

Auswahl der Nickelwerkstoffe im Hinblick auf die Korrosionsbeanspruchung

Nickel ist ein wesentliches Legierungsmetall, das in etwa 2000 technischen Legierungen enthalten ist.

Das Metall Nickel wurde von Cronstedt im Jahr 1751 rein dargestellt. In der Natur kommt Nickel als Sulfid und als Oxid (meist in Kombination mit Eisen) sowie in Verbindung mit Arsen, Antimon und Silizium vor. Die wichtigsten Erzvorkommen liegen in Kanada, Russland GUS, Neukaledonien und Australien.

Die Stahlindustrie benötigt über 65 % des Primärnickels für die Erzeugung von Edelstählen, etwa 13% werden für die Herstellung von NE-Metallen verbraucht. Andere Anwendungen wie die Erzeugung von nickelhaltigen Baustählen, Stahlguss, Luftfahrt oder galvanische Industrie verbrauchen in Summe ca. 20% Primärnickel.

Auf der Anwenderseite ist die Luftfahrt (Alloy 718), der Anlagenbau für die chemische Prozessindustrie, Öl & Gas und die Elektrotechnik/Elektronikindustrie mit ca. 295.000 to in 2014 weltweit die grössten Verbraucher für Lang- und Flachprodukte mit > 30% Nickel.

*Bernd Hoberg, voestalpine Böhler Welding Group,
Düsseldorf*

Nickellegierungen und hochlegierte Sonderedelstähle kommen wegen ihren hervorragenden Eigenschaften unter Einsatzbedingungen die Nass- oder Hochtemperaturkorrosion verursachen können, in folgenden Anwendungsbereichen bevorzugt zum Einsatz:

- Chemische Prozessindustrie
- Öl- und Gasgewinnung
- Offshore- und Meerestechnik
- Energieerzeugung
- Umweltschutz
- Industrie-Ofenbau

Bei den aufgeführten Anwendungsbeispielen ist im Rahmen der Werkstoffverarbeitung der Fügetechnik besondere Aufmerksamkeit erforderlich. Die Anforderungen an die Werkstoffe steigen und diese Anforderungen müssen auch durch die Qualität der Schweissverbindungen erfüllt werden. Die Güte einer Schweissverbindung beeinflusst die Sicherheit und Lebensdauer von Apparaten und Anlagen massgeblich. Die Problematik, hochwertige Schweissnähte zu fertigen besteht i. d. R. darin, dass es sich bei dem niedergeschmolzenen Schweissgut um ein dendritisches Gussgefüge handelt, welches entsprechend den metallurgischen Eigenschaften der beteiligten komplexen Mehrstoff-Zustandsdiagramme unterliegt.

Seigerungen bzw. Ausscheidungen von wesentlichen Legierungs- und Begleitelementen wie z. B. Molybdän, Stickstoff, Kupfer oder Kohlenstoff beeinflussen letztlich das Korrosionsverhalten einer solchen Schweissverbindung.

Aufgrund der Gusstruktur von Schweissnähten ist zudem mit unterschiedlichen mechanisch-technologischen Eigenschaften, im Vergleich zu Knetlegierungen mit nominell gleicher Zusammensetzung zu rechnen.

Weiterhin erfordern insbesondere vollaustenitische Schweissgüter Massnahmen zur Minimierung der mehr oder weniger

stark ausgeprägten Neigung zur Bildung von Heissrissen. Es soll dem Verarbeiter unter Berücksichtigung der gängigen Schweissprozesse aufgezeigt werden, sowohl manuell als auch vollmechanisiert zu hochwertigen und belastbaren Schweissverbindungen und Auftragsschweissgütern zu gelangen.

Werkstoffauswahl

Die Tabelle 1 zeigt eine Auswahl an Sonderedelstählen und Nickellegierungen, aus den o. a. Anwendungsbereichen.

Für den Anlagen- und Apparatebau sind gute Verarbeitungseigenschaften eines Werkstoffes wesentlich, wobei die Fügetechnik einen besonderen Raum einnimmt.

Alloy Bezeichnung	DIN Werkstoff-Nr.	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe	C	andere
926	1.4529	25	21	6,5	0,9	45	≤0,02	0,20N
28	1.4563	31	27	3,5	1,3	31	≤0,02	0,05N
31	1.4562	31	27	6,5	1,3	31	≤0,02	0,20N
825	2.4858	40	23	3,2	2,2	31	≤0,02	0,8Ti
625	2.4856	62	22	9	-	3	≤0,02	3,4Nb
C-276	2.4819	57	16	16	-	6	≤0,01	3,5W
59	2.4605	59	23	16	-	1	≤0,01	0,3Al
B-2	2.4617	69	0,7	28	≤0,5	1,7	≤0,01	≤1,0Co
600	2.4816	74	16			9	0,08	

Tabelle 1: Grundwerkstoffe für den Anlagen- und Apparatebau

Schweisszusätze

Die hier aufgeführten Schweisszusätze stellen eine Auswahl von hochlegierten Schweisszusätzen für den chemischen und petrochemischen Anlagen-, Apparate- und Industrieofenbau dar. Die für den Anlagenbau qualifizierten Schweisszusätze decken die in Tabelle 1 gezeigte Grundwerkstoffpalette ab.

vaBWG Bezeichnung	DIN EN ISO 18274	C	Ni	Cr	Mn	Mo	Cu	Fe	andere
UTP A 80 Ni	Ni 2061	0,02	96		0,3			< 0,1	3,3 Ti
UTP A 80 M	Ni 4060	0,02	65		3		30	1,5	2,5 Ti
UTP A 4221	Ni 8065	0,01	41	20,5	0,8	3,1	1,8	32	
Thermanit Nimo C 24	Ni 6059	0,01	59	23	0,5	16		1	0,2 Al
Thermanit 625	Ni 6625	0,03	60	20	0,1	9		1	3,5 Nb
Thermanit Nimo C 276	Ni 6276	0,01	58	16	0,5	16		6	3,5 W, 0,2 V
Thermanit 690	Ni 6052	0,02	60	29	0,3	0,1		9	0,2 Si
UTP A 703	Ni 1066	0,01	69	1	1	28		2	
Thermanit Nicro 82	Ni 6082	0,02	70	20	3			1	2,7 Nb
Thermanit 617	Ni 6617	0,05	55	22	0,1	9		3	1,2Al, 11 Co
Thermanit 686	Ni 6686	0,01	57	22,8	<0,5	16		< 1	3,8 W

Tabelle 2: Schweisszusätze für Nickellegierungen

Schweisszusätze für hochlegierte Stähle sind nach europäischen Regelwerken in der DIN EN ISO 14343, jene für die Nickellegierungen in der DIN EN ISO 18274 aufgeführt. Bei der Auswahl von Schweisszusätzen basierend auf der jeweiligen Norm ist zu beachten, das gem. DIN EN ISO 14343 die Angabe des Schweissprozesses Bestandteil der Einstufung ist. Für die Zusätze aus der DIN EN ISO 18274 gilt diese Codierung des Schweissatzes jedoch nicht. Hier wird lediglich anhand der Produktform Band (B) oder Draht

(S) unterschieden und dem Kurzzeichen Ni vorangestellt. Es folgt die Angabe der chemischen Zusammensetzung anhand der vierstelligen Codierung. Beim Schweißen von abnahmepflichtigen Bauteilen z. B. gem. europäischer Druckgeräte-Richtlinie 2014/68/EU dient das jeweilige VdTÜV-Kennblatt des Schweißzusatzes als Eignungsnachweis und legt im Geltungsbereich auch den Schweißprozess fest.

