

Lassen van roest- en hittevast staal

vm 42

VWM

Lassen van roest- en hittevast staal

vm 42



Vereniging FME-CWM

vereniging van ondernemers in de
technologisch-industriële sector

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
Telefoon: (079) 353 11 00
Telefax: (079) 353 13 65
E-mail: info@fme.nl
Internet: www.fme.nl

© Vereniging FME-CWM/december 2009, 4^e druk

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke ander wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Hoewel grote zorg is besteed aan de waarborging van een correcte en, waar nodig, volledige uiteenzetting van relevante informatie, wijzen de bij de totstandkoming van de onderhavige publicatie betrokkenen alle aansprakelijkheid voor schade als gevolg van onjuistheden en/of onvolkomenheden in deze publicatie van de hand.

Vereniging FME-CWM
afdeling Technologie & Innovatie
Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer
telefoon: 079 - 353 11 00
telefax: 079 - 353 13 65
e-mail: info@fme.nl
internet: www.fme.nl

Lassen van roest- en hittevast staal

toelichting:

Voor u ligt de nieuwe VM 42 - "Lassen van roest- en hittevast staal". De eerste uitgave van deze publicatie vond in 1962 plaats in de vorm van losse VM-bladen. In 1974 zijn deze bladen gebundeld tot een tweetal publicaties (VM 42 en 43) en in 1990 vond een samenvoeging plaats van deze twee publicaties tot een nieuwe VM 42.

De updating van deze publicatie was noodzakelijk, daar zich in de afgelopen jaren een groot aantal ontwikkelingen heeft voorgedaan op het gebied van deze techniek.

Het Materials Innovation Institute (M2i), voorheen opererend als het NIMR (Netherlands Institute of Metals Research) heeft geld ter beschikking gesteld om deze nieuwe publicatie te laten opstellen en aan te passen aan de stand der techniek. De FME heeft de coördinatie daarvan op zich genomen en voor de aanpassing van de inhoud van deze voorlichtingspublicatie het NIL ingeschakeld.

Op de websites www.dunneplaat-online.nl en www.verbinden-online.nl die in het kader van andere projecten zijn ontwikkeld, is op het gebied van dunne plaat bewerking en verbindingstechnieken een groot aantal publicaties vrij te downloaden (waaronder ook deze publicatie).

samenstelling werkgroep (2008/2009)

Karel Bekkers	v/h Lincoln Smitweld BV
Henk Bodt	Nederlands Instituut voor Lastetechniek (NIL)
Alfred Dhooge	Belgisch Instituut voor Lastetechniek (BIL)
Ger Vaessen	GVA
Leo Vermeulen	Nederlands Instituut voor Lastetechniek (NIL)
Pieter Wuisters	
Gerard van Wijngaarden	Metaalcompagnie Brabant BV (MCB)

samenstelling van de oorspronkelijke werkgroep (1990):

F. Aardoom	Sandvik Nederland B.V.
J.A. Bakker	Avesta B.V.
K. Bekkers	Smitweld B.V.
T. Blok	AGA Gas B.V.
P. Boers	Vereniging FME
L.H. de Bruin	Backer en Rueb Breda B.V. (Adv.)
F. Dijkstra	Röntgen Technische Dienst B.V.
C.F. Etienne	Metaalinstituut TNO, namens NIL
L. van Eijk	Houseman B.V.
D.R.J. Lafèbre	Hoek Loos
H.A. Meijer	Filarc Lastetechniek B.V.
M. Mol	AVAL Lasinstituut
C.P. Scheepens	Metaalinstituut TNO
D. van der Torre	Consultweld B.V.
A. de Visser (vz.)	Oud medewerker Smitweld B.V.

samengesteld door (2008/2009):

A. Gales	TNO Industrie en Techniek
Bijdrage aan hoofdstuk 9	geleverd door:
H. Bodt	Nederlands Instituut voor Lastetechniek (NIL)
F. Neessen	Lincoln Smitweld B.V.

eindredactie:

P. Boers	Vereniging FME-CWM
----------	--------------------

technische informatie:

Nederlands Instituut voor Lastetechniek

- bezoekadres	Boerhaavelaan 40, Zoetermeer
- correspondentie-adres	Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER
- telefoon	088 - 400 85 60
- telefax	079 - 353 11 78
- e-mail	info@nil.nl
- website	www.nil.nl

informatie over en bestelling van VM-publicaties, Praktijkaanbevelingen en Tech-Info bladen:

Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

- bezoekadres	Boerhaavelaan 40, Zoetermeer
- correspondentie-adres	Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER
- telefoon	079 - 353 11 00
- telefax	079 - 353 13 65
- e-mail	info@fme.nl
- website	www.fme.nl

Inhoudsopgave

	blz.		blz.
1 Algemene karakterisering van roest- en hittevast staal	6	6.4 TIG-lassen	51
1.1 Inleiding	6	6.4.1 Inleiding	51
1.2 Typen roestvast staal	7	6.4.2 Beschermgassen voor het TIG-lassen	52
2 Normering van basismateriaal en lastoevoegmateriaal	12	6.4.3 Backing- of formeergassen	52
2.1 Europese materiaalspecificaties	12	6.4.4 Elektroden	54
2.2 Amerikaanse materiaalspecificaties	12	6.4.5 Lasnaadvormen en lasparameters	54
2.3 Vergelijking van de materiaalaanduidingen volgens de verschillende normen	15	6.4.6 Voordelen en beperkingen van het TIG-lassen	54
2.4 Standaardkwaliteiten en staalsoorten met verbeterde gebruikseigenschappen	16	6.5 Plasmalassen	55
2.4.1 Standaardkwaliteiten	16	6.5.1 Inleiding	55
2.4.2 Staalsoorten met verbeterde gebruikseigenschappen	16	6.5.2 Plasma- en beschermgassen	55
3 Invloed van het lassen op enkele belangrijke materiaaleigenschappen	20	6.5.3 Indeling van het plasmalassen	55
3.1 Inleiding	20	6.5.4 Lasnaadvoorbewerking en lasparameters	57
3.2 Kans op plaatselijk versnelde corrosieve aantasting tengevolge van het lassen	20	6.5.5 Voordelen en beperkingen van het plasmalassen	57
3.2.1 Algemeen	20	6.6 Onder poeder lassen (OP-lassen)	58
3.2.2 Interkristallijne corrosie	20	6.6.1 Kenmerken van het onder poeder lassen	58
3.2.3 Knife-line attack	21	6.6.2 Invloed van het onder poeder lassen op de structuur	59
3.2.4 Spanningscorrosie	21	6.6.3 Lasnaadvormen en lasparameters	59
3.2.5 Putvormige corrosie	22	6.6.4 Voordelen en beperkingen van het onder poeder lassen	59
3.2.6 Spleetcorrosie	23	6.7 Weerstandlassen	60
3.2.7 Contactcorrosie	23	6.7.1 Geschiktheid van roestvast staal voor het weerstandlassen	61
3.2.8 Biologische corrosie (MIC)	24	6.7.2 Instelparameters voor het puntlassen	61
3.3 Scheurvorming en verbrossing tengevolge van het lassen	25	6.7.3 Praktische aanwijzingen voor het puntlassen	62
3.3.1 Warmscheuren	25	6.8 Elektronenbundel (EB)- en laserlassen	61
3.3.2 Verbrossing door sigma-fase	25	6.8.1 Principe van het elektronenbundellassen	62
3.3.3 "475 °C"-brosheid	26	6.8.2 Voordelen, beperkingen en toepassingen van het EB-lassen	62
3.3.4 Korrelgroei	26	6.8.3 Het laserlassen	62
3.3.5 Koudscheuren	26	6.8.4 Principe van het laserlassen	63
3.3.6 Scheurvorming en verbrossing als functie van het Cr- en Ni-equivalent	27	6.8.5 Voorbewerking en -behandeling	64
3.3.7 Problemen en oplossingsrichtingen bij het lassen van roestvaste staalsoorten	27	6.8.6 Typen lasers geschikt voor het lassen van roestvast staal	64
4 Precipitaten in roest- en hittevast staal	29	6.8.7 Voordelen en beperkingen laserlassen	64
4.1 Inleiding	29	6.8.8 Veiligheid	65
4.2 Carbiden en nitriden	29	6.9 Wrijvingslassen	66
4.2.1 Carbiden en nitriden in staal van het type 18Cr-10Ni-(Mo)	29	6.9.1 Conventioneel wrijvingslassen	66
4.3 Intermetallische fasen	29	6.9.2 Inertie wrijvingslassen	66
4.3.1 Sigma-fase (σ)	30	6.9.3 Toepassingen, voordelen en beperkingen	66
4.3.2 Andere intermetallische fasen	30	6.10 Explosielassen	66
4.3.3 Uitscheidingsdiagrammen	30	6.11 Richtlijnen voor het hechten en de lasvolgorde	67
5 Kenmerkende gegevens in verband met verwerking en toepassing van de meest gebruikte typen roestvast staal	32	6.11.1 Aanbevelingen voor het hechten	68
5.1 Algemeen	32	6.11.2 Aanbevelingen in verband met vervorming bij het lassen van roestvast staal	68
5.2 Austenitische Cr-Ni-staalsoorten	32	6.11.3 Aanbevelingen in verband met het lassen en hechten van roestvast staal	68
5.3 Ferritische en martensitische chroomstaalsoorten	35	6.12 Solderen van roestvast staal	68
5.3.1 Ferritische chroomstaalsoorten	35	6.12.1 Uitvoering soldeercyclus	69
5.3.2 Martensitische chroomstaalsoorten	36	6.12.2 Het solderen in ovens	69
5.4 Duplex roestvaste staalsoorten	37	6.12.3 Inductief solderen	69
6 Lasprocessen en naadvormen	39	6.12.4 Voorbehandeling van de oppervlakken	70
6.1 Algemeen	39	6.12.5 Soldeer, vloeimiddel en beschermende atmosfeer	70
6.1.1 Lasprocessen en hun toepassingen	39	6.13 Lijmen van roestvast staal	70
6.1.2 Voorbewerking en lasposities	39	6.14 Mechanisch verbinden van roestvast staal	72
6.1.3 Veiligheidsmaatregelen	41	7 Naadvoorbewerking	73
6.1.4 Koelstrippen, opspaninrichtingen, hechten	41	7.1 Inleiding	73
6.2 Booglassen met beklede elektrode (Bmbe)	42	7.2 Mechanisch (verspanend) voorbereiden	73
6.2.1 Keuze van het elektrodetype	42	7.2.1 Algemene karakterisering van de verspanbaarheid van roestvast staal	73
6.2.2 Lasuitvoering	44	7.2.2 Koel- en smeermiddelen	74
6.3 MAG-lassen	46	7.2.3 Karakterisering van verschillende verspanende voorbereidingen	74
6.3.1 Inleiding	46	7.3 Thermisch voorbereiden	75
6.3.2 De apparatuur	46	7.3.1 Algemeen	75
6.3.3 Druppelafsplijting	46	7.3.2 Plasmasnijden	75
6.3.4 Beschermgassen	48	7.3.3 Lasersnijden	76
6.3.5 Lastoevoegmaterialen	49		
6.3.6 Lasnaadvoorbewerkingen	50		
6.3.7 Lasparameters	50		

