

Das Merkblatt ist in Zusammenarbeit mit Herstellern von Nickelwerkstoffen, Nickel-Schweißzusätzen, Schweißbetrieben und Abnahmeorganisationen entstanden. Es enthält Empfehlungen über das sachgerechte Schweißen von Nickelwerkstoffen und Verarbeitungshinweise, die den metallurgischen Besonderheiten von Nickelwerkstoffen Rechnung tragen.

Sofern abnahmepflichtige Bauteile bzw. überwachungsbedürftige Anlagen zu schweißen sind, wird auf die in Abschnitt 9 genannten Technischen Regeln verwiesen.

#### Inhalt:

- 1 Vorwort
- 2 Grundwerkstoffe
- 2.1 Definition
- 2.2 Normung und Technische Regeln
- 2.3 Wichtige Legierungsgruppen
- 2.3.1 Reinnickel
- 2.3.2 Nickellegierungen
- 3 Schweißbeugung
- 3.1 Allgemeines
- 3.2 Porenbildung
- 3.3 Schwefelempfindlichkeit
- 4 Allgemeine Hinweise zum Schweißen
- 4.1 Allgemeine Hinweise zur Nahtvorbereitung
- 5 Schweißprozesse und -zusätze
- 5.1 Lichtbogenhandschweißen
- 5.2 Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)
- 5.3 Metall-Inertgas-(MIG-) und Metall-Aktivgas-(MAG-)Schweißen
- 5.4 Plasmaschweißen
- 5.5 Unterpulverschweißen
- 5.6 Widerstandsschweißen und andere Verfahren
- 6 Wärmebehandlung
- 7 Korrosionsverhalten
- 8 Verbinden von Nickellegierungen mit Stählen, artverschiedene Verbindungen
- 9 Hinweise zum Arbeitsschutz
- 10 Technische Regeln und Schrifttum

#### 1 Vorwort

Nickel und die meisten Nickellegierungen verhalten sich schweißtechnisch ähnlich wie die nichtrostenden austenitischen Stähle. Die nichtaushärtbaren Mischmetall-Legierungen lassen sich unter Berücksichtigung von Vorsichtsmaßnahmen, die nachfolgend noch beschrieben werden, mit allen elektrischen Schmelzschweißprozessen sowie allen Widerstandsschweißprozessen fügen. Vorzugsweise werden die Lichtbogenhandschweißung mit umhüllter Stabelektrode, die Lichtschutzgasschweißprozesse WIG und MIG, Plasma- und Laser- sowie Elektronenstrahlverfahren angewendet.

#### 2 Grundwerkstoffe

##### 2.1 Definition

Nickellegierungen sind Werkstoffe, bei denen Nickel den größten Einzelgehalt hat.

Eine Auswahl schweißgeeigneter Legierungen enthält Tabelle 1.

Diese Veröffentlichung wurde von einer Gruppe erfahrener Fachleute in ehrenamtlicher Gemeinschaftsarbeit erstellt und wird als eine wichtige Erkenntnisquelle zur Beachtung empfohlen. Der Anwender muß jeweils prüfen, wie weit der Inhalt auf seinen speziellen Fall anwendbar und ob die ihm vorliegende Fassung noch gültig ist. Eine Haftung des DVS und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

##### 2.2 Normung und Technische Regeln

Nickellegierungen sind weltweit gefertigt. In Deutschland existieren für die chemische Zusammensetzung der Grundwerkstoffe die Normen DIN 17740 bis DIN 17745, für die Festigkeitseigenschaften DIN 17750 bis 17754. Die Schweißzusätze sind in DIN 1736-1 und -2, genannt. Diese werden in Zukunft durch europäische Normen abgelöst werden. Für den Einsatz von Nickel und Nickellegierungen im Druckbehälterbau sind die entsprechenden VdTUV-Werkstoffblätter heranzuziehen (siehe auch Abschnitt 9).

