

Einsatz der Sinterbandelektrode COROSINT 625 für das Einlagen-RES-Auftragschweißen in Behältern der Ölindustrie

Dr.-Ing. Bernd Reichmann, Corodur Verschleiss-Schutz GmbH, Thale
Dr.-Ing. Belkacem Bouaifi, Neue Technologie Systemlösungen, Osterode
Dipl.-Ing. Peter Deppe AEGIS AG, Winterthur

1 Einleitung

Für korrosiv hoch beanspruchte Anlagen der chemischen Industrie, der Verfahrens- und Umwelttechnik sowie für die Meerestechnik werden als Werkstoffe zum Korrosionsschutz in zunehmendem Maße Nickelbasislegierungen eingesetzt, insbesondere wenn aggressive Medien mit zusätzlichen Verunreinigungen wie z.B. Chloriden vorliegen. Diese hochkorrosionsbeständigen Legierungen werden aufgrund der hohen Werkstoffkosten bevorzugt als Verbundwerkstoff eingesetzt. Die Dicke der Schutzschicht wird hierbei nur nach dem zu erwartenden Korrosionsangriff bemessen, wobei die zu erwartenden Konstruktions-, Schweiß- und Betriebsspannungen auf wesentlich kostengünstigere Werkstoffe, in der Regel auf unlegierten Stahl, übertragen werden.

Neben der im Vergleich zur Massivbauweise enormen Einsparung an teurem Material ist das Verbindungsschweißen der äußeren Bauteilwandung aus gut schweißbarem un- oder niedriglegiertem Stahl mit Trag- und Stützelementen wesentlich einfacher und rationeller als bei einer Konstruktion aus massivem Sonderwerkstoff. Als die am häufigsten eingesetzten Verfahren zur Herstellung von Korrosionsschutzschichten sind das Walzplattieren, das Sprengplattieren und das Hochleistungs-Auftragschweißen zu nennen. Das Walzplattieren und das Sprengplattieren werden, abgesehen von einigen Sonderfällen, großtechnisch nur für ebenes Halbzeug angewendet, wobei die geometrischen Abmessungen verfahrensabhängig begrenzt bleiben müssen.

Auftragschweißverfahren bieten dagegen eine wesentlich größere Gestaltungsfreiheit hinsichtlich Größe und Geometrie der zu beschichtenden Bauteile sowie im Hinblick auf zeitliche und örtliche Flexibilität beim Plattieren in der Neufertigung und bei Reparaturen. Schweißtechnisch werden Nickellegierungen in der Regel als Massivdraht- oder Bandelektroden verarbeitet. Nachteilig wirkt sich hierbei jedoch neben den erheblichen Kosten für die Fertigung derartiger Schweißzusätze die eingeschränkte Verfügbarkeit von an den Einzelfall angepassten Legierungszusammensetzungen aus. Kundenspezifische Chargen, angepasst an die jeweiligen Randbedingungen

des geplanten Einsatzbereiches, sind nur in großen Mengen bzw. gar nicht verfügbar.

Hier stellen pulvermetallurgisch hergestellte Bandelektroden aus den o.g. Werkstoffen eine wirtschaftliche Möglichkeit dar, Schweißzusätze entsprechend den jeweiligen Anforderungen des Schweißverfahrens und des Anwendungsfalles in angepassten Legierungszusammensetzungen einzusetzen. Diese sog. Sinterbandelektroden können kurzfristig, auch in kleinen Chargen und in beliebigen Abmessungen hergestellt werden, wobei die Fertigungskosten gegenüber Massivelektroden deutlich niedriger ausfallen.

Darüber hinaus bieten Sinterbandelektroden aufgrund des veränderten Abschmelzverhaltens gegenüber der Massivelektrode und ihrer gezielt einstellbaren Zusammensetzung verfahrenstechnische Vorteile. So verschiebt sich die benötigte Abschmelzenergie aufgrund der speziellen Bandstruktur zu kleineren Werten, wodurch neben einer geringeren Wärmebeeinflussung des zu beschichtenden Bauteils die Abschmelzleistung gesteigert werden kann.

Im Rahmen dieses Beitrages werden erste Untersuchungsergebnisse vorgestellt, die sich mit der Herstellung und den Korrosionseigenschaften der Nickelbasislegierung Alloy 625 aus Sinterbandelektrode befassen, die durch Elektroschlacke (RES)-Auftragschweißen einlagig hergestellt wurde.

2 RES-Auftragschweißprozeß

Das Elektroschlacke-Auftragschweißen (**RES - Resistance Elektro Slag**) ist, wie das UP-Verfahren, als Hochleistungsverfahren anzusehen. Es ähnelt dem UP-Band-Auftragschweißen, jedoch dient hier nicht der Lichtbogen als Wärmequelle, sondern ein durch Stromdurchgang erhitztes Schlackebad, **Bild 1**. Das Verfahren ist deshalb der Gruppe der Widerstandsschmelzschweißverfahren zuzuordnen, /RUGE80, GRÄF91, KILL88/. Das RES-Verfahren wird mechanisiert und mit hoher Wirtschaftlichkeit in erster Linie für das Beschichten großer Werkstückdicken eingesetzt. Für das Auftragschweißen ist nur die Verwendung von Elektroden in Bandform von Bedeutung.