	blz.		blz.
8 Kenmerkende gegevens en het lassen van nieuwere typen roest- en hittevast staal	79	12 Kwalificatie, inspectie en onderzoek	101
8.1 Inleiding	79	12.1 Inleiding	101
8.2 Ferritische roestvaste staalsoorten	80	12.2 Lasmethodebeschrijving	101
8.3 Superferrieten	80	12.3 Lasserskwalificatie	103
8.4 Martensitische roestvaste staalsoorten	80	12.4 Lasoperatorkwalificatie	103
8.5 Austenitische roestvaste staalsoorten	80	12.5 Soldeerderkwalificatie en soldeerprocedure-kwalificatie	103
8.6 Superaustenitische roestvaste staalsoorten voor temperaturen tot ca. 350 °C	81	12.6 Lasmethodekwalificatie	103
8.7 Superaustenitische roestvaste staalsoorten voor temperaturen tot ca. 1000 °C	81	12.7 Productaansprakelijkheid	103
8.8 Roestvast staal met verhoogde sterkte (Ultra High Strength Stainless Steel)	82	12.8 Kwaliteitsborging	103
8.9 Duplex roestvaste staalsoorten	82	12.9 Kwaliteitsonderzoek ten behoeve van gelaste constructies	104
8.10 Geplateerd staal	84	12.9.1 Niet-destructief onderzoek (NDO)	104
8.10.1 Kenmerkende gegevens geplateerd staal	84	12.9.2 NDO onderzoek in relatie tot roestvast staal	104
8.10.2 Lassen van geplateerd staal	84	12.9.3 Destructief onderzoek	105
		12.9.4 DO onderzoek in relatie tot roestvast staal	105
9 Het lassen van ongelijksoortige materialen	87	13 Reparatie	106
9.1 Inleiding	87	13.1 Primaire overwegingen	106
9.2 Structuur en eigenschappen van Cr-Ni-lasmetaal	87	13.2 Lasonvolkomenheden	108
9.2.1 Algemeen	87	13.3 Opsporen onregelmatigheden in het lasproces	108
9.2.2 Structuur voorspellen	87	13.4 Voorbereiding reparatiewerkzaamheden	108
9.2.3 Schaeffler-diagram	87	13.5 Uitvoering	108
9.2.4 Nauwkeurigheid	88	13.6 Reparatie van in bedrijf geweest zijnde installaties	108
9.2.5 Het werk van de Welding Research Council (WRC)	88		
9.3 Verbindingslassen van RVS aan ongelegeerd of laaggelegeerd staal	90	14 Economische overwegingen bij het lassen en de verwerking van roestvast staal	109
9.3.1 Methode	90	14.1 Kostenindeling	109
9.3.2 Lasprocessen	90	14.1.1 Voorbewerkingskosten	109
9.3.3 Eigenschappen van Cr-Ni-lasmetaal	91	14.1.2 Loonkosten	109
9.4 Conclusie	91	14.1.3 Lasmateriaalkosten	109
		14.1.4 Apparatuurkosten	109
10 Warmtebehandelingen	93	14.1.5 Inschakelduur (I.D.)	109
10.1 Inleiding	93	14.1.6 Neersmeltsnelheid	109
10.2 Omschrijving warmtebehandelingen voor verschillende typen roestvast staal	93	14.1.7 Nabewerkingskosten bij roestvast staal	109
10.2.1 Austenitische roestvaste staalsoorten	93	14.2 Berekening van de laskosten	110
10.2.2 Ferritische roestvaste staalsoorten	94	14.3 Samenvatting ten aanzien van de laskosten	110
10.2.3 Martensitische roestvaste staalsoorten	95		
10.2.4 Precipitatiehardende roestvaste staalsoorten	96	15 Veiligheid en gezondheid	111
10.3 Aanbevolen warmtebehandelingen na het lassen van verschillende typen roestvast staal	96	15.1 Blootstelling aan elektromagnetische velden en straling	111
10.3.1 Spanningsarm gloeien van gelaste verbindingen in austenitisch roestvast staal	96	15.2 Stroomdoorgang door het lichaam	111
10.3.2 Spanningsarm gloeien van gelaste verbindingen in martensitisch 12%Cr-staal	96	15.3 Blootstelling aan geluid	112
10.3.3 Spanningsarm gloeien van gelaste verbindingen in ferritisch roestvast staal	96	15.4 Lasrook	112
10.4 Praktische wenken bij het uitvoeren van de warmtebehandelingen	96	15.4.1 Ontstaan van gassen en lasrook	112
		15.4.2 Het meten van lasrookconcentraties	113
11 Nabehandelingen	97	15.4.3 Blootstelling beperkende maatregelen	113
11.1 Inleiding	97	15.4.4 Actueel	113
11.2 Verwijderen van ongewenste oxidelagen	97	16 Normen m.b.t. roestvast staal	115
11.2.1 Oxiden die ontstaan door plaatselijke verhitting tengevolge van het lassen	97	17 Internetverwijzingen en literatuur	116
11.2.2 Oxiden die ontstaan bij een warmtebehandeling in een oven boven 700 °C	97		
11.3 Stralen, beitsen en passiveren van roestvast staal	97		
11.3.1 Stralen	97		
11.3.2 Beitsen	98		
11.3.3 Passiveren	100		
11.4 Controleren van het oppervlak na de verschillende bewerkingsprocessen	100		

Hoofdstuk 1

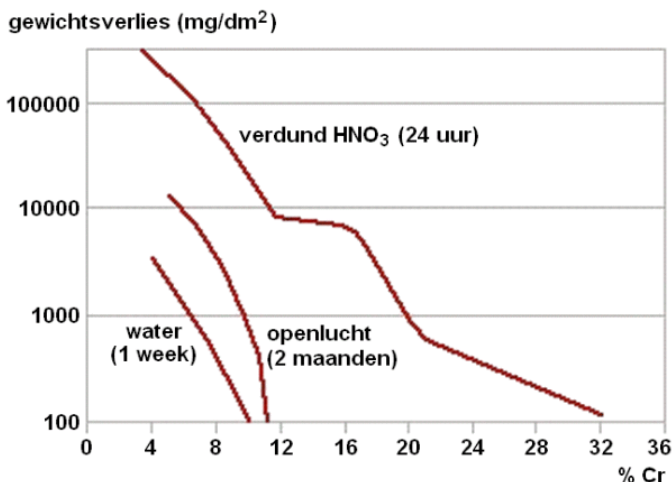
Algemene karakterisering van roest- en hittevast staal

1.1 Inleiding

Door corrosie gaan jaarlijks enorme hoeveelheden staal verloren. In veel situaties is het beschermen van staal door middel van galvanische deklagen, verf of andere middelen geen praktische oplossing of esthetisch niet gewenst. Om hier wat aan te doen, zijn er in de loop der jaren verschillende legeringen ontwikkeld, die aan de buitenlucht in een bepaald corrosief milieu, of bij hoge temperatuur, corrosievast zijn. Veruit de belangrijkste groep metalen vormen de roestvaste staalsoorten.

Vele soorten roestvast¹⁾ staal zijn ontwikkeld in de achterliggende jaren en regelmatig komen er nieuwe soorten bij. Roestvast staal is de verzamelnaam van staalsoorten, waaraan legeringselementen zijn toegevoegd die ervoor zorgen dat het materiaal tijdens het gebruik niet faalt door corrosie. Een probleem is dat er niet "één milieu" is en er dus ook niet kan worden volstaan met één type roestvast staal.

De enorme variatie in omstandigheden in onze technologische maatschappij maakt dat er door de jaren heen vele roestvaste staalsoorten zijn ontwikkeld, met elk hun specifieke voor- en nadelen. Het is aan de gebruiker/construcent de roestvaste staalsoort te kiezen die voor zijn toepassing het meest geschikt is. In vrijwel alle gevallen is het noodzakelijk hierbij concessies te doen, omdat door legeren specifieke eigenschappen (bijvoorbeeld corrosievastheid en sterkte) zullen verbeteren ten koste van andere eigenschappen zoals de verspaanbaarheid of lasbaarheid. Het belangrijkste legeringselement om roestvast staal corrosiebestendig te maken is chroom. Dit is goed te zien in figuur 1.1, waar de relatie tussen het gewichtsverlies tengevolge van corrosie van roestvast staal is uitgezet tegen het percentage chroom in het materiaal bij expositie in verschillende milieus.



figuur 1.1 Gewichtsverlies tengevolge van corrosie van roestvast staal uitgezet tegen het percentage chroom in het materiaal voor verschillende milieus [1]

Het chroomgehalte in corrosievaste staalsoorten moet ten minste 12% zijn, waarbij het koolstofgehalte maximaal 1,2% mag bedragen. Dit is het minimum percentage chroom, waarbij onder optimale condities (glad oppervlak) een zeer dunne, afsluitende chroomoxidelaag kan worden

gevormd. Een belangrijk voordeel van deze uiterst dunne chroomoxidelaag is, dat deze zelf herstellend is bij beschadigingen.

Chroom is echter niet het enige legeringselement waarmee roestvast staal gelegeerd wordt, ook andere legeringselementen, waaronder nikkel, molybdeen, stikstof, titaan en niobium, worden gebruikt om de eigenschappen van het roestvast staal te veranderen.

In de praktijk worden roestvast staal en weervast staal onterecht nog wel eens door elkaar gehaald. Weervast staal is staal waaraan koper en fosfor is toegevoegd om het geschikt te maken voor "buiten"gebruik. Over het algemeen zijn weervaste stalen slecht corrosiebestendig onder wat agressievere klimaatsomstandigheden (zee/industrie). Een bekende representant van weervast staal is COR-TEN staal; veel stalen schoorstenen worden hiervan gemaakt.

Het zou te ver voeren om de hele geschiedenis van de ontstaanswijze van roestvast staal te beschrijven. De ontwikkeling begint echter in 1797 toen het metaal chroom door Vauquelin werd vrijgemaakt. De eerste publicaties van ijzer-chroomlegeringen dateren uit 1820. In 1908 werd door de Krupp Stahl Werke in Duitsland een chroomnikkelstaal voor de romp van een Duits jacht ontwikkeld.

Het jacht werd onder de naam "De Halve Maan" (zie figuur 1.2) te water gelaten en heeft een rijke geschiedenis gekend die geëindigd is als vele schepen ergens op de zeebodem, waarschijnlijk voor de oostkust van Florida. Of het schip het (door Krupp geclaimde) minimale gehalte van 12% chroom bevatte is tot op de dag van vandaag nog onduidelijk.



figuur 1.2 De Halve Maan gemaakt van roestvast staal in 1908 door Krupp Stahl Werke [3]

Pas na 1918 is de ontwikkeling voor de praktische toepassing van roestvast staal op industriële schaal doorgezet. Als gevolg van nieuwe smeltmethoden en nieuwe toepassingsgebieden, is in de achterliggende jaren een groot aantal verschillende typen ontwikkeld.

1) De nog wel eens gebruikte term roestvrij staal klopt niet helemaal. Uit de praktijk weten we dat dit staal onder bepaalde omstandigheden wel degelijk kan roesten. Vandaar dat er tegenwoordig de voorkeur aan wordt gegeven te spreken van roestvast staal.

Omdat er in de loop der jaren zowel roest- als hittevaste staalsoorten zijn ontwikkeld, worden dit type staalsoorten logischerwijs ook wel aangeduid als "Roest- en hittevaste staalsoorten". Roest- en hittevaste staalsoorten bestaan in alle gevallen uit ijzer met chroom en andere elementen die een relatief grote bestendigheid bezitten tegen oxidatie en/of oxidatie bij hoge temperaturen (hittebestendigheid).

1.2 Typen roestvast staal

Kenmerkend voor de verschillende staaltypen zijn de chemische samenstelling enerzijds en de structuur anderzijds. Tabel 1.1 geeft een overzicht van de legeringselementen die in roest- en hittevast staal kunnen worden aangetroffen.

tabel 1.1 Overzicht van de legeringselementen waarmee roest- en hittevast staal kan worden gelegeerd

element	symbool	austenietvormer
aluminium	Al	
cerium	Ce	
chroom	Cr	
kobalt	Co	ja
koolstof	C	ja
koper	Cu	ja
mangaan	Mn	ja
molybdeen	Mo	
nikkel	Ni	ja
niobium	Nb	
selenium	Se	
silicium	Si	
stikstof	N	ja
titaan	Ti	
zwavel	S	

Het toevoegen van de verschillende combinaties van legeringselementen zorgt voor kenmerkende basisstructuren in de verschillende roest- en hittevaste staallegeringen.

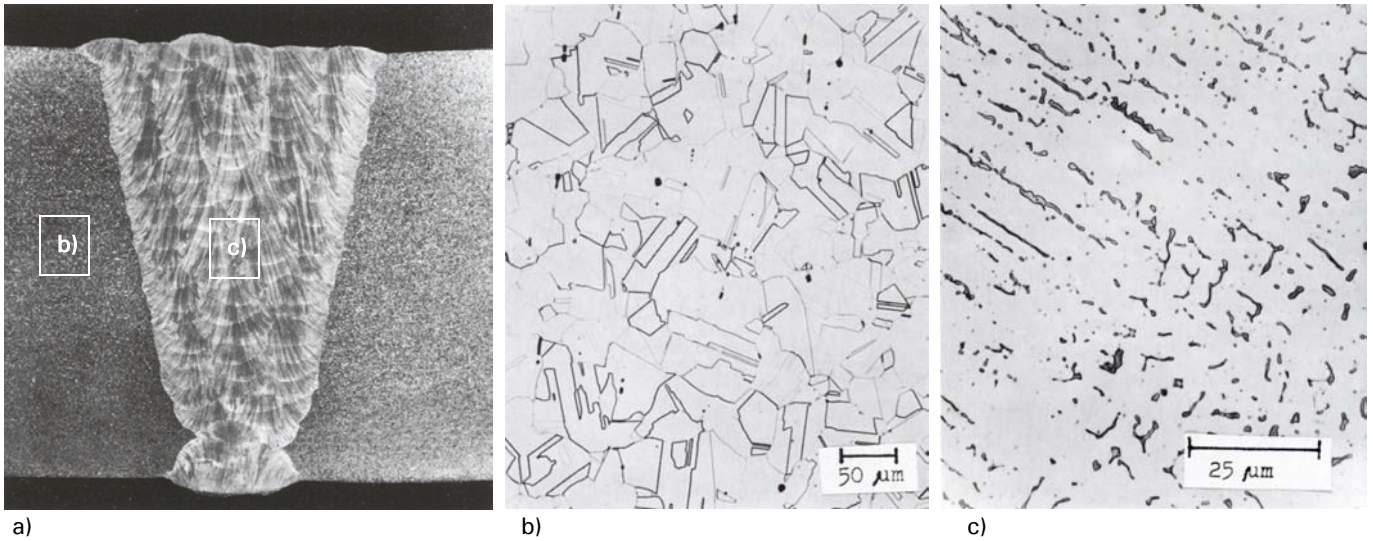
Uiteraard heeft hier niet alleen het soort legeringselement dat toegevoegd wordt invloed op, maar ook de hoeveelheid en de onderlinge verhoudingen van de legeringselementen. Zodra er aan roest- en hittevaste staalsoorten wordt gelast, neemt de complexiteit van de structuren toe tengevolge van het gebruik van lastoevoegmaterialen (opmenging) en wisselende afkoelsnelheden. De figuren 1.3 t/m 1.5 tonen duidelijk voor een aantal roestvaste staalsoorten hoe sterk de structuren beïnvloed kunnen worden door het lassen.