##### 2.3 Wichtige Legierungsgruppen

###### 2.3.1 Reinnickel

Reines Nickel ist ein silbern glänzendes Metall mit der Ordnungszahl 28 und dem Atomgewicht 58,71. Es hat eine Dichte von  $8,9 \text{ g/cm}^3$ .

Hauptsächliche Reinnickelsorten haben einen Reinheitsgrad von 99,8 bis 99,8% (DIN 17740). Für geschweißte Bauteile werden LC-Versionen verwendet, bei denen der C-Gehalt auf max. 0,02% begrenzt wird. Diese Gehalte bleiben in Lösung; höhere Gehalte werden in der Wärme als Graphit ausgeschieden und beeinträchtigen die Duktilität. Reinnickel ist bei Raumtemperatur ferromagnetisch und nur bei Temperaturen oberhalb  $360^\circ\text{C}$  paramagnetisch; dabei erfolgt keine Phasenumwandlung im festen Zustand. Es weist im weichen Zustand eine 0,2%-Dehngrenze von rund  $100 \text{ N/mm}^2$ , eine Zugfestigkeit von  $400 \text{ N/mm}^2$ , eine hohe Duktilität sowie eine hohe Kerbschlagarbeit auch bei sehr tiefen Temperaturen (DIN 17750 bis 17754) auf. Es ist gut warm- und kaltumformbar und gut schweißgeeignet. Nickel hat eine hohe Korrosionsbeständigkeit gegen zahlreiche Salze und alkalische Medien.

###### 2.3.2 Nickellegierungen

Nickel ergibt mit einer Reihe anderer Metalle (z. B. Co, Cu, Cr, Fe, Mo) Mischkristall-Legierungen über einen weiten Konzentrationsbereich, die wegen ihrer Korrosions- und Zunderbeständigkeit sowie ihrer spezifischen physikalischen Eigenschaften genutzt werden.

Intermetallische Phasen bildet Nickel mit den Elementen Ti, Al, Nb und einigen anderen Metallen.

Nickel und Kupfer bilden in jedem beliebigen Mischungsverhältnis Mischkristalle. Gegenüber dem reinen Nickel-Metall haben die NiCu-Legierungen den Vorteil höherer mechanischer Festigkeit, auch bei erhöhten Temperaturen.

Nickel ergibt auch mit Eisen Mischkristall-Legierungen über einen weiten Konzentrationsbereich. Fe-Ni-Legierungen werden vor allem als physikalische Werkstoffe eingesetzt. Für die Schweißtechnik hat die Eisen-Legierung mit 36% Ni (Invar) als kaltzäher Werkstoff für Membrantanks von Flüssiggastankern und -rohrleitungen Bedeutung erlangt.

Mit Chrom bildet Nickel Legierungen über einen weiten Bereich. Nickel-Chrom-Legierungen haben hohe Korrosions- und Zunderbeständigkeit. Die Nickel-Chrom-Eisen-Legierungen schließen sich legierungstechnisch an die austenitischen Chrom-Nickel-Stähle an (siehe auch DIN 17742).

Die Legierung NiCr29Fe mit 29% Cr gewinnt zunehmende Bedeutung; sie ist aufgrund ihres hohen Chromgehaltes korrosionsbeständiger als NiCr15Fe. Beide Werkstoffe sind gegen zahlreiche reduzierende und oxidierende Medien beständig und weitgehend unempfindlich gegen Spannungsrisskorrosion.

Zur weiteren Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit wird Molybdän zulegiert (DIN 17744). Die NiCrMo-Legierungen, z. B. NiMo16Cr16Ti (W.-Nr. 2.4610), sind gut beständig gegen aggressive oxidierende Medien, z. B. Gemische aus Schwefel- und Salpetersäure.

Die chromfreie Legierung NiMo28 (W.-Nr. 2.4617) weist höchste Beständigkeit gegen reduzierende Medien auf (z. B. siedende Salzsäure). Eine Übersicht neuerer Nickellegierungen, vorwiegend mit Chrom und Molybdän legiert, enthält Tabelle 2.