Die Beschaffung von Schweißzusätzen muss folglich, ergänzend zu der DIN EN ISO 18274, unter Angabe des gewünschten Schweißprozesses erfolgen. Das ist insbesondere bei gespulten Drahtprodukten mit diversen Drahtdurchmessern zu berücksichtigen, da diese Drähte sowohl für das MSG- als auch mechanisierte WSG-Schweißen verwendet werden können.

Um den jeweiligen schweisstechnischen Anforderungen gerecht zu werden, weisen MSG- und WSG-Drähte bei gleichem Drahtdurchmesser und gleicher Verpackungseinheit eine unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit auf.

Die Angabe des Schweißprozesses ist daher nicht nur wie o. a. aus formalen Gründen, sondern auch aus fertigungstechnischen Gründen zwingend erforderlich.

Verarbeitungshinweise

Bezüglich der grundsätzlichen Verfahrensweise beim Schweißen von hochlegierten Sonderedelstählen und Nickellegierungen ist auf die hohen Anforderungen an die Sauberkeit insbesondere der Nahtbereiche und angrenzenden Wärmeeinflusszonen hinzuweisen.

Da diese Werkstoffe empfindlich auf bestimmte Verunreinigungen, wie z. B. Schwefel reagieren, gibt es für die Güte einer Schweißnaht kaum eine grössere Gefahr als das Vorhandensein von Verunreinigungen auf der Oberfläche, die unter dem Einfluss des Wärmeeintrages in den Bereich der WEZ eindiffundieren oder in das Schweißgut eingelagert werden können.

Bei allen Schmelzschweißverfahren haben die Schweißparameter sowie die Umgebungsbedingungen Einfluss auf die Qualität der Schweißung. Der Schutz des Schmelzbades, ob durch Schutzgase oder Schlackebildung (E-Hand, UP- oder RES-Verfahren), spielt eine entscheidende Rolle. Es ist dafür Sorge zu tragen, dass atmosphärische Einflüsse, die zur Oxidation und Abbrand wichtiger Legierungsbestandteile führen, somit einen sehr negativen Einfluss auf das niedergeschmolzene Schweißgut bzw. die Schweißverbindung nehmen, weitestgehend vermieden werden.

Im Falle eines nicht ausreichenden Schutzes des Schmelzbades muss mit dem Abbrand wichtiger Legierungsbestandteile gerechnet werden. In diesem Zusammenhang ist es auch wichtig, auf das unterschiedliche physikalische Verhalten dieser Werkstoffgruppe im Vergleich zum CMn-Stahl einzugehen (geringere Wärmeleitfähigkeit, höhere Wärmeausdehnung). Diesem Verhalten ist bei der Schweißnahtvorbereitung u. a. durch grössere Wurzelspalte bzw. Stegabstände Rechnung zu tragen, während aufgrund des relativ zähflüssigen Verhaltens im schmelzflüssigen Zustand mit grösseren Öffnungswinkeln, im Vergleich zu unlegierten C-Stählen zu achten ist.

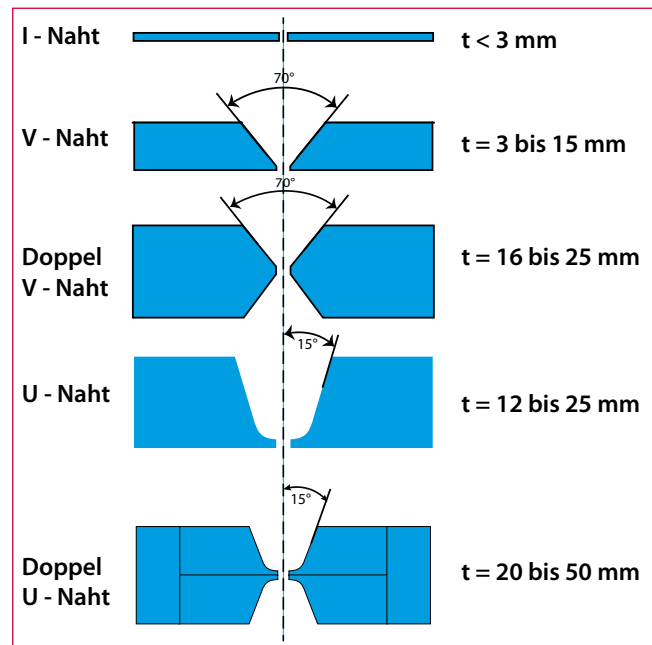


Abb. 1: Nahtvorbereitungen für das Schweißen von Nickellegierungen

Heissrissverhalten - Prüfung unter Fremdbeanspruchung

Für die Werkstoffbeurteilung ist ein leistungsfähiges, flexibles und wirtschaftliches Prüfkonzept erforderlich, das die Bewertung der Scheweisseignung hinsichtlich der Heissrissneigung umfasst.

Es muss die Möglichkeit bieten, Grundwerkstoffe, Schweißzusätze und Schweißverbindungen zu bewerten.

Die Auswahl und Abstimmung der Schweißzusätze und ihrer Hilfsstoffe wie Schutzgas oder Schweißpulver für die jeweiligen Grundwerkstoffe soll erleichtert werden.

Auch für die vergleichende Bewertung von Schweißverfahren soll das Prüfkonzept herangezogen werden können, darüber hinaus aber auch zur Optimierung der Schweißbedingungen geeignet sein.

Seit einigen Jahren sind neben der Eigenbeanspruchung z. B. bei der Ringsegment- oder Doppel-Kehlnahtprobe auch fremdbeanspruchte Prüfkonzepte zur Bewertung des Heissrissverhaltens im Einsatz. Es berücksichtigt die theoretischen Grundlagen der Heissrissbildung auf Basis des MVT-Tests (modifizierter Vareststraint-Test, BAM - Berlin) und des programmierten Verformungsriß Tests (PVR) des Institutes für Werkstoff- und Fügetechnik der Universität Magdeburg.

Die in Europa am weitesten ausgereiften und verbreiteten Heissrissprüfverfahren wie der MVT- und PVR- Test sind wegen der relativ einfachen Probenformen leicht und schnell anwendbar. Die Bandbreite der Untersuchungsmöglichkeiten ist gross.