Kenmerkend voor de verschillende kwaliteiten van roestvast staal is de structuur. Het is niet voor niets dat hier ook de indeling van roestvast staal op is gebaseerd. De structuur is een gevolg van de chemische samenstelling van het materiaal.

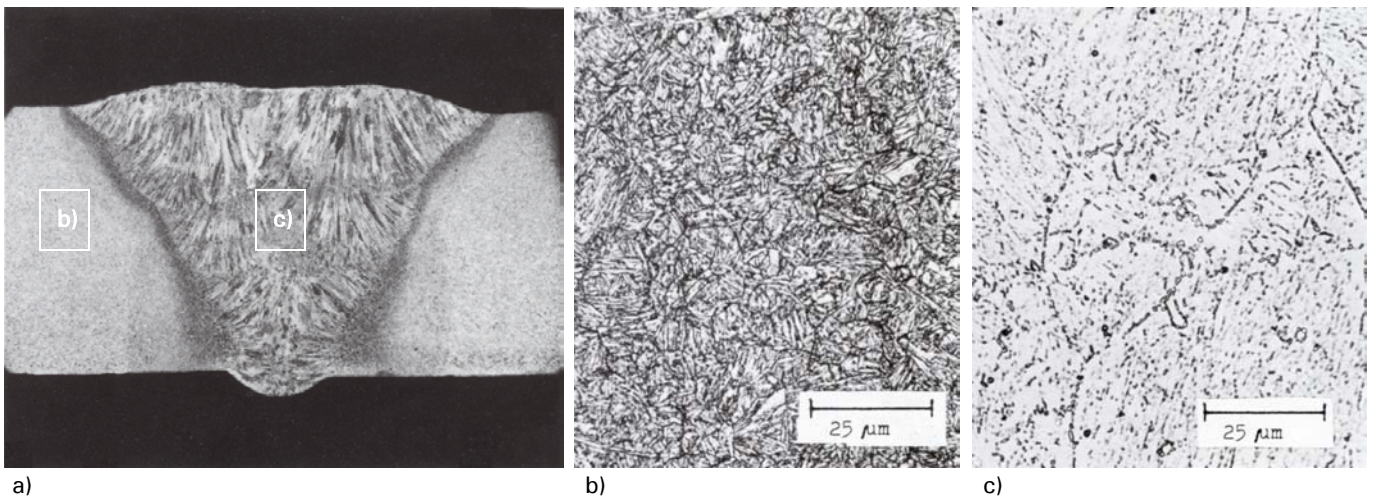
Naast het al eerder genoemde chroom en koolstof wordt roestvast staal met vele andere elementen gelegeerd, elk element heeft hierbij zijn specifieke functie (zie tabel 1.2).

Structuren als ferriet en austeniet kunnen ontstaan bij het stollen van het materiaal. Zij kunnen echter ook worden gevormd bij structuurveranderingen tengevolge van een warmtebehandeling, door laswarmte of bij gebruik op hoge temperatuur. De eigenschappen van deze structuren kunnen verder aanzienlijk worden beïnvloed door een kouddeformatie. Naar gelang de aard van de aanwezige structuren kan onderscheid worden gemaakt tussen ferritische-, martensitische-, austenitische- en austenitische-/ferritische (= duplex) staalsoorten (zie tabel 1.3).

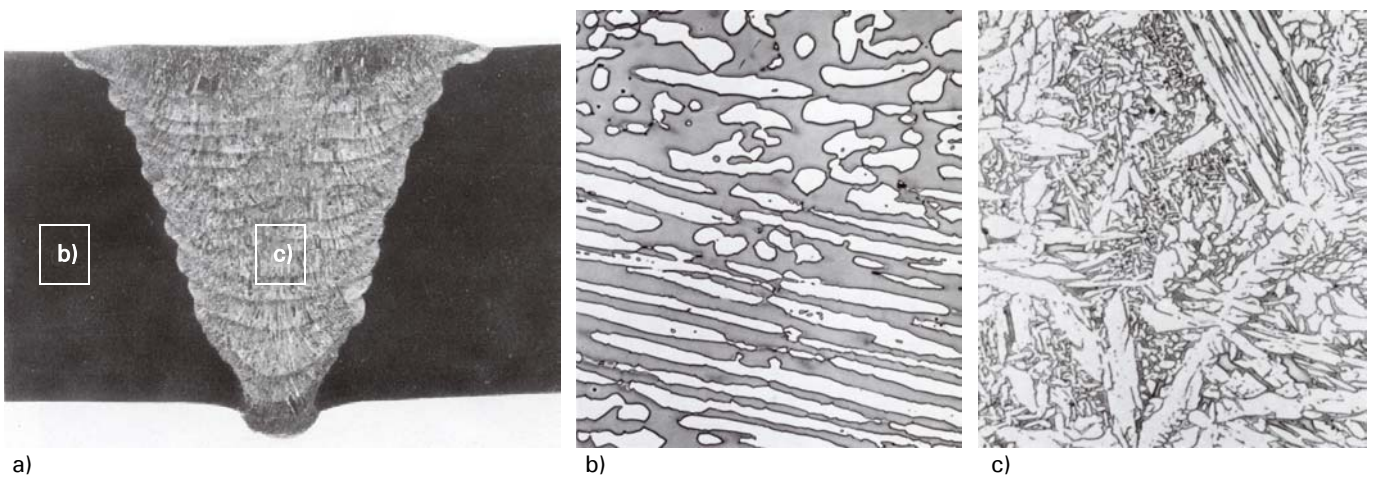
Voordat wordt overgegaan naar de hoofdstukken waarin meer in detail wordt ingegaan op het wezen van roestvast staal en het lassen hiervan, is in figuur 1.6 een algemene opzet van deze VM-publicatie weergegeven. Deze figuur fungeert als grove wegwijzer voor deze VM-publicatie. Een meer gedetailleerd overzicht van de onderwerpen per hoofdstuk vindt u in de inhoudsopgave.



figuur 1.3 Lasverbinding in 50 mm plaat van type 316 roestvast staal (a); dwarsdoorsnede bij volledig austenitisch basismateriaal (b); type 316 lasmateriaal met enige procenten ferriet in austeniet (c)



figuur 1.4 Lasverbinding in 15 mm plaat van 12% Cr-staal (a); ontlaten martensietstructuur in basismateriaal (b); ontlaten martensietstructuur in 12% Cr-lasmateriaal (c)



figuur 1.5 Lasverbinding in Ø6"-pijp van 1.4462 duplex roestvast staal (a); microstructuur basismateriaal (donkere fase = ferriet, lichte fase = austeniet) (b); microstructuur lasmetaal (c)

tabel 1.2 Belangrijkste eigenschappen van een aantal legeringselementen die aan roestvast staal toegevoegd kunnen worden

legeringselement	belangrijke functie
chromium	Bij een chroomgehalte van 12% en hoger wordt een beschermende oxidehuid gevormd. Daardoor heeft roestvast staal de eigenschap bestand ("passief") te zijn tegen oxiderende milieus. Roest- en hittevaste staalsoorten bevatten daarom minimaal 12% Cr. Chroom verbetert ook de weerstand tegen oxidatie bij hoge temperatuur. Chroom is een ferrietvormer.
nikkel	8% Nikkel is in combinatie met ca. 18% chroom voldoende om de austeniet structuur bij kamertemperatuur te behouden. Ten opzichte van ferritische kwaliteiten worden de austenitische roestvaste stalen gekenmerkt door een slechtere verspaanbaarheid en dieptrekbaarheid; daarentegen door een betere strekbaarheid, buigbaarheid en lasbaarheid. De sterkte bij hoge temperaturen neemt eveneens toe evenals de taaiheid bij lage temperaturen. De lasbaarheid verbetert (t.o.v. chroomstaal) terwijl de uitzettingscoëfficiënt toeneemt en het warmtegeleidingsvermogen afneemt. De austenitische structuur van het roestvast staal zorgt ervoor dat dit niet ferromagnetisch is. Nikkel is een belangrijke austenietvormer.
koolstof	Koolstof heeft zowel positieve als negatieve effecten afhankelijk van het type roestvast staal en de toepassing. Zo is koolstof in hardbare roestvaste stalen een onmisbaar element. In corrosievaste stalen, dus goede weerstand tegen corrosie bij lage temperaturen, kan koolstof storend werken omdat de corrosiebestendigheid afneemt vanwege de vorming van allerlei carbiden die kunnen ontstaan bij hoge temperaturen. Koolstof kan er ook voor zorgen dat de kans op verbrossing toeneemt, in hittevaste kwaliteiten daarentegen verhoogt koolstof met name de kruipsterkte. Koolstof bevordert de austenietvorming, werkt sterkteverhogend, maar boven bepaalde hoeveelheden verlaagt koolstof de lasbaarheid.
silicium	Silicium wordt hoofdzakelijk toegepast om de eigenschappen bij hoge temperatuur te verbeteren (verbeterde weerstand tegen oxidatie).
molybdeen	Molybdeen bevordert de passiviteit van roestvast staal en hiermee dus de corrosievastheid. Molybdeen wordt vooral toegevoegd aan ferritisch, austenitisch, martensitisch en duplex roestvast staal om de corrosieweerstand in halogeenhoudende (chloridehoudende) milieus te verhogen. Molybdeen verlaagt echter de corrosievastheid in sommige sterk oxiderende milieus zoals salpeterzuur. Molybdeen verbetert ook de kruipvastheid.
titaan en niobium	Titaan en niobium stabiliseren roestvast staal, omdat zij het overschot aan onoplosbaar koolstof binden, waardoor het risico voor interkristallijne corrosie sterk afneemt. De affiniteit van koolstof t.o.v. titaan is namelijk groter dan die t.o.v. chroom, waardoor de kans gering is dat er ongewenste chroomcarbiden worden gevormd. Op deze wijze wordt interkristallijne corrosie tegengegaan. Niobium doet hetzelfde maar het nadeel van niobium is, dat het de gevoeligheid voor warmscheuren vergroot. Roestvast staal dat met titaan is gestabiliseerd, heeft de kans om indien in meerdere lagen gelast wordt, aangetast te worden net naast de las ('knife line attack'). Titaancarbiden kunnen aanleiding geven tot putcorrosie vanwege oppervlakte-defecten. Titaan houdende legeringen hebben een slechte polijstbaarheid, omdat de titaancarbiden tijdens het polijsten uitbreken. Tevens neemt de verspaanbaarheid af door een grotere beitel-slijtage. Gezien deze negatieve effecten van titaan kan in veel gevallen beter worden gekozen voor de zogenaamde "L" typen, die eveneens een uitstekende weerstand tegen interkristallijne corrosie kennen. Een voordeel van titaan en niobium is, dat de mechanische eigenschappen iets worden verbeterd.
aluminium	Aluminium verbetert vooral de oxidatievastheid.
koper	Koper verbetert de corrosievastheid in bepaalde milieus (zuren). Roestvast staal wordt wel met 3 tot 4% koper gelegeerd om het beter bestand te maken tegen zwavel- en fosforzuur. Koper kan onder specifieke omstandigheden ook leiden tot precipitatieharding.
selenium	Selenium worden soms toegevoegd om de verspaanbaarheid te verbeteren. De lasbaarheid neemt dan echter af door de kans op warmscheuren. Kwaliteiten met Se toevoegingen zijn echter nog niet als "standaard" leverbaar.
mangaan	Mangaan bevordert de vervormingseigenschappen van het roestvast staal bij hoge temperaturen. Mangaan verbetert tevens de mechanische eigenschappen en onderdrukt de warmstoeuerveiligheid. Mangaan is een austenietvormer en kan dienen als (goedkopere) vervanger voor nikkel.
stikstof	Stikstof is een sterke austenietvormer en verhoogt de rekgrens en de kruipsterkte. Mangaan wordt in alle roestvaste staalsoorten toegevoegd om de oplosbaarheid van stikstof te verlagen. Door stikstof neemt de sterkte van austenitisch roestvast staal toe en beïnvloedt de structuur op dezelfde wijze zoals nikkel dat doet. In zekere mate kan het zelfs nikkel vervangen, mits de structuur austenitisch is. In de praktijk blijkt ook dat bij vele soorten roestvast staal de aanwezigheid van stikstof een betere weerstand biedt tegen putcorrosie.
kobalt	Kobalt wordt in hoog-hittevaste legeringen toegepast om de kruipsterkte te verhogen.
cerium	Cerium en andere zeldzame aardmetalen werken korrelverfijndend en verbeteren de hechting van de oxidehuid bij hoge temperatuuroepassingen. De korrelverfijning zorgt ervoor dat het ontstaan van warmstoeuerveiligheid tijdens het lassen wordt onderdrukt.
zwavel	Zwavel ondermijnt de corrosiebestendigheid en de lasbaarheid van het roestvast staal en daarom streeft men ernaar om het zwavelgehalte het liefst zo laag mogelijk te houden. Zwavelhoudend roestvast staalsoorten kunnen worden verdeeld in twee kwaliteiten te weten: kwaliteiten met <0,035% S en de automatenkwaliteiten met 0,15 tot 0,35% S. Dankzij moderne smelttechnieken is het mogelijk geworden om het zwavelgehalte te beperken tot 0,001 à 0,002% terwijl volgens de norm veelal 0,03% is toegestaan. Toch heeft dit lage zwavelgehalte een keerzijde, omdat dit een direct gevolg heeft op de oppervlaktetensioning van het roestvast staal. Dit kan consequenties hebben voor het lassen en vooral voor het smeltbad tijdens het doorlassen. Laag-zwavelhoudende roestvaste stalen kunnen om deze reden problemen geven bij het maken van een goede doorlassing. Zwavel bevordert de verspaanbaarheid, dus ook hier is attentie geboden als het zwavelgehalte (te) laag is. Om deze reden wordt wel een zwavelgehalte van minimaal 0,015% geadviseerd door leveranciers. Zwavel zorgt voor 'sigaarvormige' deeltjes in de matrix, die ervoor zorgen dat de gevormde bewerkingsspaan snel afbreekt. Roestvaste staalsoorten met een hoog zwavelgehalte zijn niet goed meer te lassen met de meest gangbare lasprocessen (soms lukt het nog wel door middel van booglassen beklede basische elektroden).

