U.	Schnittgeschwindigkeit v_c m/min	ISO-Anwendungsgruppe	Schnitttiefe a_a mm	Vorschub f mm/U.	Schnittgeschwindigkeit v_c m/min	ISO-Anwendungsgruppe
Edelstähle Sonderedelstähle	1 - 10	0,1 - 1,5	100 - 60	P10 - P30	1 - 6	0,1 - 1,0	80 - 40	P20 - P50
Ni-Cu-Legierungen, weichgeglüht Nickel	1 - 10	0,1 - 1,5	80 - 40	P20 - P30 K10 - K20	1 - 6	0,1 - 1,0	60 - 30	P20 - P50 K10 - K40
Ni-Cu-Legierungen, ausgehärtet Nickelbasislegierungen Ni-Cr-Mo-(Fe) mit Mo \leq 10 %	1 - 10	0,1 - 1,5	60 - 20	K10 - K20	1 - 6	0,1 - 1,0	50 - 20	K20 - K40
Nickelbasislegierungen Ni-Cr-Mo-(Fe) mit Mo > 10 % und/oder Ti > 2 % Nb > 5 % Co > 10 %	1 - 10	0,1 - 1,5	30 - 10	K10 - K20	1 - 6	0,1 - 1,0	20 - 8	K20 - K40

Tabelle 7 – Richtwerte für das Drehen mit unbeschichteten Hartmetall-Wendeschneidplatten

Bohren

Das Bohren ist eine der schwierigsten Zerspansarbeiten, insbesondere bei austenitischen Edelstählen und Nickelbasislegierungen. Ursachen hierfür sind zum einen die Werkstoffeigenschaften, die unter **Drehen** aufgezeigt wurden, und zum anderen die komplizierten Mechanismen beim Bohren, die sich aus dem Metallausstoß durch die Meiselschneide in der Mitte der Bohrer und dem Schneiden durch Abscheren an den Schnittkanten der Bohrer ergeben. Wegen der hohen Festigkeitseigenschaften und der Neigung zur Kaltverfestigung von Nickelbasislegierungen kann das Bohren zu Schwierigkeiten führen, wenn vorgegebene Bohrvorschriften nicht exakt eingehalten werden.

Es sollten möglichst kurze Bohrer, beispielsweise nach DIN 1897, mit großer Kerndicke aus molybdän- und chromlegiertem Schnellstahl (HSS) eingesetzt werden. Durch die hohe Elastizität ist dieser Werkstoff Hartmetallen überlegen. Außerdem

ist eine Oberflächenbehandlung der Bohrer durch Nitrieren oder Beschichten mit TiN empfehlenswert.

Um günstige Schnittverhältnisse an der Bohrer Spitze zu erhalten, wird ein Spitzenwinkel von 120° bis 130° und ein Ausspitzen des Bohrers, zum Beispiel nach DIN 1414 Form A, empfohlen.

Zur Optimierung der Spanabführung ist ein Seitenwinkel (Drallwinkel) von 25° bis 30° (bei Reinnickel von 30° bis 35°) zu wählen.

Betrachtet man den Zerspanungsvorgang beim Bohren, so ist die Veränderung der Schnittgeschwindigkeit, die ständig vom Außendurchmesser des Bohrers zur Spitze hin auf $v = 0$ m/min abnimmt, zu erkennen. Schon dadurch kann es zu erheblicher Kaltverfestigung kommen.