MVT-Tests, die an einer Vielzahl von Blech- und Schweißzusatzwerkstoffen durchgeführt wurden zeigen, dass das Heissrissverhalten von Grundwerkstoffen, Schweißgütern und Schweißverbindungen mit diesem Test ausgezeichnet bestimmt und dargestellt werden kann. Diese Differenzierung im Heissrissverhalten ist ebenfalls mit dem PVR-Test sehr gut möglich. Anstelle der Gesamtrisslänge als Bewertungskriterium für die Heissrissempfindlichkeit nach dem MVT-Test (Abb. 2), wird bei dem PVR-Test eine kritische Verformungsgeschwindigkeit ermittelt (Abb. 3).

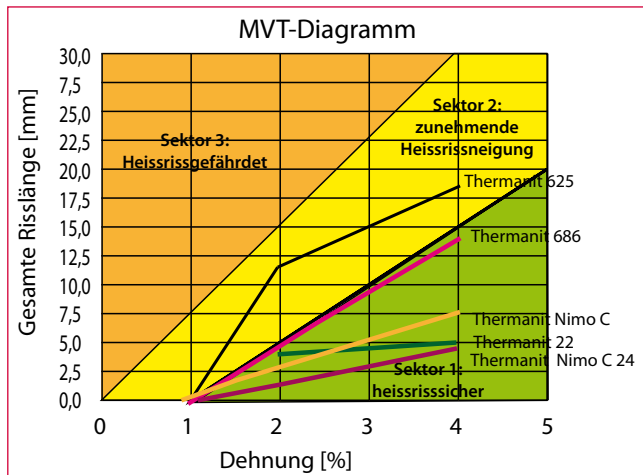
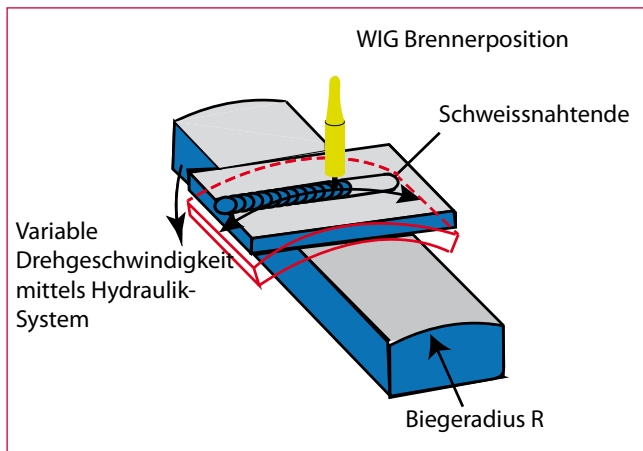


Abb. 2 a / b : MVT - Vorestraint Test und Auswertung im Überblick

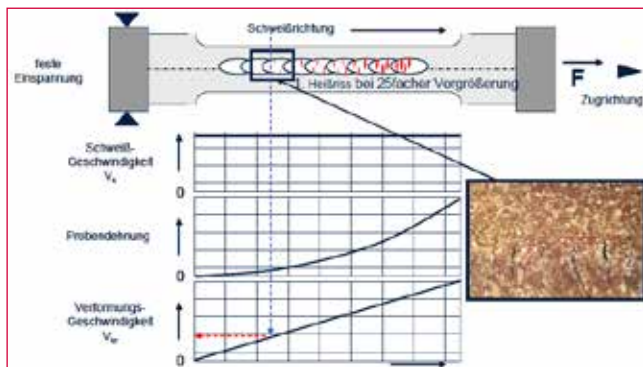


Abb. 3 : PVR- Test im Überblick

Schweisstechnologien

Grundsätzlich kommen die gängigen Schmelzschweißprozesse wie das E-Hand, Wolfram-Schutzgasschweissen (WSG), Metall-Schutzgasschweissen (MSG) und UP-Schweissen auch für die Verarbeitung von hochlegierten Sonderedelstählen und Nickellegierungen in Betracht. Im Unterschied zu den Standard CrNi-Stählen der AISI 300er Serie sind die voll-austenitischen Werkstoffe jedoch hinsichtlich der Wärmeführung beim Schweißen anspruchsvoller. Bei der Erstellung von Schweißanweisungen sind daher i. d. R. geringere Streckenenergien, Zwischenlagentemperaturen und ggf. kleinere Drahtdurchmesser zu berücksichtigen. Ziel dieses Beitrages ist es effizientes Schweißen auch bei hohen Qualitätsansprüchen zu gewährleisten.

WIG-Heissdraht-Prozess (WIG-HD)

Prozessbeschreibung und Anwendungsmöglichkeiten:

Das Wolfram-Inert-Gas-Schweissen mit Heissdraht (WIG-HD) ist eine leistungsstarke Prozessvariante zu dem herkömmlichen WIG-Schweissen mit Kaltdrahtzusatz. Es gewährleistet höchste Schweißgutqualität bei deutlich erhöhter Leistung gegenüber dem Kaltdrahtprozess. Während der WIG-Lichtbogen zum Aufschmelzen des Grundwerkstoffes dient, wird der Schweißzusatz kontinuierlich über ein Drahtvorschubsystem zum Lichtbogen bzw. in das Schmelzbad gefördert. Der Schweißzusatz im Durchmesserbereich von 0,8 - 1,6 mm ist über ein Stromkontaktröhre an eine eigene Stromquelle angeschlossen. Der Schweißzusatz taucht in das Schmelzbad ein und muss während des Schweißens diese Lage beibehalten, d. h. es besteht ständig ein Kurzschluss zwischen Schweißzusatz und Werkstück bzw. Schmelzbad. Abb. 4 zeigt die schematische Darstellung des WIG-Heissdraht-Prozesses. Wesentlich für die optimale Durchführung des WIG-HD-Schweißens ist die richtige Anstellung des Brenners. Der Anstellwinkel des Kontaktröhres muss in einem Bereich von 20 - 40° zur Werkstückoberfläche bzw. zur Horizontalen liegen. Wie üblich werden der Brenner am Minuspol und das Werkstück am Pluspol angeklemt. Zum Aufheizen des Drahtes dient eine separate Gleichstromquelle mit reduzierter Spannung. Die Parameterregulierung wird im Wesentlichen über die Einstellung der Stromstärke vorgenommen.