tabel 1.3 Indeling van roest en hittevast staal op basis van de structuur

roestvaste staalsoorten	kenmerken
austenitisch roestvast staal	Austenitisch roestvast staal bevat naast chroom (17-25%) een aanzienlijke hoeveelheid nikkel (7-25%). Het chroom verleent ook hier het staal de corrosieweerstand, terwijl nikkel (en mangaan) belangrijk zijn voor het ontstaan van de austenitische structuur. Ten opzichte van ferritische kwaliteiten worden de austenitische roestvaste stalen gekenmerkt door een slechtere verspaanbaarheid en dieptrekbaarheid; daarentegen door een betere strekbaarheid, buigbaarheid en lasbaarheid. Afhankelijk van de chemische samenstelling bestaat de structuur volledig uit austeniet of uit austeniet met enige procenten ferriet. Het koolstofgehalte is laag (0,06 %) en ligt in veel gevallen zelfs onder de 0,03% om gevaar voor interkristallijne corrosie zoveel mogelijk te beperken. Austenitische zijn evenals ferritische roestvaste staalsoorten niet hardbaar door een warmtebehandeling (geen martensietvorming), maar kunnen wel een hogere sterkte verkrijgen door kouddeformatie. In tegenstelling tot ferritische soorten behouden ze hun taaheid bij lage temperatuur. Ze worden daarom ook regelmatig voor cryogene toepassingen ingezet. Andere kenmerken zijn: ze zijn niet of vrijwel niet ferromagnetisch, ze hebben een lage rekgrens, een grote thermische uitzetting en een slechte warmtegeleiding. Austenitische roestvaste staalsoorten worden verreweg het meeste gebruik binnen de industrie.
ferritisch roestvast staal	Ferritisch roestvast staal bevat 13-30% chroom, molybdeen, een beperkte hoeveelheid koolstof (max. 0,12%) en weinig of geen nikkel. Ferritisch roestvast staal heeft een ferriet structuur, waarin geen fase-overgang optreedt bij verhoging van de temperatuur. Het staal is daarom niet hardbaar door martensietvorming. Ferritisch staal heeft mechanische eigenschappen die vergelijkbaar zijn met ongelegeerd staal maar uiteraard met een hogere corrosievastheid. De ferritische roestvaste staalsoorten met een laag chroomgehalte (12%) worden veelal voor structurele toepassing gebruikt, terwijl de ferritische roestvaste staalsoorten met hogere chroomgehalten (> 17%) gebruikt worden voor huishoudelijke toepassingen, waaronder trommels van wasmachines en voor bouwkundige toepassingen (binnen). Een warmtebehandeling om de sterkte te verhogen heeft geen zin, omdat er geen structuurumzettingen in het materiaal plaatsvinden.
martensitisch roestvast staal	Martensitisch roestvast staal bevat 12-18% chroom en in de regel geen nikkel, maar heeft een relatief hoog koolstofgehalte. Daardoor wordt het staal bij hoge temperatuur austenitisch, zodat bij snelle afkoeling martensiet ontstaat. Deze staalsoorten zijn dus uitstekend hardbaar, waardoor ze hard, sterk en slijtvast worden. De martensitische roestvaste staalsoorten worden meestal in de geharde/ontlaten toestand geleverd. Ze hebben over het algemeen een gemiddelde weerstand tegen corrosieve milieus. Toepassingen betreffen de combinatie van slijtvastheid en corrosievastheid van onder andere turbinebladen, medische instrumenten, matrijzen en messen. "Super" martensitische roestvaste staalsoorten zijn een ontwikkeling van de laatste 10 jaar. Ze zijn voornamelijk ontwikkeld ten behoeve van de olie- en gaswinningsindustrie. Pipen voor transport van olie en gas vanaf de boorput naar bijvoorbeeld de wal worden in dit materiaal vervaardigd. Dit staal kenmerkt zich door haar hoge rekgrens en sterkte gekoppeld aan een redelijke corrosievastheid. De lasbaarheid van de nieuwere typen "supermartensitisch" roestvast staal is excellent door het lage koolstofgehalte ($C < 0,015\%$).
duplex roestvast staal	Duplex roestvast staal behoort tot de klasse Fe-Cr-Ni-legeringen die veelal een structuur hebben van ca. 50% austeniet en 50% ferriet. Lange tijd werd duplex staal in de industrie weinig gebruikt. Met de opkomst van speciale smelttechnieken werd het mogelijk deze staalsoorten economisch te vervaardigen. Duplex roestvaste staalsoorten verenigen een aantal eigenschappen in zich die we niet tegenkomen in ferritisch of austenitisch roestvast staal. Voor sommige typen (1.4410, 1.4462) geldt een hoge corrosievastheid ten opzichte van de gangbare austenitische roestvaste staalsoorten (1.4301, 1.4401), vooral de weerstand tegen pitting en spanningscorrosie maakt duplex roestvast staal tot een interessant materiaal. Duplex roestvast staal is niet hardbaar door middel van een warmtebehandeling, maar wel door middel van koudvervormen. Voor sommige toepassingen moet men ermee rekening houden dat duplex roestvast staal ferromagnetisch is. Duplex is twee maal zo sterk als austenitisch roestvast staal en minder gevoelig voor chloride spanningscorrosie dan bijvoorbeeld 1.4404. Duplex stalen bevatten als hoofdlegeringselementen chroom (21-28%), nikkel (4-10%) en 1,5 tot 4% molybdeen. Aan moderne duplex roestvaste staalsoorten wordt stikstof toegevoegd om de sterkte en weerstand tegen pittingscorrosie te verhogen, terwijl wolfram soms wordt toegevoegd om de corrosiebestendigheid in zeewater te verbeteren. Ten opzichte van de traditionele austenitische roestvaste staalsoorten hebben de duplex roestvaste staalsoorten vaak een veel hogere rekgrens. Dankzij deze sterkte-eigenschappen vormen duplex roestvaste staalsoorten een uitstekend alternatief voor geplaatst staal en voor dikwandige roestvaststalen constructies uitgevoerd in de standaardkwaliteiten. Opgemerkt moet echter worden dat door ondeskundig lassen de verbeterde corrosie-eigenschappen van deze staalsoorten weer teniet kunnen worden gedaan. Een beperking van duplex roestvast staal is dat het slechts tot maximaal 250 °C kan worden toegepast. Door de scherpe stijging van de nikkel- en molybdeen prijzen zijn roestvaststaal producenten gaan zoeken naar alternatieven voor nikkel en molybdeen. Nikkel kan tot zekere hoogte worden vervangen door stikstof en mangaan. Molybdeen kan tot zekere hoogte vervangen worden door chroom en wolfram. Dit heeft geleid tot de ontwikkeling van zogenaamde lean duplex roestvaste staalsoorten.



figuur 1.6 Algemene wegwijzer voor deze VM-publicatie

Hoofdstuk 2

Normering van basismateriaal en lastoevoegmateriaal

2.1 Europese materiaalspecificaties

Door de grote verscheidenheid aan eisen, die in de praktijk aan roest- en hittevast staal worden gesteld, kan, met betrekking tot de fysische en chemische eigenschappen ervan, niet met een enkele soort worden volstaan. De talrijke soorten zijn echter niet uitsluitend een noodzaak uit oogpunt van toepassingsgebied, maar mede een gevolg van onderzoeken, waarbij is getracht langs verschillende wegen het beoogde doel te bereiken; namelijk verbeterde gebruiksen verwerkingsmogelijkheden. De diverse soorten materialen zijn in de verschillende landen genormeerd. Dit geldt voor de "basismaterialen", maar ook uiteraard voor "lastoevoegmaterialen". De ontwikkeling hiervan liep vaak parallel aan die van het wals- en smeedstaal met het doel lasverbindingen te realiseren met vergelijkbare eigenschappen als het basismateriaal.

Ten aanzien van het aanduiden van de roestvaste staalsoorten is binnen Europa, de Europese norm EN 10.088 de standaard. Deze norm is in Nederland verkrijgbaar als NEN-EN 10.088. De meest recente versie van deze norm dateert uit 2005 en is in het Nederlands beschikbaar onder de aanduiding NEN-EN 10.088 1 t/m 3:2005 nl:

- Roestvaste staalsoorten - Deel 1: Lijst van roestvaste staalsoorten.
- Roestvaste staalsoorten - Deel 2: Technische leveringsvoorwaarden voor plaat en band van corrosievaste staalsoorten voor algemeen gebruik.
- Roestvaste staalsoorten - Deel 3: Technische leveringsvoorwaarden voor halfproducten, staven, draad, walsdraad, profielen en blanke producten van corrosievaste staalsoorten voor algemeen gebruik.

Als ontwerp norm (2005, in het Engels, Frans en Duits) zijn momenteel (2007) beschikbaar:

- NEN-EN 10088-4:2005 Ontw.
Roestvaste staalsoorten - Deel 4: Technische leveringsvoorwaarden voor plaat en band van corrosievast staal voor constructief gebruik.
- NEN-EN 10088-5:2005 Ontw.
Roestvast staal - Deel 5: Technische leveringsvoorwaar-

den voor staven, draad, profielen en producten van corrosievast blank staal voor constructie doeleinden.

Het is niet mogelijk alle verschillende roestvaste staalsoorten op te nemen in deze publicatie, hiervoor is de lijst eenvoudigweg te uitgebreid. Er is om die reden een selectie gemaakt ten aanzien van de meest gebruikte roestvaste staalsoorten, waarbij een mix gemaakt is van de meest gangbare roestvaste staalsoorten en nieuwere roestvaste staalsoorten. Als leidraad is hierbij gebruik gemaakt van de overzichtlijsten die opgesteld zijn door Euro-Inox (The European Stainless Steel Development Association, Materials and Applications Series, Volume 5: Stainless steel: Tables of Technical Properties). De tabellen 2.1 t/m 2.4 van deze VM-publicatie geven een overzicht van de meest gebruikte roestvaste staalsoorten uit de groepen: ferritisch, austenitisch, martensitisch en duplex. De tabellen geven een overzicht van de aanduiding, chemische samenstelling en belangrijkste mechanische eigenschappen.

Door veel bedrijven in Nederland wordt in de dagelijkse praktijk nog vaak gewerkt met de Amerikaanse aanduidingen gebaseerd op de AISI/ASTM aanduidingen. De Amerikaanse normen laten vaak ruimere specificaties toe. Omdat de verwachting is dat deze aanduidingen binnen Nederland nog veelvuldig in gebruik zullen blijven, wordt in § 2.2 een korte toelichting gegeven op de Amerikaanse groepsindeling van roestvast staal.