Aushärtbare Nickellegierungen, die durch Gehalte an Al, Ti, Nb gekennzeichnet sind, bilden mit Nickel intermetallische Verbindungen  $Ni_3Ti$ ,  $Ni_3Al$ ,  $Ni_3Nb$  ( $\gamma'$ -Phase). Nach Warmauslagern sind sie hochwarmfest und werden z. B. für Teile von Gasturbinen verwendet. Diese Legierungen sind nur bedingt zum Schmelzschweißen geeignet. Dabei werden üblicherweise Schutzgas-Schweißverfahren und Strahlschweißverfahren angewendet.

Zu dieser Gruppe zählen die warmfesten NiCr- und NiCrCo-Legierungen (z. B. NiCr20Ti (W.-Nr. 2.4951), NiCr20TiAl (W.-Nr. 2.4952), NiCr20Co18Ti (W.-Nr. 2.4969)), die nur im weichen oder lösungsgeglühten Zustand geschweißt werden. Beim Schweißen im ausgehärteten Zustand können Spannungsrisse entstehen. Hohe Schweißspannungen sind zu vermeiden. Ein Zwischenglühen kann schon nach 1 bis 3 Lagen notwendig werden.

Die höher mit Al und Ti legierten Werkstoffe sind nicht zum Schmelzschweißen geeignet. Zum Fügen sind die Empfehlungen der Werkstoff-Hersteller zu beachten.

### 3 Schweißignung von Nickellegierungen

#### 3.1 Allgemeines

Nickel und nichtaushärtbare Nickellegierungen lassen sich mit allen Lichtbogenschweißverfahren unter Verwendung der gleichen Anlagen schweißen, die auch für nichtrostende austenitische Stähle eingesetzt werden. Die Legierungen sind gut schweißgeeignet, es müssen aber folgende Besonderheiten berücksichtigt werden.

#### 3.2 Porenbildung

Nickel und Nickellegierungen neigen zur Bildung von Stickstoffporen. Es sind deshalb Schweißzusätze zu verwenden, die gasabbindende Legierungselemente enthalten (z. B. Al, Nb, Ti), um den Stickstoff zu festen Niiden zu binden (vgl. DIN 1736). Es ist darauf zu achten, daß die Aufnahme von Stickstoff minimiert wird (z. B. kurzer Lichtbogen).

#### 3.3 Schwefelempfindlichkeit

Schwefel erniedrigt unter Bildung von Nickelsulfid den Schmelzpunkt des Nickels stark. Bei 21,5% S liegt im Zweistoff-Diagramm ein Nickel-Nickelsulfid-Eutektikum mit einem Schmelzpunkt 643°C vor. Die Löslichkeitsgrenze für Schwefel in Nickel beträgt 0,005%; höhere Gehalte werden als  $Ni_3S_2$  ausgeschieden, und zwar bereits ab etwa 400°C.

$Ni-Ni_3S_2$  wird an Korngrenzen ausgeschieden und kann unter Zugspannung Heißrisse und Kaltsprödigkeit verursachen. Größte Sauberkeit beim Schweißen und sorgfältiges Entfernen von schwefelhaltigen Stoffen (Fett, Farben u. dgl.) im Bereich der Naht vor dem Schweißen sind dringend notwendig, ebenso

schwefelfreie Ofenatmosphäre beim Glühen.

Niedrig schmelzende Metalle (z. B. Blei, Arsen, Zinn) können ähnlich negative Auswirkungen zeigen.

### 4 Allgemeine Hinweise zum Schweißen

Bei allen Schweißprozessen ist auf Sauberkeit der Anlagen und der Werkstücke besonderer Wert zu legen. Der Nahtbereich muß allseitig sauber und metallisch blank sein. Oxidfilme, die durch längeres Lagern der vorgefertigten Teile vor dem Schweißen entstehen können, sind durch Beizen (nach der Entfettung) zu beseitigen, anschließend ist gründlich in Wasser zu spülen (siehe Abschnitt 9).