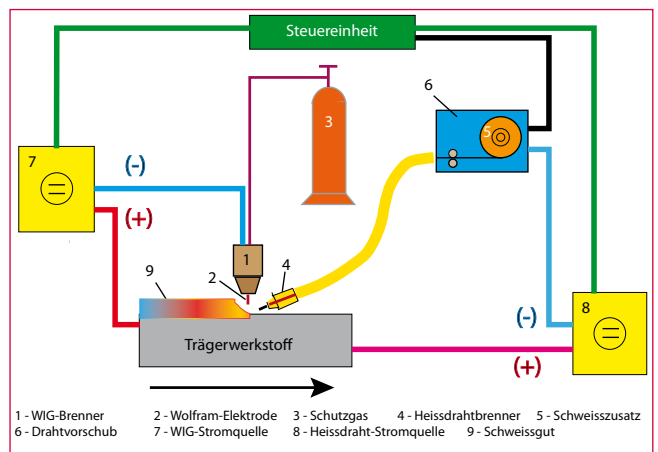


Abb. 4: schematische Darstellung des WIG-HD-Prozesses

Um eine Oxidation des aufgeheizten Drahtes zu vermeiden, kann das Kontaktröhre mit einer Schutzgasversorgung ausgerüstet werden. Sind im Normalfall beim WIG-Schweissen mit Kaltdrahtzusatz Schweißgeschwindigkeiten von ca. 20 cm/min zu erreichen, so können diese beim WIG-HD-Schweissen bei ca. 80 cm/min liegen. Der Schweißprozess ist, wie das manuelle WIG-Schweissen, in allen Positionen einsetzbar.

Verbindungsschweissen an walzplattierten Grundwerkstoffen

Für das Schweißen von walzplattierten Werkstoffen gelten sinngemäss die gleichen Regeln wie für das Verbindungsschweissen an massiven Werkstoffen. Plattierte Bleche sind beispielsweise wirtschaftlich interes-

sante Konstruktionswerkstoffe, wenn unterschiedliche Beanspruchungen, wie hohe mechanische Belastung und stark korrosive Bedingungen gleichzeitig beherrscht werden müssen. Als Träger- und Konstruktionswerkstoff wird meist ein den Erfordernissen angepasster, niedriglegierter Baustahl verwendet. Der Korrosionsschutz wird von einem vergleichsweise dünnen Aufschlagwerkstoff aus der Gruppe der Ni-Cr-(Mo) Legierungen, z. B. DIN Wst.-Nr. 2.4858 – Alloy 825, DIN Wst.-Nr. 2.4856 – Alloy 625, oder DIN Wst.-Nr. 2.4819 – Alloy C-276 übernommen.

Die Mindestauflagedicke sollte im Allgemeinen nicht unter 2,0 mm liegen, denn mit abnehmender Auflagedicke steigen die Anforderungen hinsichtlich der Einhaltung von Eisengehalten durch die Aufmischung des Grundwerkstoffes deutlich.

Bevor die Schweissarbeiten beginnen, muss Klarheit über den Einsatz des Schweissverfahrens bestehen. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass im Fall von extrem hohen Korrosionsbelastungen, wie etwa im Bereich des chemischen Apparatebaus oder Öl & Gas, der WIG-Schweissprozess – ob mit Kalt- oder Heissdrahtzusatz – die entsprechende Schweissnahtqualität liefert.

Aus wirtschaftlicher Sicht wird in diesem Beitrag, der WIG-HD-Prozess betrachtet. Die Schweissnahtvorbereitung sollte wenn möglich auf mechanischem Weg vorgenommen werden. Ist das nicht möglich, kann dies auch mit Hilfe des Plasmaschneidens erfolgen, wobei dann eine Bearbeitung der Nahtflanken (Schnittflächen) zwecks restloser Entfernung der unvermeidlichen Oxide zwingend erforderlich wird. Der Einsatz von Wasserstrahl-Schneidanlagen ist auch aufgrund der Vermeidung einer Wärmeeinflusszone, verursacht durch den thermischen Schneidprozess, zu bevorzugen.

Sofern zugänglich und bevorzugt in der Schweissposition PC oder PF wird die Wurzelschweißung mittels manuellem WIG-Schweissen "beidseitig-gleichzeitig" (Abb. 5) durchgeführt. Durch diese Vorgehensweise wird neben dem Erreichen einer fehlerfreien Wurzelschweißung auch das häufig erforderliche Schleifen – insbesondere im Wurzelbereich – völlig unterbunden.

Das auflageseitige Schweißen wird dann mit Hilfe des WIG-HD-Prozesses in mindestens dreilagiger Ausführung unabhängig von der Schweissposition durchgeführt.

Das Hauptproblem beim Schweißen plattierter Werkstoffe besteht generell darin, die Aufmischung mit dem Trägerwerkstoff (C-Stahl) zu minimieren.

Der zunächst ermittelte Fe-Gehalt in der Decklage, kann als Indikator für die Korrosionsbeständigkeit der Schweissverbindung angesehen werden.

Das durch eine Reihe von Untersuchungen hinsichtlich der Loch- und interkristallinen Korrosion ermittelte Limit im Fe-Gehalt liegt bei max.3 %. In Abb. 6 ist ein Schweissprotokoll dargestellt, dem neben den Schweissparametern auch Angaben über den Fe-Gehalt in der Decklage, einer als Fallnaht ausgeführten Schweissverbindung zu entnehmen sind.

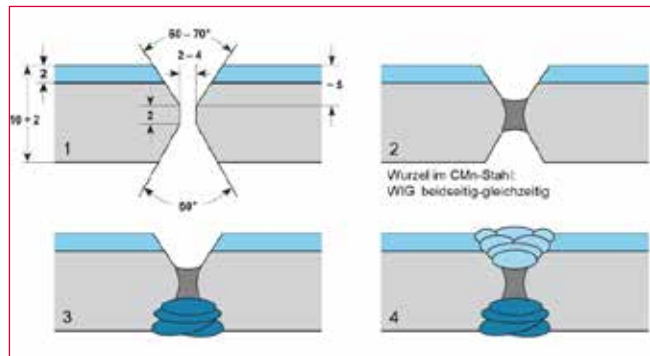


Abb. 5: typische Schweissnahtvorbereitung an walzplattiertem Blech

v-WIG gepulst	
Grundwerkstoff	Alloy 59 / 2.4605
Schweisszusatz	Thermanit Nimo C 24
	Blechdicke 2,0 mm
	Drahtdurchmesser 1,0 mm

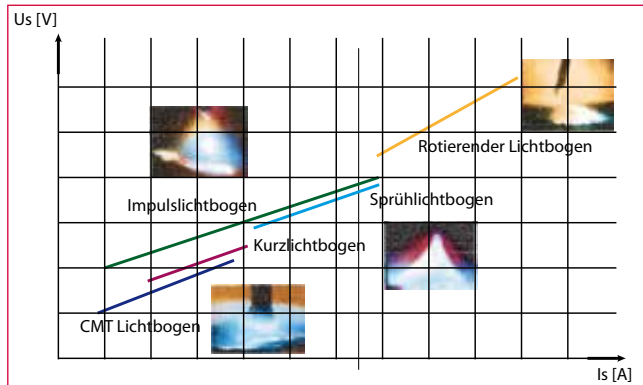
Analyse	Cr	Ni	Mn	C	Si	Mo	Fe	Cu
Grundwerkstoff	22,5	60,60	0,15	0,002	0,02	15,90	0,23	0,01
Schweissgut Nahtoberfläche	22,5	Rest	0,16	0,003	0,03	15,90	0,50	0,01