Bild 1: RES-Auftragschweißprozeß

Als RES-Schweißpulver wird ein lichtbogenfeindliches Schweißpulver verwendet, das im Gegensatz zur Vorgehensweise beim UP-Schweißen nur vor dem Band zugegeben wird. Nach einer kurzen Anlaufphase hat der zunächst entstehende Lichtbogen hinter dem Band eine ausreichende Menge Pulver zu Schlacke geschmolzen. Mit steigender Temperatur verringert sich der Widerstand der Schlacke soweit, dass der des Lichtbogens wesentlich unterschritten wird und dieser deshalb erlischt. Der Restwiderstand des Schlackebades reicht aus, um durch Joule'sche Erwärmung Temperaturen um 2000 °C zu erreichen. Dadurch wird die Wärme zum Anschmelzen des Substrates und zum Aufschmelzen des Schweißzusatzes bereitgestellt.

Die Verwendung von neben dem Bandkopf angeordneten Elektromagneten zur Beeinflussung der Benetzungsverhältnisse an den Raupenflanken hat sich bei diesem Verfahren ebenfalls als günstig erwiesen, /ORNI88/.

Die Aufmischungen mit dem Grundwerkstoff liegen in der Regel unter 10%, so dass leicht überlegierte Bandelektroden in der ersten Lage ausreichen. Meist wird mit den Standardabmessungen 60 x 0,5 mm gearbeitet, jedoch können auch breitere Bänder bis 180 mm verarbeitet werden. Bezüglich der Abschmelzleistung liegt das RES-Verfahren bei etwa 180-190 % des UP-Bandplattierens. Daraus ergeben sich deutliche Kostenvorteile, /KILL88, SEID71/.

RES- Auftragschweißungen kommen, ähnlich den UP-Auftragungen hauptsächlich bei dickwandigen Konstruktionen wie Rohrböden von Dampferzeugern, Druckbe-

hälter für Kernreaktoren, Rohrplatten für Wärmetauscher, aber auch Walzwerksrollen zum Einsatz: Das RES-Auftragschweißen zeichnet sich im Gegensatz zum UP-Plattieren durch einen geringeren Einbrand mit Aufmischungsgraden von <15% aus. Die Flächenbeschichtungsleistung ist mit etwa 0,5m²/h akzeptabel. Allerdings ist der Energieeintrag mit 192 J/mm² sehr hoch. Dadurch ergibt sich eine Verbreiterung der Wärmeeinflußzone, was eine Grobkornbildung im Grundwerkstoff zur Folge haben kann. Durch den geringeren erreichbaren Aufmischungsgrad genügen beim RES-Auftragschweißen ein bis zwei Lagen, um die geforderten Zusammensetzungen der Plattierungsoberfläche zu erreichen. Zur Erhöhung der Abschmelzleistung können auch zwei Bänder bzw. mehrere Drähte gleichzeitig zugeführt werden. Aufgrund der einfachen Handhabung und des geringen apparativen Aufwandes sowie der hohen Leistungsfähigkeit wird dieses Verfahren bevorzugt für das Beschichten großflächiger Bauteile, wie beispielsweise Behälter in der chemischen Industrie, eingesetzt, /BLUM89, WEND91, KILL88, BOUA96, BOUA95/.

3 Nickel-Basislegierungen – Eigenschaften und Anwendungen

Nickel und Nickellegierungen haben aufgrund ihrer guten Beständigkeit in sauren und basischen Medien bei guten Festigkeitseigenschaften eine verbreitete und universelle Anwendung im Apparate- und Anlagenbau für die chemische Industrie, die Verfahrens- und Umwelttechnik sowie für die Offshore- und Onshoretechnik gefunden, /BOUA92, MÜLL76, DAEM77, MCCA85, BLAS85, EICH69/. Sie kommen unter extrem korrosiven Bedingungen zum Einsatz, selbst wenn die Beständigkeit der korrosionsbeständigen Sonderedelstähle nicht mehr ausreicht, jedoch der Einsatz der höchstbeständigen, sehr teuren und schwer zu verarbeitenden Sondermetalle, wie Titan, Tantal, Zirkonium oder Niob, nicht gerechtfertigt ist. Im Vergleich zum Einsatz von organischen Beschichtungen sind, insbesondere bei langfristigem Einsatz, die Anlagenlebensdauerkosten trotz der relativ hohen Werkstoffkosten der Nickellegierungen deutlich geringer /ROCK93, NN84/.

Ein weiterer Vorteil bei der Anwendung von Nickelwerkstoffen liegt in der Möglichkeit, ausgediente Apparate- und Bauteile umweltgerecht zu recyceln und so das wiedergewonnene Nickel dem Fertigungsprozeß zurückzuführen, /ALTP94/.