Selbst beim Ankörnen kann es zur Kaltverfestigung kommen, was beim Anbohren zu Schwie-

Werkstoffgruppen	Schnittdaten			
	Schnitttiefe a_a mm	Vorschub f mm/min	Schnittgeschwindigkeit v_c m/min	ISO-Anwendungsgruppe
Edelstähle Sonderedelstähle	3 - 6	30 - 50	20 - 30	P10 - P30
Ni-Cu-Legierungen, weichgeglüht Nickel	3 - 6	30 - 50	25 - 15	P10 - P30
Ni-Cu-Legierungen, ausgehärtet Nickelbasislegierungen Ni-Cr-Mo-(Fe) mit Mo ≤ 10 %	3 - 6	30 - 50	18 - 10	P10 - P30
Nickelbasislegierungen Ni-Cr-Mo-(Fe) mit Mo > 10 % und/oder Ti > 2 % Nb > 5 % Co > 10 %	3 - 6	30 - 50	12 - 8	P10 - P30
Ni-Fe-Legierungen mit 36 % Ni	3 - 6	30 - 50	120 - 80	P20 - P30

Tabelle 8 – Richtwerte für das Fräsen mit HSS-E Stirn- und Walzenfräser

rigkeiten führen kann. Am besten arbeitet man mit einem Zentrierbohrer. Nur wenn dies nicht möglich ist, benutzt man vorteilhaft einen pyramidenförmigen Körner, der jedoch nur leicht angeschlagen werden sollte. Körner mit einer kegelförmigen Spitze sollten nicht verwendet werden, da sie eine stärkere Kaltverfestigung verursachen als pyramidenförmige Körner.

Beim Ansetzen des Bohrers ist unbedingt darauf zu achten, dass die Schneide sofort in den Schnitt kommt, ohne über die Schnittfläche zu schaben. Hierdurch kann eine Kaltverfestigung vermieden werden.

Handvorschub sollte möglichst nicht angewendet werden. Ist kein Maschinenvorschub möglich, ist beim Handvorschub gleichmäßiger Druck auszuüben, damit der Bohrer stetig schneidet. Schleift der Bohrer, so entsteht Kaltverfestigung, und es ist äußerst schwierig, ihn erneut zum Schneiden zu bringen.

Bei Bohrungen über 20 mm Durchmesser wird ein Vorbohren empfohlen.

Bei größeren Bohrtiefen ist es erforderlich, den Bohrer nach Erreichen einer Lochtiefe von etwa 4 x Bohrerdurchmesser und weiterhin jeweils, nachdem das Loch 0,7 x Bohrerdurchmesser tiefer wird, zu lüften und gegebenenfalls zu säubern.

Damit es zu keiner Überhitzung der Werkzeuge kommt, ist der Zuführung ausreichender Kühl- und Schmiermittel besondere Beachtung zu schenken. Als Kühlmittel werden Emulsionen 10:1 sowie schwere und extra schwere Schneidöle verwendet. Es empfiehlt sich der Einsatz spezieller für Chrom-Nickel-Stähle geeigneter Schneidöle.

Die für das Bohren empfohlene Schnittgeschwindigkeiten sind in Tabelle 9 aufgeführt. Für das Bohren tiefer Löcher müssen die Geschwindigkeiten unter Umständen vermindert werden. Beim Bohren von kaltverfestigtem Material muss