Schweißparameter	Wurzel	Füllagen	Decklage
Stromart / Polung	DC / -		
Stromstärke	120 - 250 A		
Spannung	12 V		
Schweißgeschwindigkeit	40 cm/min		
Zwischenlagentemperatur	50 °C	130°C	100°C
Streckenenergie	4,5 kJ/cm	7,0 kJ/cm	7,0 kJ/cm
Heissdrahtgeschwindigkeit	0,4 m/min		
Schweißposition	PG		
Schutzgas	Ar + 3% H ₂		

Abb. 6: WIG-HD Schweissprotokoll

Metall-Schutzgas-Schweißprozesse (MSG) Prozessbeschreibung und Anwendungsmöglichkeiten.

Das MSG-Schweissen ist in diversen Anwendungsbereichen der Nickellegierungen als Fügeprozess etabliert. Die fortschreitende Digitalisierung bei der Gerätetechnik hat in den letzten Jahren jedoch zu enormen Veränderungen beim MSG-Schweissen geführt. Unter dem Oberbegriff der sog. wärmereduzierten Schweißprozesse sind herstellereigenspezifische Bezeichnungen wie z. B. Cold Metal Transfer (CMT)®, Cold Arc® oder Cold Process® etc. entstanden. Das technologische Umfeld entspricht weiterhin dem des MSG-Schweißens. Die Erweiterung von Regelparametern zur Beeinflussung der Lichtbogenart und -stabilität bis hin zur Nutzung von Gleich- oder Wechselstrom (AC Schweißen) sowie die Nutzung eines diskontinuierlichen Drahtvorschubes (CMT) führt zu deutlich komplexeren MSG-Prozessen. Im Fall der CMT-Anlage wird die Lichtbogenlänge über den Drahtvorschub erfasst und geregelt. Der Drahtvorschub erfolgt mit bis zu 90 Hz diskontinuierlich. Aufgrund der im Vergleich



Ab. 7: Vergleich der Arbeitsbereiche von MSG-Schweißprozessen

zum konventionellen MSG-Schweißen stark modifizierten Tropfenablösung ergibt sich ein relativ kalter Werkstoffübergang. Damit ist der wärmereduzierte MSG-Prozess auch für geringere Werkstückdicken nutzbar, als es bisher mit dem MSG-Impulsschweißen möglich ist. Dabei können ausserdem hohe Schweissgeschwindigkeiten > 60 cm/min beim mechanisierten CMT-Schweißen erzielt werden.

Es ist daher naheliegend, einen Schweißprozess welcher durch einen äusserst niedrigen Energieeintrag charakterisiert ist, auch für die Verarbeitung von Nickellegierungen in Betracht zu ziehen.

Die Beeinflussung des Werkstoffüberganges im Lichtbogen wie oben aufgeführt in Kombination mit anderen Schweißprozessen z. B. mit dem LASER (LASER-Hybrid) verändern die Einsatzgrenzen des MSG-Schweißens weiterhin. Weitere Informationen zur Prozessregelung beim MSG-Schweißen können dem DVS Merkblatt Nr. 0973 und Beiblatt 1 entnommen werden.

Der für die schweisstechnische Verarbeitung von Nickellegierungen erforderliche Impulslichtbogen setzt i. d. R. frei programmierbare Stromquellen voraus und lässt sich, entsprechender Gerätekennlinien voraus-gesetzt, über einen weiten Leistungsbereich (Abb. 7) nutzen.

Die Entwicklung und Modifikation von Impuls-Kennlinien erfordert fundierte Kenntnisse über die jeweilige Stromquelle und setzt ausserdem schweissmetallurgische Kenntnisse über Nickellegierungen hinsichtlich des Erstarrungs- und Einbrandverhaltens je nach Abschmelzleistung und Schweisspositionen voraus.

Der MAG-Prozess ist eine Variante des MIG-Prozesses und unterscheidet sich im Wesentlichen dadurch, dass ein spezielles Schutzgas auf der Basis von Argon (Ar) und Helium (He) mit Zumischungen der aktiven Gaskomponenten Kohlendioxid (CO₂) oder Sauerstoff (O₂) zum Einsatz kommt.

Für das Schweißen von Nickelwerkstoffen und Sonderedelstählen ist neben der Impulstechnik der Einsatz von speziellen Schutzgasen vorteilhaft. Diese MSG-Prozessvariante bietet die Möglichkeit, einem vorgewähltem Grundstrom, höhere Stromimpulse mit einer ebenfalls wählbaren Frequenz zu kombinieren. Diese Einstellungen werden in der Regel für einen sog. Arbeitspunkt (Drahtvorschubgeschwindigkeit) vorgenommen.

Bei korrekter Anpassung der Impulskennlinie kann neben der hohen Prozessstabilität (spritzerarm, gutes Fließ- und Benetzungsverhalten) eine günstige werkstoffbezogene und auf

die Schweissposition abgestimmte Wärmeführung erreicht werden.

Für das Schweißen von Nickelwerkstoffen und Sonderedelstählen sollte die Zwischenlagentemperatur von üblicherweise 120 °C nicht überschritten werden. Die Brennerstellung ist hier ca. 10° stechend zu wählen. Das Schweissgut ist in Strichraupen einzubringen. Der Lichtbogen muss ganz vorne am Schmelzbad geführt werden. Schon geringes Vorlaufen des Schmelzbades hat Spritzerbildung zur Folge.

Die im Schweissprotokoll (Abb. 8) dargestellten beispielhaften Schweissparameter erlauben ein störungsfreies Arbeiten.

	t-MAG pulsed arc	
Grundwerkstoff	Alloy 59 / 2.4605	Blechedicke 16,0 mm
Schweisszusatz	Thermanit Nimo C 24	Drahtdurchmesser 1,0 mm

Analyse	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	Fe	C	Cu	V
Grundwerkstoff	22,50	60,65	0,15	0,02	15,90	1,0	0,002	0,01	0,15
Schweissgut Nahtoberfläche	22,65	60,80	0,15	0,03	15,60	0,29	0,005	0,01	0,14

Schweißparameter	Füllagen	Decklage	
Stromart / Polung	DC / +		
Stromstärke	165 A		
Spannung	30 V		
Schweissgeschwindigkeit	45 cm/min		
Zwischenlagentemperatur	120°C		
Streckenenergie	70 kJ/cm		
Drahtgeschwindigkeit	8,5 m/min		
Frequenz	130 Hz		
Schutzgas	DIN EN ISO 14175 - Z Cronigon Ni 10		