Bei Mehrlagenschweißungen sind Schmelzen und Oxidfilme der einzelnen Raupen sorgfältig zu entfernen. Dies ist häufig nur durch Schleifen möglich. Auch die Unterlagen müssen sauber sein. Zum Bürsten sind Werkzeuge mit nichtrostenden Borsten oder halogen-, schwefel- und eisenfreie Schleifscheiben (harzgebunden) zu verwenden. Lösungsmittel zum Entfetten und Säubern der Naht müssen zugelassen sein (Gesundheitsrichtlinien beachten).

Sandstrahlen mit eisenfreien Strahlmitteln ist möglich. Allgemein sind Werkzeuge und Arbeitsmittel aus nichtrostenden Stählen zu verwenden.

#### 4.1 Allgemeine Hinweise zur Nahtvorbereitung

Das Schweißbad der Nickelschweißzusätze ist zähflüssiger als das von Stählen. Deshalb sind größere Öffnungswinkel und ein breiter Wurzelspalt zum sicheren Durchschweißen der Wurzel vorzusehen. Dünne Bleche bis etwa 1,5 mm Dicke werden durch Bögenäh- oder durch Stumpfschweißen ohne Zusatz gefügt. Bleche bis etwa 3 mm werden mit Schweißzusatz durch eine I-Naht oder eine V-Naht mit 70° bis 90° Öffnungswinkel verbunden. Dickere Bleche bis etwa 10 mm werden durch V-Naht mit 70° bis 90° Öffnungswinkel gefügt. Bei U-Nähten (bis etwa 20 mm Blechdicke) oder Doppel-U-Nähten für größere Blechdicken über 20 mm werden Flankenwinkel von etwa 15° vorgesehen. Dies gilt sinngemäß auch für andere Schweißnahtformen.

### 5 Schweißprozesse und -zusätze

Umhüllte Stabelektroden, Drahtelektroden, Schweißstäbe und Schweißdrähte sind in DIN 1736-1 und -2 genormt. Weitere Normen (USA) sind AWS A 5.11 und AWS A 5.14. Europäische Normen (EN) sind in Vorbereitung (Tabelle 3).

#### 5.1 Lichtbogenhandschweißen

Die basisch umhüllten Stabelektroden werden am Pluspol verschweißt. Alle Schweißpositionen, außer fallend, sind möglich, waagerechte Position ist anzustreben. Kontrolliertes Wärmeinbringen und Strichraupentechnik sind zweckmäßig. Es wird ähnlich wie bei den nichtrostenden austenitischen Stählen mit kurzem Lichtbogen geschweißt. Zündporen sind mittels beigelegtem Blech oder durch Zünden auf der Nahtflanke mit anschließendem Überschweißen vermeidbar. Endkrater sind sorgfältig zu füllen, um Endkraterisse zu vermeiden; gegebenenfalls sind sie vor dem Schweißen der nächsten Raupe auszusleifen.

#### 5.2 Wolfram-Inertgas-Schweißen (WIG)

Das WIG-Verfahren wird bevorzugt bei dünnen Querschnitten (bis etwa 3 mm Dicke) und zum Einbringen der Wurzellage (ohne Gegenschweißen) angewendet. Das WIG-Schweißgut bietet außerdem die höchstmögliche Korrosionsbeständigkeit. Die Schweißzusätze sind in DIN 1736 genormt. Sie enthalten gasabbindende Zusätze (Ti, Al, Nb) bei sonst artgleicher Zusammensetzung wie die zugehörigen Grundwerkstoffe.

Es wird mit Gleichstrom, die Wolframelektrode am Minuspol, geschweißt.

Als Schutzgas wird Argon nach DIN EN 439 verwendet; daneben können je nach Werkstoff Mischgase mit Argon-Helium oder