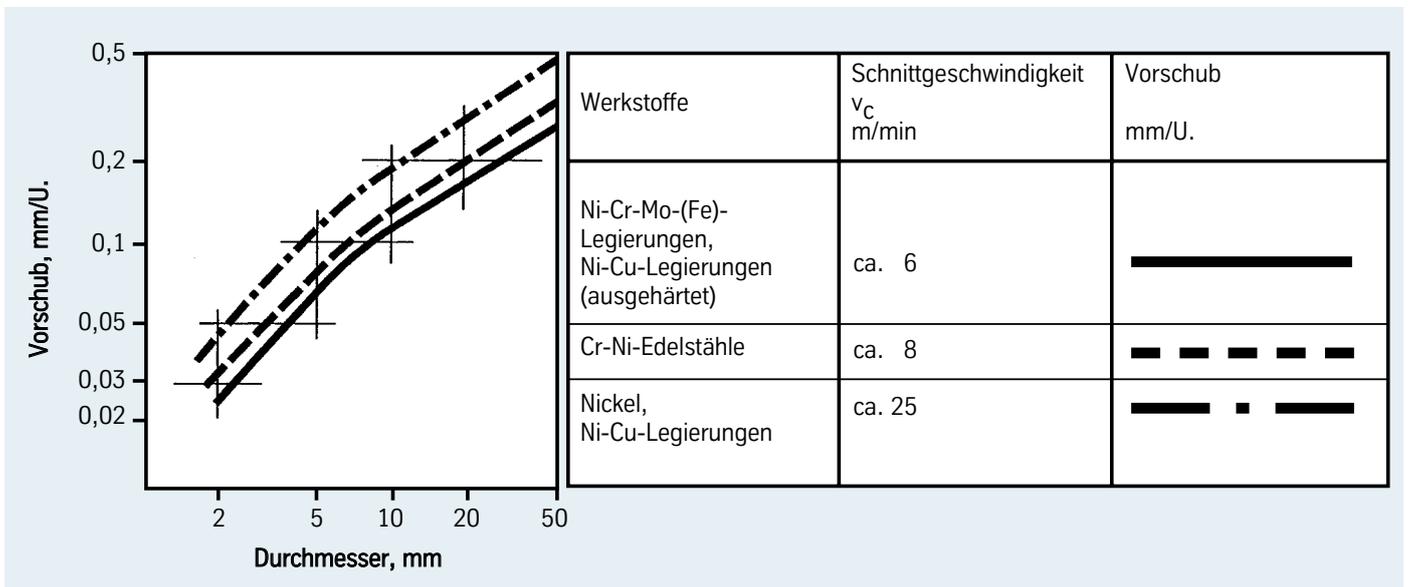


Abb. 5 – Richtwerte für Schnittgeschwindigkeit und Vorschub in Abhängigkeit vom Bohrerdurchmesser für das Bohren mit HSS-Werkzeugen

Werkstoffgruppe	Richtwerte für Schnittgeschwindigkeiten
Cr-Ni-Edelstähle	6 - 10 m/min
Ni-Cr-Mo-(Fe)-Legierungen	4 - 8 m/min
Ni-Cu-Legierungen (ausgehärtet)	4 - 8 m/min
Ni-Mo-Legierungen	3 - 7 m/min
Nickel und Ni-Cu-Legierungen	25 m/min

Tabelle 9 – Empfohlene Schnittgeschwindigkeiten für das Bohren

gegebenenfalls eine um 20 bis 25 Prozent geringere Schnittgeschwindigkeit eingestellt werden.

Richtwerte für Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe beim Bohren mit HSS Werkzeugen zeigt Abbildung 5.

Senken

Um einen guten Spanablauf sicherzustellen, werden zum Senken häufig dreischneidige Werkzeuge verwendet. Bei kleinen Abmessungen sind unter Umständen zweischneidige Werkzeuge vorteilhaft. Im übrigen gelten die unter Bohren aufgeführten Hinweise.

Gewindeschneiden

Zum Gewindeschneiden können Bohrer aus HSS-Stahl mit blanker, nitrierter oder TiN-beschichteter Oberfläche eingesetzt werden. Vorteilhaft sind stabile Bohrer mit ausgesetzten Zähnen. Kernlochbohrungen sind möglichst groß zu

wählen, beispielsweise größter Durchmesser nach DIN 13.

Für Gewindebohren und Gewindeschneiden sind Schnittgeschwindigkeiten in Anlehnung an die beim Bohren üblichen 3 bis 7,5 m/min zu verwenden, wobei die höheren Werte für Automatenqualitäten gelten. Beim Gewindeschneiden ist eine lange Einlaufschräge mit einer Tiefe von mindestens drei Gewindegängen nützlich, wobei üblicherweise ein Einlaufwinkel von 15° als Richtwert angesetzt wird.