Die Legierung Alloy 625, die der Nickel-Chrom-Molybdän-Gruppe zugeordnet ist, wurde ursprünglich als Hochtem-

peraturwerkstoff für den Flugzeugbau entwickelt. Alloy 625 hat etwa den gleichen Nickelgehalt wie Alloy C-4, jedoch ist der Chromgehalt bei weitem höher und macht ihn hierdurch beständiger gegen oxidierende Medien. Der Molybdängehalt ist geringer als der des Alloy C-4. Das Legierungselement Niob wurde zulegiert, um Heißrisse zu vermeiden und, im Zusammenspiel mit Molybdän, die mechanischen Eigenschaften über eine Mischkristallverfestigung der Nickel-Chrom-Matrix noch zu erhöhen, /DAEM77, NN89/. Die chemische Zusammensetzung sichert, daß etwa erst nach 50 Stunden im Temperaturbereich zwischen 650° bis 900°C eine Sensibilisierung eintritt. Das Material ist gegenüber einer Vielzahl von Medien korrosionsbeständig. Die Schweißbarkeit mit allen konventionellen Verfahren ist sehr gut.

Um die oben beschriebenen Vorteile der Werkstoffe zu erzielen, ist beim Auftragschweißen ein homogenes Gefüge in der Plattierung Grundvoraussetzung für eine hohe Beständigkeit. Im Gegensatz zum Walzmaterial haben Auftragschweißungen eine dendritische Struktur. Auftretende Seigerungen während des Schweißprozesses können die Eigenschaften in erheblichem Maße beeinflussen. Je nach Prozessführung und Schweißlagenzahl ergibt sich eine mehr oder weniger starke Aufmischung an Eisen. Ausscheidungen an Korngrenzen, beispielsweise in Form von intermetallischen Phasen oder Karbiden können zu Chromverarmung im Korngrenzenbereich und damit zu bevorzugter Korrosion an Korngrenzen führen. Das Material ist sensibilisiert. Bei Alloy 625 wird eine Sensibilisierung infolge von Karbidausscheidungen vermutet. Die auftretenden Phasen enthalten durchschnittlich 27-30% Nickel, 42-50% Molybdän, 11-16% Chrom, 4-9% Wolfram und 1,5-5% Eisen. Die einzelnen Phasen weisen unterschiedliche Gitterstrukturen auf. So ist die μ -Phase hexagonal, M_6C kubisch und die P-Phase tetragonal, /HEUB92/

Eine hohe thermische Stabilität in oxidierenden Lösungen wird erreicht, wenn das Verhältnis von $Cr/Mo + W > 1,3$ beträgt.

Beim Schweißen von insbesondere dickwandigen Bauteilen aus Nickelbasislegierungen ist es notwendig, bestimmte Abkühlgeschwindigkeiten einzuhalten. Diese sollten möglichst groß sein, damit der Bereich der Sensibilisierung, der für das Auftreten der interkristallinen Korrosion und somit für Phasenausscheidungen verantwortlich ist, schnell durchlaufen wird, **Bild 2**. Aus dieser Abbildung sind die Testergebnisse über die Anfälligkeit für interkristalline Korrosion zu entnehmen. Beim Auftragschweißen werden längere Glühzeiten bei kritischen Temperaturen, die eine Sensibilisierung des Schweißgutes hervorrufen

könnten, aufgrund der hierbei auftretenden relativ hohen Abkühlgeschwindigkeiten nicht erreicht.

Allerdings ist bei Plattierungen hinsichtlich ihrer Sensibilisierungsneigung nichts bekannt.

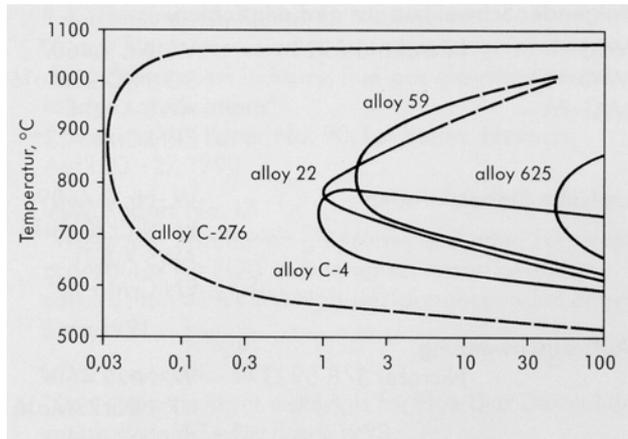


Bild 2: Zeit-Temperatur-Sensibilisierungsschaubild ZTM von Nickelbasislegierungen nach ASTM B-28, Methode A (50% $H_2SO_4+41,7g/l Fe_2(SO_4)_3 \times 9H_2O$ 24 h siedend, Kriterien: Angriff $> 50\mu m$)