2.2 Amerikaanse materiaalspecificaties

De AISI/ASTM-aanduidingen voor roestvast staal kennen drie groepen:

- de AISI 200-groep: chroom-nikkel-mangaanstaal;
- de AISI 300-groep: chroom-nikkelstaal;
- de AISI 400-groep: chroomstaal.

De AISI 200- en de AISI 300-groep zijn austenitische en duplex staalsoorten. De AISI 400-groep omvat de martensitische en ferritische soorten. De grens tussen ferritische en martensitische samenstellingen is niet altijd duidelijk aan te geven, omdat deze ook afhankelijk is van de warmtebehandeling die het materiaal heeft ondergaan. De soorten met een laag C- en Ni-gehalte en meer dan 16% Cr zijn in het algemeen volledig ferritisch. De Amerikaanse materiaal-specificaties volgens de AISI kennen vaak ruimere specificaties. In de tabellen 2.1 t/m 2.5 zijn eveneens de coderingen volgens de AISI/ASTM/UNS²⁾ opgenomen.

tabel 2.1a Ferritisch roestvast staal, aanduiding en chemische samenstelling [5], [6]

structuur/type	NEN-EN 10088-1:2005		AISI/ ASTM/ UNS	C	Si	Mn	P _{max}	S	N	Cr	Mo	Ni	overig
	symbool	materiaalnummer		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
ferriet/ferritisch roestvast staal	X2CrNi12	1.4003	–	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 1,50	0,40	≤ 0,015	≤ 0,030	10,50-12,50	–	0,30-1,00	–
	X7CrAl13	1.4002	405	≤ 0,08	≤ 1,00	≤ 1,00	0,40	≤ 0,015	–	12,00-14,00	–	–	Al:0,10-0,30
	X6Cr17	1.4016	430	≤ 0,08	≤ 0,70	≤ 1,50	0,40	≤ 0,015	–	10,50-12,50	–	0,50-1,50	Ti:0,05-0,35
	X3CrTi17	1.4510	439	≤ 0,05	≤ 1,00	≤ 1,00	0,40	≤ 0,015	–	16,00-18,00	–	–	Ti:4x(C+N)+0,15 tot 0,80
	X2CrTi12	1.4512	409	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 1,00	0,40	≤ 0,015	–	10,50-12,50	–	–	Ti:6x(C+N) tot 0,65
	X2CrMoTi18-2	1.4521	444	≤ 0,025	≤ 1,00	≤ 1,00	0,40	≤ 0,015	≤ 0,030	17,00-20,00	1,80-2,50	–	Ti:4x(C+N)+0,15 tot 0,80

tabel 2.1b Ferritisch roestvast staal, belangrijkste mechanische eigenschappen [5], [6]

structuur/type	NEN-EN 10088-1:2005		AISI/ ASTM/ UNS	hardheid		0,2% reksgrens (R _{p0,2}) [MPa] (min)	treksterkte (R _m) [MPa]	rek [%] (min)	kerfslagwaarde J (min)	
	symbool	materiaalnummer		HRB (max)	HB of HV (max)				walsrichting	dwars op walsrichting
ferriet/ferritisch roestvast staal	X2CrNi12	1.4003	–	89	183	280-320	450-650	18-20	100	–
	X7CrAl13	1.4002	405	75	150	230-250	400-600	17	–	–
	X6Cr17	1.4016	430	–	–	260-280	450-650	20-23	150	150
	X3CrTi17	1.4510	439	89	183	230-240	420-600	23	–	–
	X2CrTi12	1.4512	409	75	–	210-220	380-500	25	–	–
	X2CrMoTi18-2	1.4521	444	96	217	300-320	420-620	20	–	–

2) ► AISI - American Iron and Steel Institute
 ► ASME - American Society of Mechanical Engineers
 ► UNS - Unified Numbering System

tabel 2.2a Austenitisch roestvast staal, aanduiding en chemische samenstelling [5], [6]

structuur/type	NEN-EN 10088-1:2005		AISI/ ASTM/ UNS	C	Si	Mn	P _{max}	S	N	Cr	Mo	Ni	overig
	symbool	materiaalnr		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
austeniet/ austenitisch roestvast staal	X5CrNi18-10	1.4301	304	≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	17,50-19,50	–	8,00-10,50	–
	X2CrNi19-11	1.4306	304L	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,030	≤ 0,015	≤ 0,11	18,00-20,00	–	10,00-12,00	–
	X5CrNiMo17-12-2	1.4401	316	≤ 0,07	≤ 1,00	≤ 2,00	0,030	≤ 0,015	≤ 0,11	16,50-18,50	2,00-2,50	10,00-13,00	–
	X2CrNiMo17-12-2	1.4404	316L	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	16,50-18,50	2,00-2,50	10,00-13,00	–
	X6CrNiTi18-10	1.4541	321	≤ 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	–	17,00-19,00	–	9,00-12,00	Ti:5xC tot 0,70
	X6CrNiNb18-10	1.4550	347	≤ 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	–	17,00-19,00	–	9,00-12,00	Nb:10xC tot 1,00
	X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	316Ti	≤ 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	–	16,50-18,50	2,00-2,50	10,50-13,50	Ti:5xC tot 0,70
	X4CrNi18-12	1.4303	305	≤ 0,06	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	17,00-19,00	–	11,00-13,00	–
	X2CrNi18-9	1.4307	304L	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	17,50-19,50	–	8,00-10,50	–
	X10CrNiN18-8	1.4310	301	0,05-0,15	≤ 2,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	16,00-19,00	≤ 0,80	6,00-9,50	–
	X2CrNiN18-10	1.4311	304LN	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	0,12-0,22	17,50-19,50	–	8,50-11,50	–
	X2CrNiN18-7	1.4318	301LN/(302LN)	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	0,10-0,20	16,50-18,50	–	6,00-8,00	–
	X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	316LN	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	0,12-0,22	16,50-18,50	2,00-2,50	10,00-12,50	–
	X2CrNiMo17-12-3	1.4432	316L	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	16,50-18,50	2,50-3,00	10,50-13,00	–
	X2CrNiMo18-14-3	1.4435	316L	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	17,00-19,00	2,50-3,00	12,50-15,00	–
	X3CrNiMo17-13-3	1.4436	316L	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	16,50-18,50	2,50-3,00	10,50-13,00	–
	X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	317LM	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	0,12-0,22	16,50-18,50	4,00-5,00	12,50-14,50	–
	X1NiNCrMoCu25-20-5	1.4539	904L	≤ 0,020	≤ 0,70	≤ 2,00	0,030	≤ 0,010	≤ 0,015	19,00-21,00	4,00-5,00	24,00-26,00	Cu:1,20 tot 2,00
	X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529	–	≤ 0,020	≤ 0,50	≤ 1,00	0,030	≤ 0,010	0,15-0,25	19,00-21,00	6,00-7,00	24,00-26,00	Cu: 0,50 tot 1,50
	X1CrNiMoCuN20-18-7	1.4547	S32154	≤ 0,020	≤ 0,70	≤ 1,00	0,030	≤ 0,010	0,18-0,25	19,50-20,50	6,00-7,00	17,50-18,50	Cu: 0,50 tot 1,00
	X2CrNiMnMoN25-18-6-5	1.4565	S34565	≤ 0,030	≤ 1,00	5,00-7,00	0,030	≤ 0,015	0,30-0,60	24,00-26,00	4,00-5,00	16,00-19,00	Nb ≤ 0,15
	X1CrNiMoCuN24-22-8	1.4652	S32654	≤ 0,020	≤ 0,50	2,00-4,00	0,030	≤ 0,005	0,45-0,55	23,00-25,00	7,00-8,00	21,00-23,00	Cu: 0,30 tot 0,60
	X6CrNiSiN19-10	1.4818	S30415	0,04-0,08	1,00-2,00	≤ 1,00	0,045	≤ 0,015	0,12-0,20	18,00-20,00	–	9,00-11,00	Ce: 0,03 tot 0,08
	X12CrNi23-13	1.4833	309S	≤ 0,15	≤ 1,00	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	22,00-24,00	–	12,00-14,00	–
	X9CrNiSiN19-11-2	1.4835	S30815	0,05-0,12	1,40-2,50	~1,00	0,045	~0,015	0,12-0,20	20,00-22,00	–	10,00-12,00	Ce: 0,03 tot 0,08
	X15CrNiSi25-20	1.4841	314	≤ 0,20	1,50-2,50	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	24,00-26,00	–	19,00-22,00	–
	X8CrNi25-21	1.4845	310S	≤ 0,10	≤ 1,50	≤ 2,00	0,045	≤ 0,015	≤ 0,11	24,00-26,00	–	19,00-22,00	–
	X6NiCrSiN19-10	1.4854	S35315	0,04-0,08	1,20-2,00	≤ 2,00	0,040	≤ 0,015	0,12-0,20	24,00-26,00	–	34,00-36,00	Ce: 0,03 tot 0,08
	X6CrNi18-10	1.4948	304H	0,04-0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	0,035	≤ 0,015	≤ 0,11	17,00-19,00	–	8,00-11,00	–

tabel 2.2.b Austenitisch roestvast staal, belangrijke mechanische eigenschappen [5], [6]

structuur/type	NEN-EN 10088-1:2005		AISI/ ASTM/ UNS	hardheid		0,2% rekgrens (R _{p0,2}) [MPa] (min)	treksterkte (R _m) [MPa]	rek [%] (min)	kerfslagwaarde J (min)	
	symbool	materiaalnr		HRB (max)	HB of HV (max)				walsrichting	dwars op walsrichting
austeniet/ austenitisch roestvast staal	X5CrNi18-10	1.4301	304	80	149	230-260	520-750	45	100	60
	X2CrNi19-11	1.4306	304L	79	143	220-250	500-700	45	100	60
	X5CrNiMo17-12-2	1.4401	316	79	149	240-270	520-680	40-45	100	60
	X2CrNiMo17-12-2	1.4404	316L	79	146	240-270	520-680	40-45	100	60
	X6CrNiTi18-10	1.4541	321	80	160	220-250	500-720	40	100	60
	X6CrNiNb18-10	1.4550	347	85	160	220-250	500-720	40	100	60
	X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	316Ti	95	217	240-270	520-690	40	100	60
	X4CrNi18-12	1.4303	305	80	183	220-250	500-650	45	–	–
	X2CrNi18-9	1.4307	304L	79	143	220-250	500-700	45	100	60
	X10CrNiN18-8	1.4310	301	85	217	250-280	600-950	35-40	–	–
	X2CrNiN18-10	1.4311	304LN	95	217	290-320	550-750	40	100	60
	X2CrNiN18-7	1.4318	301LN/(302LN)	100	241	350-380	350	35-40	90	60
	X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	316LN	95	217	300-320	580-780	40	100	60
	X2CrNiMo17-12-3	1.4432	316L	79	230	240-270	520-700	40-45	100	60
	X2CrNiMo18-14-3	1.4435	316L	79	146	240-270	520-700	40-45	100	60
	X3CrNiMo17-13-3	1.4436	316L	79	149	240-270	530-730	40	100	60
	X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	317LM	96	223	290-320	550-780	35-40	100	60
	X1NiNCrMoCu25-20-5	1.4539	904L	90	–	240-270	520-730	35	100	60
	X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529	–	–	–	300-330	650-850	40	100	60
	X1CrNiMoCuN20-18-7	1.4547	S32154	96	223	320-350	650-850	35-40	100	60
	X2CrNiMnMoN25-18-6-5	1.4565	S34565	–	–	420	800-950	30	120	90
	X1CrNiMoCuN24-22-8	1.4652	S32654	–	–	430	750-1000	40	100	60
	X6CrNiSiN19-10	1.4818	S30415	95	210	290	600-800	30-40	–	–
	X12CrNi23-13	1.4833	309S	85	192	210	500-700	33-35	100	60
	X9CrNiSiN19-11-2	1.4835	S30815	95	210	310	650-850	37-40	–	–
	X15CrNiSi25-20	1.4841	314	–	223	230	550-750	28-30	100	60
	X8CrNi25-21	1.4845	310S	95	192	210	500-700	33-35	100	60
	X6NiCrSiN19-10	1.4854	S35315	95	210	300	650-850	40	–	–
	X6CrNi18-10	1.4948	304H	92	201	190-230	510-710	45	100	60

tabel 2.3a Martensitisch roestvast staal, aanduiding en chemische samenstelling [5], [6]