Mechanisch-Technologische Eigenschaften					
Zugversuch					
Prüftemperatur	R _{p0,2} [N/mm ²]	R _{p10} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	A ₅ [%]	Bruchlage
RT	378	442	732	56	GW
	372	435	724	56	GW
	381	444	726	56	GW
Biegegest					
Stumpfstoss: V-Naht 70°	Dorn Ø	180 ° Biegewinkel			
Decklage im Zug	3 x a	Kein Anriss			
Wurzel im Zug	3 x a	Kein Anriss			
Seitenbiegeprobe	3 x a	Kein Anriss			
Kerbschlagbiegeversuch					
Kerblage Schweissgut	Prüftemperatur	Kerbschlagarbeit [J]			
	- 196 °C	176, 170, 183, 162, 164, 190			
	RT	209, 180, 214			

Abb. 8: Schweissparameter und mech.-technologische Eigenschaften einer MAG-Schweißung einer t-MAGp an DIN Wst. Nr. 2.4605/Alloy 59

Schutzgase zum Schweißen von Nickelwerkstoffen für Nasskorrosionsanwendungen

Bekanntlich bilden Argon (Ar) und Helium (He) die Basis für die in Frage kommenden Schutzgase, denen neben Wasserstoff (H₂) auch die Aktivgaskomponenten Kohlendioxid (CO₂) oder Sauerstoff (O₂) zugemischt werden.

Abb. 10: Übersicht geeigneter Auftragschweißverfahren

Bei den in der Praxis bereits eingeführten Schutzgasen handelt es sich um Gasgemische folgender Zusammensetzung:

- Ar + 30% He + 2% H₂ + 0,05 - 0,1% CO₂
CRONIGON Ni 10 ®, Sagox Ni ®
- Ar + 50% He + 0,05% CO₂ - CRONIGON Ni 20®
- Ar + 30% He + 0,5% CO₂ - Sagox 3 K®

Mit den diversen Gasqualitäten werden gute Resultate erzielt. Für die Nasskorrosionswerkstoffe aus der Gruppe der sog. C-Legierungen ist auf Schutzgase mit geringem Kohlendioxidgehalt zu achten. Wie beim MSG-Schweißen von CMn- und CrNi-Stählen verbessert eine CO₂-Beimengung die Lichtbogenstabilität. Da die Grundwerkstoffe und Schweisszusätze jedoch aus Gründen der Nasskorrosionsbeständigkeit tief entkohlt sind, muss ein Zubrand aus dem Schutzgas unbedingt vermieden werden. Die Vorteile neben der deutlichen Verbesserung der Wirtschaftlichkeit (erhöhte Abschmelzleistung) lassen sich wie folgt umschreiben:

- verbessertes Fließ- und Benetzungsverhalten verglichen mit inerten Schutzgasen
- ausgezeichnete Lichtbogenstabilität
- deutlich vermindertes Auftreten von Lagen- und Flankenbindefehlern
- sehr gute Lagenüberschweisbarkeit
- äusserst geringer Spritzeranfall, hohe Korrosionsbeständigkeit
- geringe Heissrissneigung und ausgezeichnete mechanisch-technologische Eigenschaften wie der Auswertung (Abb.8) zu entnehmen ist.

Die aufgeführte Kombination aus Grundwerkstoff 2.4605 und Schweisszusatz gem. DIN EN ISO 18274 S Ni 6059 - Thermanit Nimo C24 ist in Verbindung mit den Schutzgas Cronigon Ni 10 oder Sagox Ni gem. VdTÜV-Blatt# 505 und VdTÜV-Kennblatt# 06461.05 eignungsgeprüft und kann für die Herstellung von Druckgeräten im Sinne der Europäischen Druckgeräte Richtlinie (PED) verwendet werden.

(Cronigon: ist eingetragenes Warenzeichen der Linde AG, Sagox ist eingetragenes Warenzeichen der Westfalen AG)

Auftragschweissen Überblick

Unter dem Begriff Auftragschweissen versteht man die Aufbringung einer festhaftenden Schicht auf ein Werkstück, welches durch Schweissen zwecks Oberflächenschutzes gegen Korrosion bzw. Erosion und/oder sonstigen Verschleiss geschützt werden soll. Die Aufbringung derartiger Schutzschichten erfolgt über die flüssige Phase des ausgewählten Schweisszusatzwerkstoffes. Hierbei stellt der Aufmischungsgrad ein wichtiges Qualitätskriterium dar und wird im Wesentlichen bestimmt durch die thermische Beeinflussung des Grundwerkstoffs sowie die metallurgischen Reaktionen zwischen Schweisszusatz und Hilfsstoffen.

Ein hoher Aufmischungsgrad bedeutet jedoch eine Veränderung der Schichtzusammensetzung gegenüber dem Schweisszusatzwerkstoff und beeinflusst somit entscheidend die Eigenschaften und Beständigkeit der Auftragung. Der Aufmischungsgrad A (%) wird als Quotient aus den planimetrisch ermittelten Flächenanteilen aus angesmolzenem

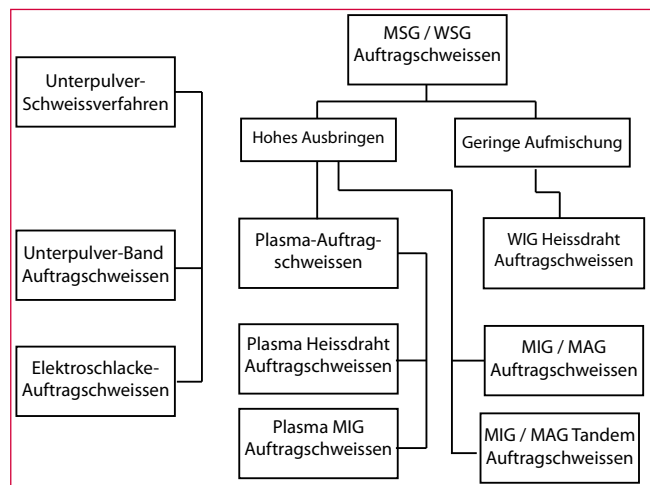


Abb. 9: Übersicht geeigneter Auftragschweißverfahren

Grundwerkstoff zum gesamten Schweissgut definiert. Die Vorteile des Auftragschweissens gegenüber anderen Verfahren wie z. B. dem thermischen Spritzen oder dem Walz- und Sprengplattieren lassen sich wie folgt beschreiben:

- hohe Haftung des Auftragswerkstoffes auf dem Substrat aufgrund metallischer Bindung
- porenfreie und dichte Beschichtungen
- wirtschaftliches Beschichten von Bauteilen mit komplizierten Geometrien möglich

Die Wahl des geeigneten Verfahrens zum Auftragschweissen richtet sich nicht zuletzt danach, mit welchem Schweisszusatz das Bauteil beschichtet werden soll. Es sind u. a. die zu erwartenden Beanspruchungen, das Bauteil im Hinblick auf Werkstoffauswahl, Grösse und Form sowie Fertigungsbedingungen und Verfügbarkeit zu beachten.