4 Sinterbandschweißzusätze- Herstellung und Merkmale

Pulvermetallurgische Bandelektroden wurden speziell für das Auftragschweißen zur Herstellung von verschleißbeständigen und wärmefesten Schichten für das UP- und RES-Auftragschweißverfahren entwickelt. Jeweils an den spezifischen Anforderungen des späteren Einsatzfalles angepasst, können Legierungen entsprechend den Wünschen des Anwenders nahezu beliebig zu Schweißzusätzen verarbeitet werden. Voraussetzung an die einzusetzenden Schweißpulver ist aber, daß die Pulver verklammerungsfähig sind. Daher werden als Ausgangsstoffe hauptsächlich wasserverdünnte Eisenpulver und Mehrstofflegierungen, Pulver von Ferrolegierungen sowie pulverisierte intermetallische Phasen oder reine Metallpulver eingesetzt. Legierungen mit verschiedenen Anteilen an Legierungselementen mit stark differierenden Eigenschaften, wie beispielsweise die im Rahmen des Forschungsvorhabens zu entwickelnden Sinterbänder mit hohem Mo-Anteilen, muss auf geeignete Vorlegierungen zurückgegriffen werden. Nach der rechnerischen Bestimmung der Sollanalyse der gewünschten Legierung wird diese in Taumelmischern zusammengemischt, wobei sogar Kleinstmengen bis 10kg bereitgestellt werden können. Mittels eines Walzwerkes werden die Pulver zu einem sog. Grünband verdichtet und zu einem Grundcoil aufgerollt. Die mittlere Dicke des Bandes beträgt zwischen 0,5

und 0,8mm. Anschließend durchläuft das Rohband mit einer Geschwindigkeit von 0,5 bis 1m/min einen Sinterofen, worin dieses unter reduzierender Atmosphäre bei Temperaturen zwischen 1200 bis 1300°C, abhängig von der jeweiligen Legierungszusammensetzung, gesintert wird. In einer nachgeschalteten Schneidanlage wird das gesinterte Schweißband an den Rändern gesäumt sowie auf entsprechende Breiten geschnitten,

Bild 3.

Wesentlicher Vorteil dieses Sinterungsprozesses ist die Herstellung in nur vier Fertigungsschritten: Mischen, Walzen, Sintern und Schneiden.

Der Schweißprotokoll ist der **Tabelle 2** zu entnehmen. Dabei diente als Schweißpulver ein agglomeriertes, basisches RES-Pulver des Types Record NiCrT, das sich durch gute Schweißbarkeit und leichte Schlackenentfernbarkeit, sowie durch eine hohe Heißrißsicherheit aufgrund des sehr niedrigen Si-Gehaltes im Schweißgut auszeichnet.

Zusatzwerkstoff:	C:	Si:	Mn:	Cr:	Ni:	Mo:	Nb:	Fe:
COROSINT 625	0,015	0,16	0,28	21,70	Rest	10,0	3,30	0,45

Tabelle 1: Eingesetzte Sinterbandelektrode, Abmessungen 60 x 0,7 mm

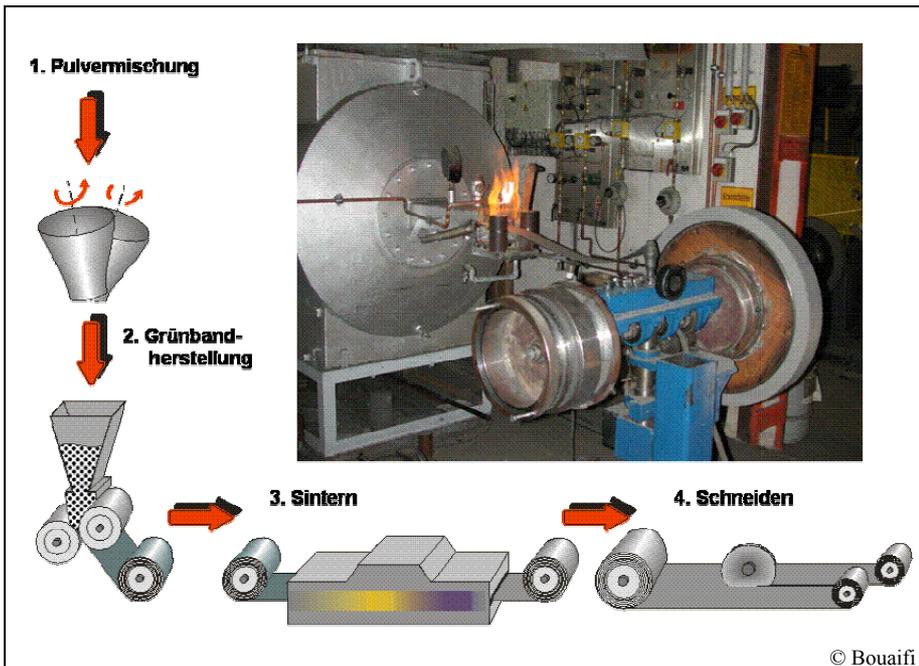


Bild 3: Sinterbandfertigung

In Verbindung mit der Verwendung nur trockener Pulver ohne Wasser-Bindestoff-Suspensionen, die eine kostenintensive Trocknung erforderlich machen, kann ein hohes Preis-Leistungsverhältnis erreicht werden. Der Einsatz von pulvermetallurgisch hergestellten Sinterbandelektroden stellt hier eine ständig an Bedeutung gewinnende Lösung dar.