structuur/type	NEN-EN 10088-1:2005		AISI/ ASTM/ UNS	C	Si	Mn	P _{max}	S	N	Cr	Mo	Ni	overig
	symbool	materiaalnr		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
martensiet/ martensitisch roestvast staal	X12Cr13	1.4006	410	0,08-0,15	≤ 1,00	≤ 1,50	0,040	–	≤ 0,015	11,50-13,50	–	≤ 0,75	–
	X39Cr13	1.4031	420	0,36-0,42	≤ 1,00	≤ 1,00	0,040	–	≤ 0,015	12,50-14,50	–	–	–
	X39CrMo17-1	1.4122	–	0,33-0,45	≤ 1,00	≤ 1,50	0,040	–	≤ 0,015	15,50-17,50	0,80-1,30	≤ 1,00	–
	X20Cr13	1.4021	420	0,16-0,25	≤ 1,00	≤ 1,50	0,040	–	≤ 0,015	12,00-14,00	–	–	–
	X30Cr13	1.4028	420	0,26-0,35	≤ 1,00	≤ 1,50	0,040	–	≤ 0,015	12,00-14,00	–	–	–
	X3CrNiMo13-4	1.4313	S41500	≤ 0,05	≤ 0,70	≤ 1,50	0,040	≤ 0,015	≤ 0,020	12,00-14,00	0,30-0,70	3,50-4,50	–
	X1CrNiMoCu12-5-2	1.4422	–	≤ 0,02	0,50	≤ 2,00	0,040	≤ 0,003	≤ 0,020	11,00-13,00	1,30-1,80	4,00-5,00	Cu: 0,20 tot 0,80 N ≤ 0,020
	X1CrNiMoCu12-5-3	1.4423	–	≤ 0,02	0,50	≤ 2,00	0,040	≤ 0,003	≤ 0,020	11,00-13,00	2,30-2,80	6,00-7,00	Cu: 0,20 tot 0,80 N ≤ 0,020

tabel 2.3b Martensitisch roestvast staal, belangrijke mechanische eigenschappen [5], [6]

structuur/type	NEN-EN 10088-1:2005		AISI/ ASTM/ UNS	hardheid		0,2% rekgrens (R _{p0,2}) [MPa] (min)	treksterkte (R _m) [MPa]	rek [%] (min)	kerfslagwaarde J (min)	
	symbool	materiaalnr		HRB (max)	HB of HV (max)				walsrichting	dwars op walsrichting
martensiet/ martensitisch roestvast staal	X1Cr13	1.4006	410	90	200	–	600	20	–	–
	X39Cr13	1.4031	420	98	240	–	760	12	–	–
	X39CrMo17-1	1.4122	–	100	280	–	900	12	–	–
	X20Cr13	1.4021	420	95	225	–	700	15	–	–
	X20Cr13	1.4028	420	87	235	–	740	15	–	–
	X3CrNiMo13-4	1.4313	S41500	–	–	650	780-980	15	–	–
	X1CrNiMoCu12-5-2	1.4422	–	100	300	550	750-950	15	–	100
	X1CrNiMoCu12-5-3	1.4423	–	100	300	550	750-950	15	–	100

tabel 2.4a Duplex roestvast staal, aanduiding en chemische samenstelling [5], [6]

structuur/type	NEN-EN 10088-1:2005		AISI/ ASTM/ UNS	C	Si	Mn	P _{max}	S	N	Cr	Mo	Ni	overig
	symbool	materiaalnr		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
ferriet- austeniet/ duplex	X2CrNiN23-4	1.4362	S32304	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,035	≤ 0,015	0,05-0,20	22,00-24,00	0,10-0,60	3,50-5,50	Cu: 0,10-0,60
	X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	S32760	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 1,00	0,035	≤ 0,015	0,20-0,30	24,00-26,00	3,00-4,00	6,00-8,00	Cu: 0,50-1,00; W: 0,50-1,00
	X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	S32750	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,035	≤ 0,015	0,24-0,35	24,00-26,00	3,00-4,50	6,00-8,00	–
	X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	S32205	≤ 0,030	≤ 1,00	≤ 2,00	0,035	≤ 0,015	0,10-0,22	21,00-23,00	2,50-3,50	4,50-6,50	–
	X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	S32550	≤ 0,030	≤ 0,70	≤ 2,00	0,035	≤ 0,015	0,20-0,30	24,00-26,00	2,70-4,00	5,50-7,50	Cu: 1,00-2,50

tabel 2.4b Duplex roestvast staal, belangrijke mechanische eigenschappen [5], [6]

structuur/type	NEN-EN 10088-1:2005		AISI/ ASTM/ UNS	hardheid		0,2% rekgrens (R _{p0,2}) [MPa] (min)	treksterkte (R _m) [MPa]	rek [%] (min)	kerfslagwaarde J (min)	
	symbool	materiaalnr		HRB (max)	HB of HV (max)				walsrichting	dwars op walsrichting
ferriet- austeniet/ duplex	X2CrNiN23-4	1.4362	S32304	32	290	420	630-850	20-25	100	60
	X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	S32760	–	270	530	730-930	25	100	60
	X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	S32750	32	310	530-550	730-1000	15-20	100	60
	X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	S32205	31	293	480	640-950	25	100	60
	X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	S32550	32	302	510	730-1000	17-25	100	60

In veel gevallen worden de verschillende roestvaste staal-soorten uit de genoemde hoofdgroepen nog verder ingedeeld teneinde een betere afstemming op het gebruik te waarborgen. Tabel 2.5 geeft een overzicht van deze indeling [7].

Supermartensitisch chroomstalen hebben een zeer laag koolstofgehalte (≤ 0,15%), 1,5 tot 7% nikkel, evenals 1-3% molybdeen en eventueel geringe hoeveelheden koper, stikstof of titaan. Dit type legeringen worden vooral voor pijpleidingen in de off-shore gebruikt.

Precipitatiehardend roestvast staal is voornamelijk ontwikkeld om de relatief lage sterkte van austenitisch roestvast staal te verhogen. Deze staalsoorten worden ook wel PH staal genoemd. Ze combineren een hoge sterkte met een goede corrosievastheid. Er worden martensitisch precipitatiehardend, semi-martensitisch precipitatiehardend en austenitisch precipitatiehardend roestvast staal onderscheiden.

"Superferritisch roestvast staal" is ferritische roestvast staal met een hoge zuiverheidsgraad en wordt vooral toegepast vanwege de uitstekende corrosiebestendigheid. Vanwege

de weerstand van deze hoog-zuivere ferritische legeringen tegen tal van agressieve milieus, zijn er vele samenstellingen ontwikkeld, waaronder 18Cr-2Mo, 29Cr-4Mo, 29Cr-4Mo-2Ni en 27Cr-3,5Mo-2Ni. Vanwege problemen met lassen en het beheersen van de taai-bros overgangstemperatuur, worden deze legeringen toegepast in plaatdiktes onder de 3 mm en voor buizen.

"Superaustenitisch roestvaste staalsoorten" zijn austenitische roestvaste staalsoorten met een verhoogd gehalte aan Cr, Ni en Mo en toevoegingen van stikstof om de corrosievastheid te verbeteren. Dit maakt deze staalsoorten wel aanzienlijk duurder. Bij het lassen aan superaustenitisch roestvaste stalen moet men rekening houden met het optreden van warmscheuren.

Er kan worden gesteld dat de term "super" veelal gebruikt wordt om aan te geven dat het materiaal betere eigenschappen heeft dan de traditionele legeringen uit de groep. Betere eigenschappen ten aanzien van de corrosievastheid, sterkte, combinaties van beiden of andere specifieke verbeteringen. Vaak gaan deze verbeteringen ten koste van de lasbaarheid.

tabel 2.5 Verdere uitsplitsing van de verschillende typen roestvaste stalen (NEN-EN 10088) [7]

Ferritisch	
X2CrTi12	1.4512
X6Cr3	1.4000
X6CrAl13	1.4002
X2CrNi12	1.4003
X2CrTi17	1.4520
X2CrMoTi29-4	1.4592
Martensitisch	
X12Cr13	1.4006
X20Cr13	1.4021
X50CrMoV15	1.4116
X90CrMoV18	1.4112
Supermartensitisch	
X3CrNiMo13-4	1.4313
X1CrNiMoCu12-5-2	1.4422
X1CrNiMoCu12-7-3	1.4423
Precipitatiehardend	
X5CrNiCuNb16-4	1.4542
X7CrNiAl17-7	1.4568
Austenitisch	
X5CrNi18-10	1.4301
X2CrNi19-11	1.4306
X5CrNiMo17-12-2	1.4401
X2CrNiMo17-2-2	1.4404
X2CrNiMo18-14-3	1.4435
X12CrMnNiN17-7-5	1.4372
X15CrMnNi18-9-5	
Superaustenitisch	
X1CrNi25-21	1.4335
X1CrNiMoN25-25-2	1.4465
X1 NiCrMoCu25-20-5	1.4539
Austenitisch-ferritisch/Duplex	
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410
X2CrNiMoN11-5-3	1.4462
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501
Hittevast	
X10CrAlSi18	1.4742
X18CrN28	1.4749
X8CrNi25-21	1.4845
X8CrNiTi18-10	1.4878

2.3 Vergelijking van de materiaalaanduidingen volgens de verschillende normen

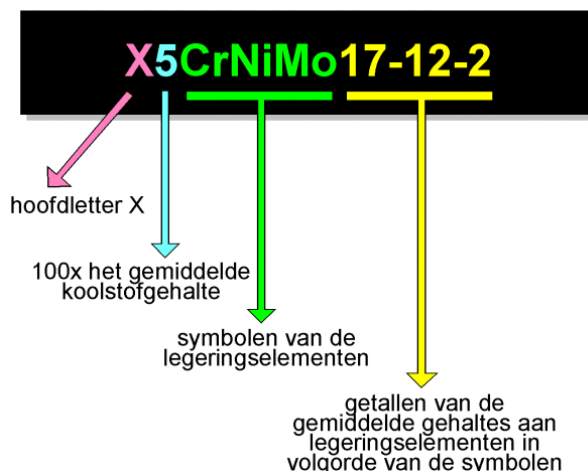
Wals- en smeedstaal

De EU-aanduiding geschiedt (evenals bij UNI) door achter-eenvolgens aan te geven:

- ▶ de hoofdletter X;
- ▶ een getal dat overeenkomt met 100 maal het gemiddelde koolstofgehalte, met een eventuele afronding van het cijfer van de eenheden;
- ▶ de symbolen van de legeringselementen die de staalsoort kenmerken (Deze symbolen worden geplaatst in afnemende volgorde van de percentages van de aangegeven elementen);
- ▶ symbolen van de andere elementen waarvoor het gehalte niet is vermeld, maar die door hun aanwezigheid de eigenschappen van het staal wel beïnvloeden;
- ▶ getallen welke de gemiddelde gehalten aangeven voor maximaal 3 legeringselementen.

Voorbeeld:

Voor materiaal X2CrNiMo17-12-2 (1.4401 - resp AISI 316) geldt de verklaring zoals weergegeven in figuur 2.1.



figuur 2.1 Verklaring van de codering volgens NEN-EN 10088

De uitwerking van de hierboven weergegeven materiaal-aanduiding is weergegeven in tabel 2.6.

tabel 2.6 Uitwerking van de codering volgens NEN-EN 10088

materiaal	codegetal uit aanduiding	factor (delen)	gemiddeld gehalte (%)
C	5	100	0,05
Cr	17	1	17
Ni	12	1	12
Mo	2	1	2

Opgemerkt wordt dat de chemische samenstellingen van staalsoorten - afhankelijk van het land van herkomst - voor een bepaald type belangrijke verschillen kunnen vertonen.

Ook zijn de samenstellingen van overeenkomstige typen niet altijd gelijk. Hiermee moet rekening worden gehouden, waardoor het aanbeveling verdient de normen goed met elkaar te vergelijken. Bij opdrachten uit landen als Duitsland, Engeland, Italië, Frankrijk, Japan, Zweden e.d. of bij de aanschaf van materialen afkomstig uit deze landen, moet aan de hand van de verschillende normen worden nagegaan op welke punten de samenstellingen afwijkingen vertonen. Het is om deze reden van groot belang dat men zich moet realiseren dat de diverse normen niet door elkaar gebruikt mogen worden en dat men bij de bestelling van materiaal steeds naar de juiste norm moet verwijzen. Anders kan men er niet zeker van zijn dat men roestvast staal koopt met de beoogde chemische samenstelling. Hetzelfde geldt overigens ook voor de minimaal gegarandeerde mechanische eigenschappen. De sterkte (rekgrens en treksterkte) van zowel ferritisch als vooral austenitisch roestvast staal kan vele malen worden verhoogd (> 200%) door deze materialen koud te vervormen (walsen). De mate van koudvervorming kan achter de hoofdcode worden gevonden en is binnen Europa eveneens genormaliseerd (NEN-EN 10088-2). Tabel 2.7 toont de aanvullende codering, waarbij eveneens de relatie tussen deze codering en de treksterkte is weergegeven.

Lastoevoegmateriaal

In tabel 2.8 is een overzicht gegeven van de belangrijkste lastoevoegmaterialen voor het lassen van een aantal veel gebruikte roestvaste staalsoorten [9].