Reichlicher Einsatz von Schmiermitteln wie chloriertem oder geschwefeltem, mit Petroleum verdünntem Mineralöl, ist vorteilhaft, da es die Spanabfuhr begünstigt. Schneidöle, die beim Bohren verwendet werden, sind vielfach ungeeignet, da sie zum Verdampfen neigen. In diesen Fällen sind Bohrpasten - zum Beispiel Bleiweiß-Talg-Pasten - zu verwenden.

Danksagung

Bei der Ermittlung der Schnittdaten waren VDM Metals folgende Firmen behilflich:

Drehen:

Widia GmbH
Münchener Straße 90
D-45145 Essen
Tel.: (02 01) 72 50
Fax: (02 01) 7 25 35 29

Bohren:

Günther & Co.
Eschborner Landstraße 112
D-60489 Frankfurt
Tel.: (069) 78 90 20
Fax: (069) 78 90 25 74
78 90 21 09

Rechtliche Hinweise

1. Allgemeines

Die VDM Metals GmbH bemüht sich, nach bestem Vermögen dafür Sorge zu tragen, dass die in dieser Broschüre enthaltenen Informationen und Daten zutreffend sind.

2. Haftungsausschluss:

Eine Haftung oder Garantie für die Aktualität, Richtigkeit und Vollständigkeit der zur Verfügung gestellten Informationen ist ausgeschlossen. Sämtliche Angaben über die Eigenschaften oder den Einsatz der in dieser Broschüre erwähnten Werkstoffe und Produkte dienen lediglich der Produktbeschreibung und Information. Garantien bezüglich bestimmter Eigenschaften von Produkten oder Werkstoffen und deren Eignung für spezifische Anwendungen bedürfen der schriftlichen Vereinbarung. Die VDM Metals GmbH behält sich das Recht vor, Änderungen oder Ergänzungen der in der Broschüre enthaltenen Inhalte vorzunehmen ohne Sie darüber in Kenntnis zu setzen.

3. Urheberrecht

Sämtliche in dieser Broschüre enthaltenen Abbildungen sind das ausschließliche Eigentum von VDM Metals GmbH und sind durch deutsches und internationales Urheberrecht geschützt. Sie dürfen ohne eine schriftliche Genehmigung von der VDM Metals GmbH weder reproduziert noch

liche Genehmigung von der VDM Metals GmbH weder reproduziert noch vervielfältigt, übertragen oder verändert werden. Die Verwendung einer Abbildung im Rahmen eines anderen Fotokonzepts oder für sonstige Illustrationszwecke (digitale, künstlerische oder sonstige Wiedergabe) stellt eine Verletzung deutschen und internationalen Urheberrechts dar.

Für Inhalte, die nicht Eigentum von VDM Metals GmbH sind, gelten die urheberrechtlichen Bedingungen der jeweiligen Rechtsinhaber.

4. Marken- und Kennzeichenrecht

Alle innerhalb der Broschüre genannten und ggf. durch Dritte geschützten Marken- und Warenzeichen unterliegen uneingeschränkt den Bestimmungen des jeweils gültigen Kennzeichenrechts und den Besitzrechten der jeweiligen eingetragenen Eigentümer. Allein aufgrund der bloßen Nennung ist nicht der Schluss zu ziehen, dass Kennzeichen nicht durch Rechte Dritter geschützt sind. Die in dieser Broschüre insbesondere zu den Produkten oder den Legierungen enthaltenen Angaben dienen lediglich der Information und sind nicht für Konstruktionszwecke oder sonstige technische Zwecke gedacht. Die bereitgestellten Informationen sind mit großer Sorgfalt erstellt worden. Für Fehler oder Auslassungen kann jedoch keine Haftung übernommen werden.

VDM Metals GmbH

Plettenberger Str. 2 • 58791 Werdohl

Phone: +49 (0) 2392-55-0 • Fax: +49 (0) 2392-55-2217

www.vdm-metals.com