5 Versuchsdurchführung

Eingesetzte Versuchswerkstoffe und Prozessparameter

Als Grundwerkstoff für die mittels RES-Auftragschweißen zu beschichtenden Substrate kam der unlegierte Baustahl S235JR in Blechdicken von 25 mm zum Einsatz. Für die Herstellung der RES-Auftragschweißung wurde die **Tabelle 1** aufgeführte Sinterbandelektrode eingesetzt.

Die Legierungsspezifikation und die Erstellung des technischen Anforderungsprofils an die Beschichtungen erfolgten in Abstimmung mit Betrieben der Ölindustrie. Als Einsatzmaterial wurde die Ni-Basislegierung COROSINT 625 (Werkstoff-Nr. 2.4831) ausgewählt und als Sinterbandelektrode gefertigt. Die Bewertung der Schichteigenschaften erfolgt anhand metallographischer und mikroanalytischer sowie durch chemische und elektrochemische Untersuchungen. Zum Vergleich wurde das Walzmaterial Alloy 625 herangezogen. Die Charakterisierung des allgemeinen Korrosionsverhaltens erfolgte mittels Aufnahme von Stromdichte-Potential-Kurven in schwefelsauren Elektrolyten. Die Beständigkeit gegen Lochkorrosion wurde auf chemischem Wege durch Bestimmung der kritischen Lochkorrosionstemperaturen im Eisen-(III)-chlorid-Test bestimmt.

Grundwerkstoff:	S235JR	Blechdicke:	25 mm
Bandelektrode:	COROSINT 625	Bandbreite:	60 x 0,7 mm
Schweißpulver:	Record NiCrT	Schweißprozeß:	Sehr stabil
Schweißstrom:	1050 A	Spannung:	27 V
Geschwindigkeit:	17,5 cm/min	Einbrand:	keine Einbrandkerben
Fiederung:	fein gefiedert, regelmäßig		
Nahtquerschnitt:	gleichmäßig, glatt		
Fehler:	keine		

Tabelle 2: Schweißprotokoll

6 Schichteigenschaften

6.1 Metallographische Untersuchungen

Die hergestellten RES-Auftragschweißungen wurden hinsichtlich ihres Gefügeaufbaus vor allem im Hinblick auf die Aufmischung untersucht. Zur Darstellung der Gefügeausbildung wurden Querschliffe angefertigt und nach entsprechender Präparation in 10%-iger Oxalsäure elektrolytisch geätzt. Das charakteristische Mikrogefüge vom Übergangsbereich Grundwerkstoff - Schweißplattierung verdeutlicht **Bild 4**. Das Mikrogefüge weist eine für das Auftragschweißen typische Gefügestruktur auf. Das Gefüge ist homogen und ohne Fehler wie z.B. Poren oder Schlackeeinschlüsse. Die Übergangszone zwischen Grundwerkstoff und Beschichtung ist relativ eben und besitzt einen scharfen Übergang.



Bild 4: Mikrostruktur in der Übergangszone Grundwerkstoff / Plattierung

Weiterhin wurden die Hauptlegierungselemente der einlagig hergestellten Auftragschweißung mit Hilfe von REM- und EDX-Prüfung analysiert und der Kohlenstoffgehalt spektrometrisch bestimmt, **Tab. 3**. Erkennbar für die einlagige RES-Schweißplattierung ist, daß die Werte von Cr, Mo und C in etwa mit denen vom Walzmaterial Alloy 625 vergleichbar sind. Der Eisenanteil beträgt 4,46% und wird allerdings in keinem Fall die maximale Eisenaufmischung von 3 % im Walzmaterial unterschritten.

	Cr	Ni	Mo	Fe	Nb	C*
RES, einlagig	21,63	60,26	9,82	4,46	2,69	0,022
Alloy 625**	21-23	Rest	8-10	max. 3	3,2-3,8	max. 0,025

*- Spektrometrische Bestimmung **Durchschnittsanalyse Datenblatt

Tab. 3: Chemische Zusammensetzung der Plattierungsoberfläche im Vergleich, REM/EDX (Analysefläche 1 mm²)

Die Mikroanalysen der Ausscheidungen, **Tab. 4** wurden ebenfalls an die einlagige Auftragschweißung im Querschliff durchgeführt. **Bild. 5** zeigt dazu rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen des Gefüges. Die hellen Ausscheidungen innerhalb der Dendriten sind stark niobhaltig. Weiterhin sind in **Bild 5** helle Bereiche um die Nb-Ausscheidungen erkennbar. Diese sind gegenüber der Matrix reicher an Nb und Mo, siehe auch **Tab. 4**.