Er wordt op gewezen dat niet altijd een eenduidige materiaalkeuze kan worden aangegeven, omdat soms gekozen moet worden tussen of een optimale lasbaarheid, of een

goede taaiheid c.q. sterkte of een goede corrosievastheid van de lasverbinding. Het is verstandig in specifieke situaties of bij twijfel de vaak uitstekende documentatie van de leveranciers van lastoevoegmaterialen te raadplegen.

tabel 2.7 Aanduiding van de verschillende mate van koudvervorming en de bijbehorende treksterkten (NEN-EN 10088-2) [8]

aanduiding	treksterkte in MPa
C 700	700 - 850
C 850	850 - 1000
C 1000	1000 - 1150
C 1150	1150 - 1300
C 1300	1300 - 1500

2.4 Standaardkwaliteiten en staalsoorten met verbeterde gebruikseigenschappen

2.4.1 Standaardkwaliteiten

Naast de officiële normering van de verschillende roestvaste staalsoorten, wordt er in de praktijk ook nog onderscheid gemaakt tussen standaard- en niet-standaardkwaliteiten. Roestvaste standaardkwaliteiten worden ingezet voor algemene toepassingen, terwijl de niet-standaardkwaliteiten zijn bestemd voor bedrijfsomstandigheden waar hogere of specifieke eisen aan het materiaal worden gesteld. De hiervoor in aanmerking komende staalsoorten

zijn meestal hoger gelegen om aan de strengere corrosievastheidseisen te kunnen voldoen. Zoals eerder aangegeven komen we voor deze categorie roestvaste staalsoorten vaak de benaming "super" tegen.

De invoering van de aanduidingen "standaard" en "niet-standaard" is bedoeld als leidraad voor de staalfabrikant. De meeste standaardkwaliteiten zijn in alle productvormen uit voorraad leverbaar, terwijl dit voor de "niet-standaard" soorten lang niet altijd het geval is. Bij de materiaalkeuze is het daarom raadzaam eerst na te gaan of de behoefte met een standaardkwaliteit kan worden gedekt. Pas als dat niet het geval is, kan men over stappen op een "niet-standaard" kwaliteit.

2.4.2 Staalsoorten met verbeterde gebruikseigenschappen

In de loop van de jaren zijn de chroomstaalsoorten overvleugeld door de austenitische Cr-Ni-staalsoorten. Niet dat deze laatste groep per definitie meer corrosievast is, maar omdat de austenietstructuur van de Fe-Cr-Ni legeringen gunstiger eigenschappen heeft voor een aantal toepassingen. Zo zijn de ferritische Cr-Fe-legeringen bijvoorbeeld veel gevoeliger voor de warmtebeïnvloeding bij het lassen.

Op basis van het chroomnikkelstaal met ongeveer 18% Cr, 9% Ni en omstreeks 0,06% C zijn in de loop van de jaren een groot aantal "nieuwe" roestvaste staalsoorten ontwikkeld. Figuur 2.2 geeft de ontwikkelingsrichtingen aan die de molybdeenrijke roestvaste staalsoorten hebben gevolgd. Zoals te zien is in deze figuur hebben de ontwikkelingen

tabel 2.8 Overzicht van een aantal veel gebruikte lastoevoegmaterialen voor het lassen van de verschillende roestvaste staalsoorten [9]

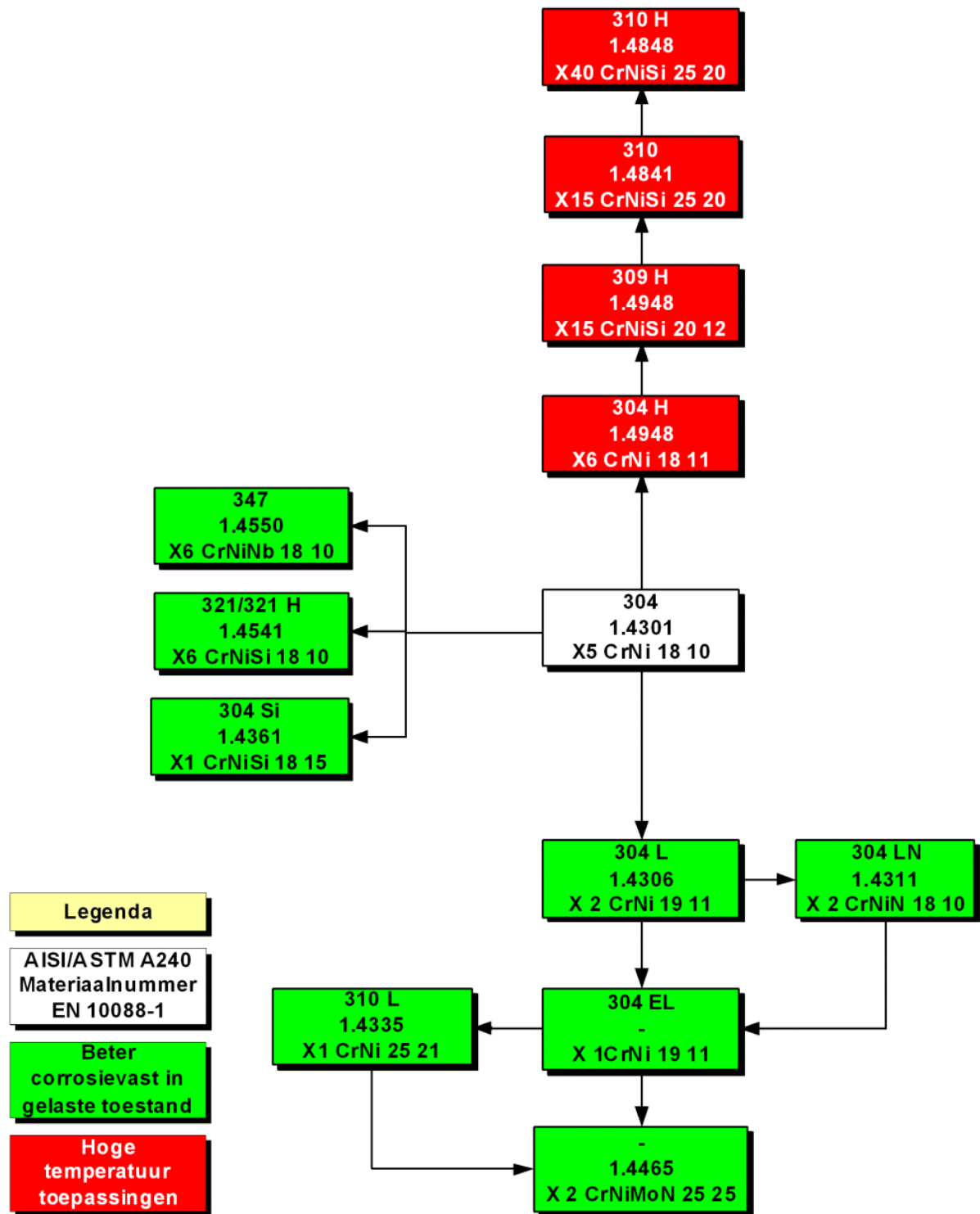
basismateriaal			lastoevoegmateriaal		
NEN-EN 10088		AISI ¹⁾	NEN-EN 1600	NEN-EN-ISO 14343	NEN-EN-ISO 17633
naam	nummer	code	beklede elektroden ²⁾	massieve draden en staven ³⁾	gevulde draden ⁴⁾
X5CrNi18-10	1.4301	304	E 19 9	G 19 9 L	T 19 9 L
X2CrNi18-9	1.4307	304 L	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
X2CrNi19-11	1.4306				
X5CrNiTi18-10	1.4541	321	E 19 9 Nb	G 19 9 Nb	T 19 9 Nb
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	316	E 19 12 2	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	316 L	E 19 12 3 L	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	316 Ti	E 19 12 3 Nb	G 19 12 3 Nb	T 19 12 3 Nb
X2CrNiMo18-15-4	1.4438	317 L	E 19 13 4 N L	G 19 13 4 L	T 19 13 4 N L
X10CrNi18-8	1.4310	301	E 19 9	G 19 9 L	T 19 9 L
X2CrNi18-7	1.4318	301 L	E 19 9 L	G 19 9 L	T 19 9 L
X12CrNi23-13	1.4833	309 S	E 22 12	G 22 12 H	T 22 12 H
X8CrNi25-21	1.4845	310 S	E 25 20	G 25 20	T 25 20
X2CrTi12	1.4512	409	E 199 L	G 19 9 L	T 13 Ti
X6Cr17	1.4016	430	E 17 of 19 9 L	G 17 of 19 9 L	T 17 of 19 9 L
X3CrTi17	1.4510	430 Ti / 439	E 23 12 L	G 23 12 L	T 23 12 L
X2CrMoTi18-2	1.4521	444	E 19 12 3 L	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
X2CrTiNb18	1.4509	441	E 23 12 L	G 23 12 L	T 23 12 L
X6CrMo17-1	1.4113	434	E 19 12 3 L	G 19 12 3 L	T 19 12 3 Nb
X2CrNi23-4	1.4362	–	E 25 7 2 N L	G 25 7 2 L	T 22 9 3 N L
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	–	E 25 7 2 N L	G 25 7 2 L	T 22 9 3 N L
X12G13	1.4006	410	E 13 of 19 9 L	G 13 of 19 9 L	T 13 of 19 9 L
X20Cr13	1.4021	–	E 13 of 19 9 L	G 13 of 19 9 L	T 13 of 19 9 L
X30Cr13	1.4028	420	E 13 of 19 9 L	G 13 of 19 9 L	T 13 of 19 9 L

1) AISI: American Iron and Steel Institute.

2) Beklede elektroden voor het lassen met beklede elektroden van roestvaste en hittebestendige staalsoorten. Er zijn twee typen van bekledingen: basisch en rutiel.

3) Massieve draden en staven voor booglassen van roestvaste en hittebestendige staalsoorten: G voor GMAW (MIG/MAG), W voor GTAW (TIG), P voor PAW (Plasma) of S voor SMAW (Bmbe).

4) Gevulde lasdraden voor het booglassen met of zonder gasbescherming van roestvaste en hittebestendige staalsoorten



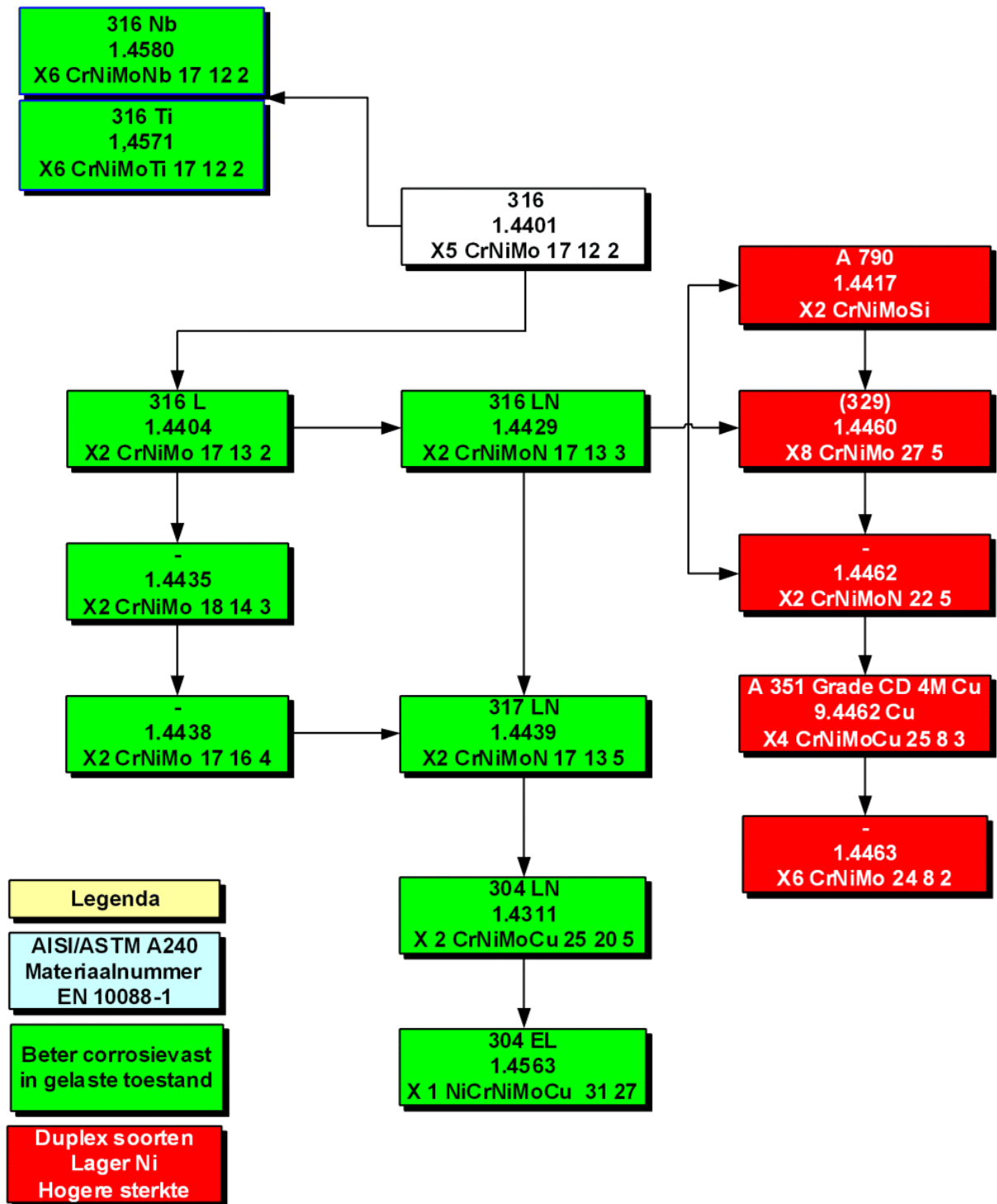
figuur 2.2 Ontwikkelingsrichtingen van molybdeen-vrije austenitische Cr-Ni staalsoorten

plaatsgevonden in verschillende richtingen afhankelijk van de behoefte vanuit de markt. Dit heeft geleid tot vele varianten waarvan slechts een klein deel zichtbaar is in deze figuur. Eenzelfde ontwikkeling zien we in figuur 2.3 vanuit de molybdeen houdende roestvaste staalsoorten.