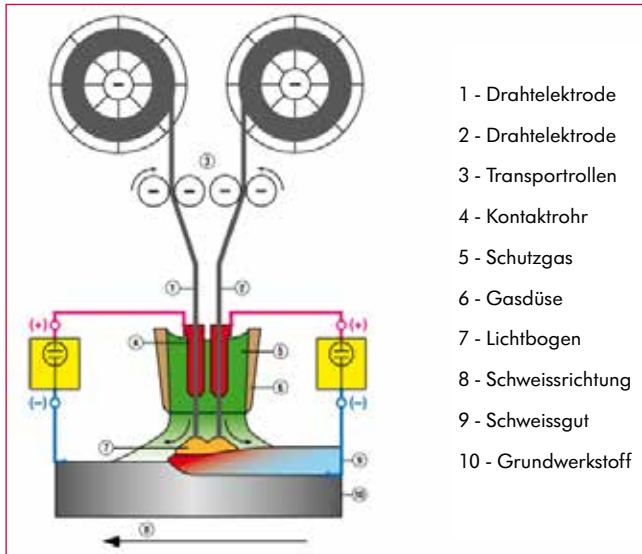
Da das Auftragschweissen metallurgisch einen schweren Eingriff in den Grundwerkstoff bzw. Trägerwerkstoff darstellt, müssen vor der Durchführung einer Auftragschweissung verfahrenstechnische und werkstoffkundliche Aspekte berücksichtigt werden.

Es ist daher vorab zu prüfen ob:

- der Trägerwerkstoff grundsätzlich schweisbar ist
 - für den Trägerwerkstoff und/oder Schweisszusatzwerkstoff eine Vor- und/oder Nachwärmung erforderlich ist
 - der Einfluss des Verfahrens auf Kosten und Qualität des niedergeschmolzenen Schweissgutes richtig kalkuliert ist
- Hieraus sind entsprechende Massnahmen abzuleiten um wirtschaftliche und technisch hohe Anforderungen hinsichtlich der Schutzwirkung zu erfüllen.

Diese umfassen unter anderem:

- die Einhaltung der spezifizierten chemischen Zusammensetzung des Schweissgutes
- die Gleichmässigkeit des Einbrandes
- eine möglichst geringe Aufmischung
- die Konstanz der Schichtdicke und Kerbfreiheit der Schichtoberfläche



- 1 - Drahtelektrode
- 2 - Drahtelektrode
- 3 - Transportrollen
- 4 - Kontaktrohr
- 5 - Schutzgas
- 6 - Gasdüse
- 7 - Lichtbogen
- 8 - Schweißrichtung
- 9 - Schweißgut
- 10 - Grundwerkstoff

Abb. 10: Prinzipskizze zum MAG-Tandemschweißen

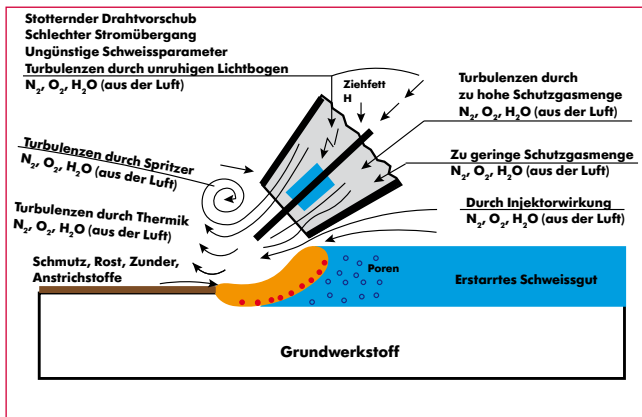


Abb. 11: Störeinflüsse beim MSG-Schweißen

Auftragschweißprozess	Auflagedicke [mm]	Aufmischung [%]	Abschmelzleistung [kg/h]
1 UP-Band	5 - 8	13 - 14	10 - 25
2 RES-Band	4 - 5	10 - 15	15 - 35
3 MAG	4 - 8	10 - 20	6 - 8
4 MAG-Tandem	3 - 5	1,5 - 4	8 - 12
5 Plasma-Heissdraht	2 - 7	5 - 20	10 - 20
6 Plasma-MIG	4 - 6	6 - 12	8 - 12
7 WIG-Heissdraht	1,5 - 3	2 - 5	1 - 3

Abb. 12: Kennwerte zu Auftragschweißprozessen

Auftragschweißprozesse

Das Auftragschweißen grossflächiger und dickwandiger Bauteile erfolgt vorzugsweise mittels mechanisierter Auftragschweißprozesse (Abb. 10), die unter industriellen Fertigungsbedingungen bei hoher Flächenleistung die Herstellung dünner Schichten mit einem, für eine fehlerfreie metallische Bindung, gleichmässigen und geringen Einbrand ermöglichen (Abb. 12).

MAG-Auftragschweißen

Neben den für Nickellegierungen bekannten schlackeführenden Auftragschweißprozessen UP und RES soll im Folgenden das Auftragschweißen unter Schutzgas näher beschrieben werden.

Beim MAG-Auftragschweißen wird ein durch die Brennermitte mechanisch zugeführter, anodisch gepolter Draht durch einen Lichtbogen abgeschmolzen, der das Anschmelzen des Werkstückes bewirkt. Zur Erhöhung der Abschmelzleistung ist u. a. eine Variante des MAG-Prozesses mit zwei Drahtelektroden (MAG-Tandem) Abb. 10 möglich.

Wesentliches Merkmal dieser Verfahrensvariante ist, dass die beiden Kontaktrohre elektrisch voneinander getrennt, jedoch in einer gemeinsamen Schutzgasdüse untergebracht sind. Zum Betreiben der beiden Lichtbögen werden zwei voneinander unabhängige Stromquellen gleicher Bauart benötigt. Die Schweißdaten der beiden Lichtbögen können gleich oder auch unterschiedlich sein.

Ein wichtiges Argument für das Tandem-Schweißen ist die höhere Störsicherheit beim Schweißprozess gegenüber dem Doppeldrahtprozess. Es kommen üblicherweise Drahtelektroden durchmesser von 1,0 - 1,2 mm zum Einsatz. Die Investitionskosten für eine MAG-Tandem Anlage sind relativ gering, da nur zwei weitgehend handelsübliche Impulsstromquellen und ein Mehrdrahtbrenner neben dem allgemein üblichen Zubehör (z. B. Drahttransporteinheit, etc.) benötigt werden.

Bei dem Einsatz der MSG-Schweißprozesse insbesondere beim Auftragschweißen ist die Beschaffenheit der Drahtelektrode von besonderer Bedeutung.