	Cr	Ni	Mo	Fe	Nb
RES-einlagig					
heller Bereich (1)	21,92	60,81	9,05	4,43	3,79
dunkle Bereich (2)	21,57	64,26	7,80	4,78	1,59

Tab. 4: Mit REM/EDX bestimmte chemische Zusammensetzung der Ausscheidungen im oberflächennahen Bereich, Angaben in Gew.-%

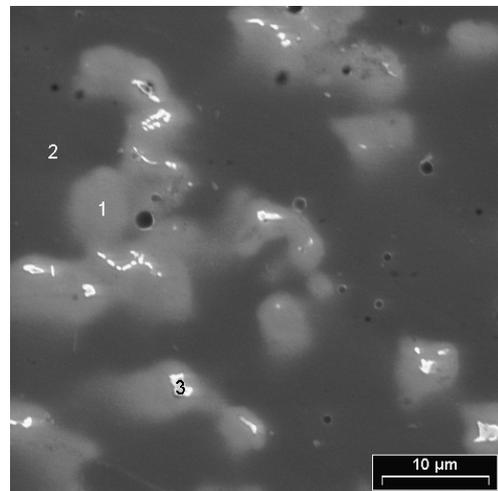


Bild 5: REM-Aufnahme einer einlagigen RES-Auftragschweißung; weiße hochniobhaltige Ausscheidungen < 1 µm (3), helle Bereiche (1) sind Nb- und Mo-reicher als Matrix (2), siehe Tab.2

6.2 Korrosionschemische Untersuchungen

6.2.1 Bestimmung der kritischen Lochkorrosionstemperaturen im Eisen-(III)-chlorid-Test

Für die Ermittlung der kritischen Lochkorrosionstemperatur wurde der Test in Eisen-(III)-chlorid-Lösung nach ASTM G 48 - 76, Methode A, modifiziert nach Renner angewandt. Die zu untersuchenden Proben wurden auf einem Probengestell aus Teflon in die Arbeitslösung getaucht. Als Versuchslösung wurde eine wässrige 10 % ige FeCl₃ x 6 H₂O Lösung verwendet, wobei das Verhältnis von Versuchslösung zu Probenoberfläche 15 ml je 1 cm² betrug. Beginnend bei 40°C wurde nach jeweils 24 h Expositionszeit die Tempe-

ratur um 5 °C erhöht. Als kritische Lochkorrosionstemperatur war die Temperatur zu bestimmen, bei der erstmals Löcher auftraten. Das erzielte Ergebnis mit etwa fast 78 °C entspricht nahezu den Wert vom Referenzwerkstoff Alloy 625 von > 85 °C.

6.2.2 Elektrochemische Korrosionsuntersuchungen

Die elektrochemischen Untersuchungen, **Bild 6**, erfolgten an einer Messapparatur bestehend aus einem Potentiostat-Galvanostat IMP 30, einer Generatoreinheit, einem Computer mit entsprechender Software zur Steuerung des Potentiostaten sowie zur Erfassung und Auswertung der Meßergebnisse einschließlich einer temperierbaren Drei-Elektroden-Meßzelle.

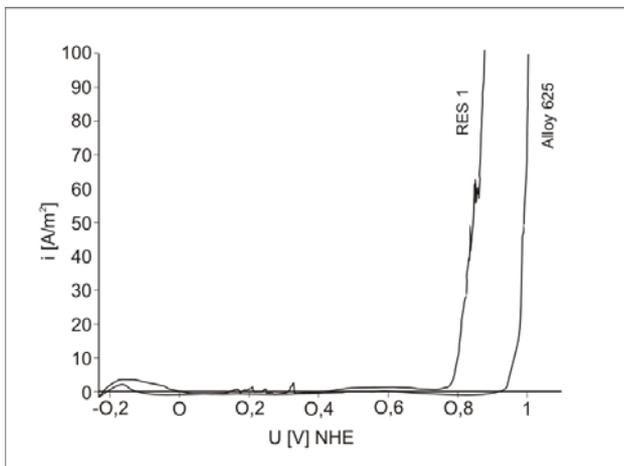


Bild 6: Stromdichte-Potential-Kurven von RES-Auftragschweißungen einlagigem Vergleich zu Alloy 625-Walzmaterial in 2N NaCl + 0,5 N HCl, T = 70 °C, Argon, dU/dt = 0,3 mV/s

Die Auswahl der Versuchsbedingungen erfolgte in enger Anlehnung an Literaturwerte /BAND83/. Die SPK wurden bei 70 °C mit einer Polarisationsgeschwindigkeit von 0,3 mV/s (600 mV/h) aufgenommen. Als Bezugs-elektrode wurde eine Ag/AgCl-Elektrode verwendet. Bei der Darstellung erfolgte jeweils eine Umrechnung auf das Potential der Normalwasserstoffelektrode. Der Elektrolyt bestand aus 2 N NaCl unter Zusatz von 0,5 N HCl. Die Lösung wurde während des Aufheizens ca. 30 Minuten lang mit Argon gespült. Während der Messung wurde ein Argonstrom über die Lösung geleitet. Nach einer 5 minütigen Ruhepotentialmessung wurden die Proben bis zum Durchbruch- bzw. Lochkorrosionspotential polarisiert. Bei der Bewertung wurde neben der Ermittlung charakteristischer Kennwerte aus den SPK eine mikroskopische Begutachtung der Proben vorgenommen. Die Verläufe

der Stromdichte-Potential-Kurven sind in den **Bild 6** dargestellt.