Die Eignung von Drahtelektroden für das MSG-Schweißen lässt sich anhand der mechanisch-technologischen Eigenschaften, Oberflächenausführung sowie Cast (Sprungmass) und Helix (Drall) gut beschreiben.

Um diverse Störungen im Schweißprozess (Abb. 12) zu minimieren, spielt die Oberflächenausführung in diesem Zusammenhang eine wesentliche Rolle. Die Stromkontaktierung und der Reibverschleiss an der Stromkontaktdüse beeinflussen unmittelbar die Prozesssicherheit beim MSG-Schweißen. Beim Auftragschweißen mit Drahtfördergeschwindigkeiten oberhalb von 10 m/min und einem Drahtdurchmesser 1,2 mm stellen sich hier die höchsten Ansprüche an das Drahtförderverhalten ein. Optimierungen des Fertigungsprozesses bei der Herstellung von Drahtelektroden resultieren in einem „leicht matten“ Oberflächenfinish bei Drähten für derartige Anwendungen. Die Festigkeitseigenschaften dieser Drähte können in Abhängigkeit des Fertigungsverfahrens, beispielsweise bei dem Schweißzusatz S Ni 6625 zwischen ca. 1300 MPa und 1800 MPa variieren. Die höhere Festigkeit hat sich bei einigen Vorschubsystemen bewährt, sofern Deformationen des Drahtes als Ursache für ein unbefriedigendes Drahtförderverhalten ausgemacht wurde.

Tabelle 3: Kennwerte zu Auftragsschweisprozessen

Zur Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit im Schweißbetrieb z. B. beim Auftragschweißen von Kesselrohren und Membranwänden für Müllverbrennungsanlagen werden neben den gängigen Korbspulen mit 15 kg Drahtelektroden dia. 1,0 bis 1,2 mm werden auch Fassgebände mit bis zu 500 kg verwendet. Als Schweißzusatzwerkstoff kommt hierbei der DIN EN ISO 18274 S Ni 6625 – Thermanit 625 oder DIN EN ISO 18274 S Ni 6686 – Thermanit 686 in Betracht. Der in den USA für diese Anwendungen häufiger verwendete Schweißzusatz DIN EN ISO 18274 S Ni 6622 – UTP A 722 gehört wie der Thermanit 686 zu den sog. C- Legierungen, die primär für Nasskorrosionsanwendungen in den 1980er Jahren entwickelt wurden.

Die erfolgreiche Verwendung der o. a. Schweißzusatzwerkstoffe setzt jedoch in den jeweiligen MV-Anlagen Feldversuche mit entsprechend auftragsgeschweißten Flächen voraus. Die werkstoffgerechte schweisstechnische Verarbeitung lässt sich anhand von Korrosionsversuchen wie dem ASTM G 28 A (IK-Test), ASTM G 48 C, oder Grüner Tod (LK-Tests) für Nasskorrosionsanwendungen recht gut belegen. Die sehr komplexen Vorgänge der Hochtemperaturkorrosion in der MVA ermöglichen derartige Tests nicht. Als wesentliches Abnahmekriterium für das Cladding in MV Anlagen dient ein kontrolliert niedriger Eisengehalt. Die Adaptierung des MAG- Prozesses für das Auftragschweißen (Cladding) setzt ausserdem einige Erfahrung des Schweißbetriebes über die Herstellung derartiger Kesselkomponenten voraus.

Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde das Verbindungs- und Auftragschweißen von Nickelwerkstoffen unter dem Aspekt moderner Schweisstechnologien behandelt. Die aufgezeigten Schweißprozesse mit den Vorteilen grosser Wirtschaftlichkeit bzw. hoher Abschmelzleistung haben in Verbindung mit entsprechenden Schutzgasen Qualitätsanforderungen zu genügen, die sich wie folgt darstellen:

- Einhaltung mechanisch-technologischer Eigenschaften
- beherrschbares Heissrissverhalten
- gute Korrosionsbeständigkeit
- spritzerarmer Werkstoffübergang
- hohe Prozessstabilität
- geringer Nacharbeitsaufwand

Ziel dieser Anforderungen ist es, den „speziellen Prozess“ Schweißen so zu gestalten, dass die Eigenschaften der verwendeten Grundwerkstoffe im geschweißten Zustand aufrechterhalten bleiben. Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz dieser Schweisstechnologien ist das gut ausgebildete schweisstechnische Personal, das die vorgestellten Schweißprozesse sicher beherrschen muss.

Innovative Schweißprozesse wie die sog. wärmereduzierten MSG-Schweißprozesse führen zu einer breiteren Anwendung des MSG-Schweißens.

Zurzeit ist die anspruchsvolle Prozessführung mit einem hohen Mechanisierungsgrad verbunden. Die Weiterentwicklung dieser Prozesse sollte auch die Teilmechanisierung

beinhalten, wie sie derzeit beim konventionellen MSG-Impulsschweißen möglich ist.

Wünschenswert wäre damit auch die Beseitigung eines Nachteils beim MSG-Schweißen – die fehlende bzw. schwierige Wurzelschweiß- und Spaltüberbrückbarkeit, die mittels WIG-Schweißprozessen besser gegeben ist.

Literaturhinweise:

- International Nickel Study Group
- DVS Merkblatt Reihe 1004 ff; DVS Verlag
- W. Römer; das Sanieren von Rauchgas – Reinigungsanlagen, Krupp VDM; Druckschrift N 569
- U. Brill, M. Rockel; Report 25 Hochtemperaturwerkstoffe der Krupp VDM für den Anlagebau
- T. Hoffmann; Nickelwerkstoffe und hochlegierte Sonderedeltählen
- Expert Verlag, Renningen (S. 82 – 115)
- Schweißzusatzwerkstoffe für den chemischen Apparatebau, Druckschrift Thyssen Schweisstechnik GmbH
- M. Zinke et al. Erhöhung der Heissrissicherheit von hochwarmfesten Ni-Basislegierungen durch die Anwendung stickstoffhaltiger Schutzgase beim Schweißen. DVS-Verl., 2003, S. 249 (DVS-Berichte 225)
- K.-P. Schmidt; Der CMT-Prozess - Verfahrensprinzip, Gerätetechnik, Bedienungskonzept Vortrag: Erfahrungsaustausch MSG-Schweißen "Die kalten Verfahren", SLV München 2007
- M. Zinke et al. Schweißmetallurgische Untersuchungen zum wärmereduzierten MAG-Verbindungsschweißen heissrissempfindlicher Ni-Basislegierungen, IGF Bericht 16.316 B, 2012
- DVS Merkblatt 0973 – Übersicht der Prozessregelvarianten des MSG Schweißens, DVS Verlag 2015
- A. Manzke, Energie aus Abfall - Technischer Stand beim Schweißplattieren, TK Verlag 2017