Das Durchbruchpotential von Alloy 625 wurde bei 960 mV bestimmt. Der Kurvenverlauf ist durch einen breiten Passivbereich gekennzeichnet. Bei -150 mV ist ein kleiner Aktivpeak mit Stromdichten von ca. 3 A/m² erkennbar. Die einlagige RES-Auftragschweißung weist eine relativ gute Korrosionsbeständigkeit auf. Lochkorrosion konnte weder in der Matrix noch in den Dendriten festgestellt werden. Das Lochkorrosionspotential liegt bei 790 mV und ist durch einen Passivbereich gekennzeichnet.

Die relativ geringe Aufmischung mit kleiner 10% Eisen führt dazu, dass das Material in diesem Medium nicht aufgelöst wird und eine Passivierung eintritt.

7 Praktische Anwendung

Das einlagige RES-Verfahren wurde eingesetzt im Rahmen des Conoco-Belanak-Projektes für Sandabscheider, welche auf einer Bohrinselform im südchinesischen Meer eingesetzt werden. Auf dem Grundwerkstoff SA 516 Gr. 70 wurden Sinterbänder 625 (EQNiCrMo-3), Güte Dinel 625, Abmessungen 60x0,7 mm aufgetragen.

Das Projekt lief unter der Bezeichnung „JN 400“ und sah die Beschichtung von Behältern und Böden vor, wobei die Mindestplattierungsstärke 4, mm, die Fe-Aufmischung kleiner 15% und die PRE (Pitting Resistance Equivalent) größer 40% ab 2mm Plattierungsstärke betragen sollte.

7.1 Technische Daten

Nachfolgend aufgeführte Fertigungsparameter kamen zur Anwendung:

- Schweißstrom: 1150 A (DC +Pol)
- Spannung: 24 – 25 V
- Schweißgeschwindigkeit: 17 cm/min
- Freie Banlänge: 30 mm
- Schütthöhe: 25 mm
- Raupenhöhe: 4,5 mm
- Überlappung: 5,0 mm
- Raupenbreite: 63,0 mm
- Vorwärmtemperatur: min. 120 °C
- Zwischenlagentemperatur: max. 200 °C
- Nachwärmbehandlung: 580 °C / 3h

7.2 Schweißprozeß und Ergebnisse

Für die Herstellung der RES-Auftragschweißung wurde die **Tabelle 5** aufgeführte Werkstoffe eingesetzt.

	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	Zr	V	P	Nb
Grundwerkstoff	0,18	1,69	0,6	0,197	0,975	0,287	0,044	0,021	0,002	0,001	0,013	0,005	0,002
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe	Ti	S	V	P	Nb
Sinterband	0,01	0,23	0,2	22,4	63,38	9,5	0,01	0,63	0,24	0,006	-	0,005	3,4

Tabelle 5: Eingesetzte Grund- und Zusatzwerkstoffe; Grundwerkstoff: ASTM 516Gr. 70; Sinterband DINEL 625 S, Chargen-Nr. 210508

Die im Rahmen dieses Projektes hergestellten RES-Schweißplattierungen, **Bild 8**, wurden hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht. Hierzu dienen mikroanalytische und mechanisch-technologische Untersuchungen.



Bild 8: RES-Schweißplattieren mit Sinterbandelektrode DINEL 625 S

Nachfolgend sind die erzielten Ergebnisse zusammengefasst, **Tabelle 6**.

Anhand der ermittelten chemischen Analyse ergibt sich ein **Pitting Resistant Equivalent** – Wert (**PRE** = %CR+3,3x%Mo+10%N) in Höhe von 53,28% in der Ebene 1 (4,5 mm), 51,72 in der Ebene 2 (3,0 mm) und 50,56% in der Ebene3 (2,0 mm), siehe Tabelle 6.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wird über den schweißtechnischen Einsatz von pulvermetallurgisch hergestellten Sinterbandelektroden am Beispiel des RES-Schweißprozesses berichtet, wobei die eingesetzte Ni-Basislegierung COROSINT 625 ein großes Gebiet des Korrosionsschutzes abdeckt.

Gesinterte Schweißzusätze weisen ein gutes Abschmelzverhalten auf, wobei die ermittelten Schichteigenschaften, z.B. die entstehende Gefügestruktur sowie die legierungsspezifische Korrosionsbeständigkeit, mit Eigenschaften vom Walzmaterial nahezu vergleichbar sind. Die erarbeiteten Ergebnisse wurden an Behältern der Ölindustrie umgesetzt. Eine deutliche Standzeiterhöhung konnte durch Einsatz der Sinterbandelektrode in Kombination mit dem RES-Auftragschweißprozess erzielt werden. Derartige Bauteile werden extremen Korrosionsbeanspruchungen unterzogen. Hierdurch wird die praxiserprobte Einsatzmöglichkeit, verbunden mit einer durch ihre kostengünstige Herstellung hohen Wirtschaftlichkeit, belegt. Aufgrund der großen Flexibilität im Hinblick auf die Legierungsanpassung und Verfügbarkeit stellen Sinterbänder eine sinnvolle Ergänzung zu konventionellen Schweißzusätzen dar, wodurch sich dem Anwender ein breites Einsatzfeld eröffnet.

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Fe	Nb	Ti	P	S
Bandanalyse	0,01	0,2	0,23	22,4	Rest	9,5	0,63	3,4	0,24	0,005	0,006
Plattierungsdicke von der Schmelzlinie in mm											
4,5 mm	0,025	0,30	0,22	21,6	Rest	9,6	5,6	2,56	<0,1	0,008	0,004
3,0 mm	0,030	0,34	0,27	20,7	Rest	9,4	9,6	2,43	<0,1	0,008	0,004
2,0 mm	0,033	0,28	0,30	20,2	Rest	9,2	12,0	2,34	<0,1	0,007	0,004

Tabelle 6: Chemische Analyse der Einlagenschweißung

Schrifttum		
/ALTP94/	Altpeter, A., Wallis, E. u. U. Heubner: Erprobung verschiedener metallischer Legierungen für die Abwasseraufbereitung hinter Rauchgasentschwefelungsanlagen; Werkstoffe und Korrosion (1994) 45, S. 539/549	/KILL88/ Killing, R. u. D. Böhme: Leistungskennwerte des Elektroschlackeplattierens mit Bandelektrode; Schweißen u. Schneiden 40 (1988) 6, S. 283/288
/BAND83/	Bandy, R.; van Rooyden, D.: „Pitting resistant alloys in highly concentrated chloride media“ Corrosion, 39 (1983) 6, S. 227-235	/MCCA85/ McCann, J. u. G. Stevens: Evaluation, development and design of transport rollers in continous casting plant; Final report – Hrsg.: Commission of the European Communities, Luxembourg 1985
/BLAS85/	Blaskovic, P., Comaj, M. u. J. Malik: Present state and future perspective of surfacing rolling mill in Czechoslovakia; International conference on surface engineering. Brighton, 25.06.85 - 28.06.85; Vol. 2: Weld surfacing – Hrsg.: Welding Inst. Cambridge 1985 S. 39/48	/MÜLL76/ Müller, P.: Handbuch des Unterpulverschweißens; Deutscher Verlag für Schweißtechnik Düsseldorf, Band 1-5
/BLUM89/	Blum, J., Steffens, H.-D. u. E.-R. Sievers: Unterpulver- und Elektroschlacke – Auftragschweißen mit Füllbandelektroden; DVS-Berichte, Bd. 123 (1989), S. 134/139	/N.N.84/ N.N.: EPRI-Report CS – 3628; EPR-Institut, August 1984
/BOUA92/	Bouaifi, B.: Gesinterte Bandelektroden im Wettbewerb; Schweizer Maschinenmarkt 46 (1992), S. 40/45	/N.N.89/ N.N.: Verdecktes Lichtbogenschweißen; Schweißtechnik-Praktikum, ISAF Clausthal 1989
/BOUA95/	Bouaifi, B.: Auftragschweißen; Hrsg. E. Moeller u. W.-D. Kaiser, WEKA-Verlag (1995), Teil 8, Kap. 7, S. 1/38	/ORNI88/ Ornig, H. et. Al.: Optimierung der Schweißplattierverfahren im Apparatebau; Schweißtechnik (1988), S. 143/147
/BOUA96/	Bouaifi, B., Schreiber, F., Reichmann, B. u. E. Scholz: Schmelzschweißverhalten von Sinterbandelektroden aus Fe-, Co-, und Ni-Basislegierungen; DVS-Berichte, Band 176 (1996), S. 126/129	/ROCK93/ Rockel, M. u. W. Römer: Korrosionsbeständige Nickellegierungen; Ingenieur-Werkstoffe 5 (1993) 9/10, S. 2/3
/DAEM77/	Daemen, R.: Auftragschweißen von Stranggußrollen; DVS-Bericht 83, S. 102/106	/RUGE80/ Ruge, J.: Handbuch der Schweißtechnik Bd. I; Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, (1980)
/EICH69/	Eichhorn, F. u. A. Engel: Räumliche Unterteilung des Schmelz-bades und der abdeckenden Schlacke beim Unterpulverschweißen; Schweißen und Schneiden 21 (1969) 12, S. 584/587	/SEID71/ SEIDEL, G. U. HESS, H.: Untersuchungen zum Elektroschlackeschweißplattieren mit Bandelektrode. Schweißen und Schneiden 23 (1971) 10, S. 410/411
/GRÄF91/	Gräfen, H.: Lexikon Werkstofftechnik; VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf (1991)	/WEND91/ Wende, U. u. R. Demuzere: Elektroschlacke-Plattieren mit Bandelektroden aus hochkorrosionsbeständigen Ni-Basislegierungen und Sonderstähle; DVS-Berichte 131 (1991), S. 110/114
/HEUB92/	Heubner, U. u. M. Rockel: Das Zeit-Temperatur-Ausscheidungs- und das Zeit-Temperatur-Sensibilisierungsverhalten von hochkorrosionsbeständigen Ni-Cr-Mo-Legierungen; Werkstoffe und Korrosion 43 (1992), S. 181/190	