De zogenaamde 'simpele' austenitische roestvaste staalsoorten worden verreweg het meeste gebruikt in de industrie en zijn ook het meest bekend. De niet-standaard austenitische roestvaste staalsoorten worden veel minder gebruikt, omdat ze voor specifieke toepassingen ontwikkeld zijn. Voor deze specifieke toepassingen zijn ze echter vaak van zeer groot belang, vooral voor de off-shore en petrochemische industrie.

Gecompliceerde "super" kwaliteiten worden alleen ingezet als dit voor de toepassing absoluut noodzakelijk is. Met deze kwaliteiten zijn over het algemeen aanzienlijk hogere kosten gemoeid, terwijl de verwerkbaarheid (lasbaarheid) aan stringenter regels zijn gebonden en dus eveneens meer kosten met zich meebrengen.

Roestvast staal wordt vanwege de weerstand tegen corrosie op grote schaal toegepast in de (petro)chemische industrie, de farmacie, de voeding- en genotmiddelen industrie, in huishoudelijke apparaten, in de automobiellindustrie en in de bouw. De gangbare roestvaste staalkwaliteiten voldoen goed in tal van waterige milieus en onder natte condities.



figuur 2.3 Ontwikkelingsrichtingen molybdeenhoudende Cr-Ni staalsoorten

Zijn de condities extremer, bijvoorbeeld door hogere temperaturen of door een hoge concentratie van bijvoorbeeld chloorionen, dan kan roestvast staal lokaal actief worden. Er kunnen de volgende vormen van lokale corrosie ontstaan:

- **Putcorrosie** treedt vooral op in een omgeving waarin chloriden aanwezig zijn.
- **Spleetcorrosie** ontstaat in spleten bij een tekort aan zuurstof. Chloriden versterken de aantasting.
- **Galvanische corrosie** (*contactcorrosie*) ontstaat bij contact tussen verschillende metaalsoorten in aanwezigheid van een elektrolyt. Het minst edele metaal lost versneld op.
- **Interkristallijne corrosie** (evt. met scheuren) kan optreden nabij lassen in roestvast staal met relatief hoog kool-

stofgehalte (bijvoorbeeld 1.4301 en 1.4401), doordat op de korrelgrenzen chroomcarbiden ontstaan. Kwaliteiten met lage koolstofgehalten (zoals 1.4306 en 1.4404), of gestabiliseerd met toevoegingen van titaan en/of niobium (bijvoorbeeld 1.4541 en 1.4571) zijn in gelaste vorm beter bestand tegen interkristallijne corrosie.

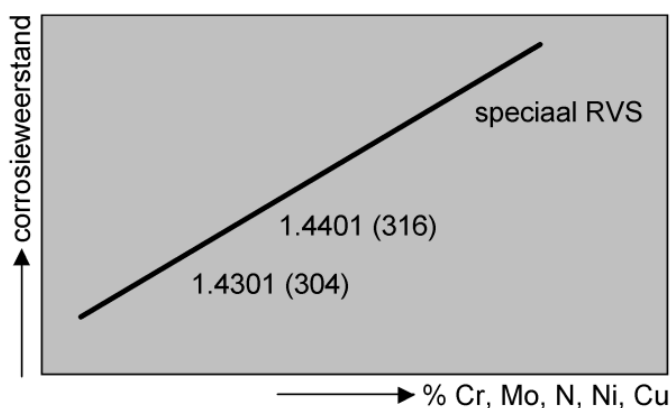
- **Spanningscorrosie** (met scheurvorming) kan ontstaan door een combinatie van: een hiervoor gevoelig roestvast staal, trekspanning (evt. ook restspanning door bijvoorbeeld lassen) en een corrosief milieu met chloriden. Spanningscorrosie van roestvast staal treedt onder "normale" omstandigheden alleen op bij temperaturen boven ca. 50 °C, echter in zwembadmilieus met veel chloriden is een temperatuur van 30 °C al voldoende om spanningscorrosie te laten ontstaan.

Naarmate het staal meer chroom, molybdeen, stikstof en wolfraam bevat, wordt de weerstand tegen corrosie, vooral putvormige corrosie, hoger. De bijdrage van deze elementen aan de weerstand tegen putcorrosie in chloridenhoudende milieus wordt gegeven door de PRE-waarde:

$$\text{PRE} = \text{Pitting Resistance Equivalent} = \% \text{Cr} + 3,3 \times \% \text{Mo} + 16 \times \% \text{N}$$

De PRE waarde is een globale indicatie of het staal geschikt is voor gebruik in een bepaald milieu; bij gebruik in de buitenlucht is in Nederland en voor gebruik in zeewater is een PRE waarde van rond de 28 gewenst.

Ook elementen als nikkel, koper en mangaan hebben in sommige milieus een positieve invloed, niet zozeer op de weerstand tegen putcorrosie, dan wel op de weerstand tegen algemene corrosie. In figuur 2.4 is dit kwalitatief aangegeven. Naarmate het staal meer stikstof bevat, wordt ook de sterkte, in het bijzonder de rekgrens, hoger. Molybdeen bevordert de sterkte ook, zij het in mindere mate.



figuur 2.4 Effect van elementen op de corrosieweerstand (speciaal RVS = hoger gelegen) [6]

Nieuwe mogelijkheden uit het oogpunt van corrosiebestendigheid bieden de Fe-Cr-Ni-Mo-Cu-legeringen, die vaak dienst kunnen doen onder omstandigheden, waarvoor vroeger de (duurdere) Ni-basis legeringen moesten worden ingezet. De Ni-basis legeringen blijven uiteraard noodzakelijk voor de meest agressieve milieucondities.

De vernieuwingen op het gebied van roestvast staal betreffen vooral:

- ▶ leverbare kwaliteiten en meer op de toepassing gerichte samenstellingen;
- ▶ plaatmaterialen met specifieke oppervlakte eigenschappen (decoratie, reinigend vermogen);
- ▶ producten die via de productieroute uitstekende mechanische eigenschappen hebben;
- ▶ ontwerpgerichte leverbaarheid van speciale halffabrikaten, waarmee verregaande integratie van staalkwaliteit, halfproduct (vorm en eigenschappen) en ontwerp mogelijk wordt.

Hoofdstuk 3

Invloed van het lassen op enkele belangrijke materiaaleigenschappen

3.1 Inleiding

Het lassen van hoogwaardige roestvaste staalsoorten stelt hoge eisen aan de vakbekwaamheid van de lasser. Dit houdt in dat het laswerk aan deze staalsoorten uitgevoerd moet worden door gekwalificeerde en/of gecertificeerde lassers. Naast de uitvoering is de keuze van het juiste las-toevoegmateriaal van essentieel belang voor de uiteindelijke kwaliteit van de lasverbinding. Echter, ondanks een goede uitvoering en materiaalkeuze, blijken gelaste constructies in de loop van de tijd soms toch nog aanleiding te geven tot schade, waarbij de lasverbindingen vaak de meest kritieke punten zijn. Veelal is een samenspel van verschillende oorzaken de aanleiding tot het falen van lassen in staal, zoals de aanwezigheid van scheuren en/of een plaatselijke corrosieve aantasting.

Het streven is te komen tot een lasverbinding met eigenschappen die zo goed mogelijk met die van het moeder-materiaal overeenkomen. Zoals vaak in de lastechniek wordt hier soms echter bewust van afgeweken en wordt juist een afwijkend lastoevoegmateriaal gekozen om specifieke eigenschappen van de lasverbinding te verkrijgen. Zo kan het bijvoorbeeld voorkomen dat een duplex roestvaststaal gelast wordt met een superduplex lastoevoegmateriaal.

Het construeren in en het lassen van roestvast- en hittevast staal vereist daarom ook metaalkundige achtergrondkennis. Al in het ontwerpstadium moet worden gedacht aan die materiaaleigenschappen, die bij het lassen van belang zijn.

3.2 Kans op plaatselijk versnelde corrosieve aantasting tengevolge van het lassen

3.2.1 Algemeen

In hoofdstuk 1 hebben we al gezien dat de corrosievastheid van staal kan worden verbeterd door de toevoeging van chroom. Voorbeelden zijn de ferritische en martensitische Cr-stalen waarbij het Cr-gehalte varieert van 12 tot ca. 30%.

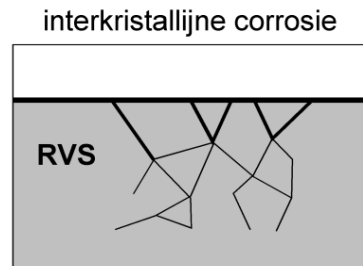
Een belangrijk betere corrosievastheid kan worden verkregen door behalve chroom ook andere legeringselementen zoals Mo en Cu toe te voegen.

De austenitische legeringen (met minimaal 17% Cr en 9% Ni) hebben naast een goede corrosievastheid, bovendien goede mechanische eigenschappen (betere taaiheid) en een verbeterde lasbaarheid in vergelijking met de Cr-stalen. Zoals al eerder opgemerkt, zijn de ferritische en austenitische roestvaste staalsoorten alleen corrosievast, wanneer ze in een oxiderend milieu worden toegepast, door de vorming van een dichte en goed hechtende huid van Cr-oxide. Is echter een oxidehuid aanwezig die zich bij hoge temperatuur heeft gevormd - bijvoorbeeld in de warmte beïnvloede zone (WBZ) van een las of door een warmtebehandeling - dan wordt het materiaal ter plaatse van deze oxidehuid gevoeliger voor corrosie. Vaak zijn de beschadigde oxidehuiden herkenbaar doordat er zogenaamde "aanloopkleuren" zichtbaar zijn, waarbij als vuistregel geldt, dat naarmate de aanloopkleuren donkerder zijn, de oxidehuid slechter en dus minder corrosiebestendig is.

De corrosievastheid en/of de mechanische eigenschappen kunnen ook achteruitgaan door het ontstaan van Cr-carbiden en/of sigma-fase. In de volgende paragrafen wordt een aantal aantastingsvormen en hun oorzaken nader belicht.

3.2.2 Interkristallijne corrosie

Interkristallijne corrosie kenmerkt zich door een corrosieve aantasting van het materiaal langs de korrelgrenzen (zie figuur 3.1).

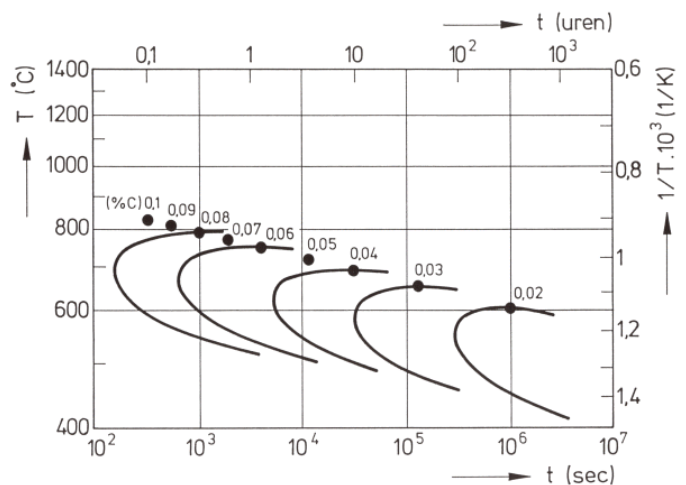


figuur 3.1 Schematische weergave van interkristallijne corrosie [6]

Austenitische roestvaste staalsoorten bevatten in leverings-toestand - afhankelijk van hun samenstelling - een hoeveelheid koolstof die grotendeels in de austenietstructuur is opgelost. Door verhitting tussen 450 en 850 °C kan deze koolstof zich met chroom verbinden tot carbiden, die zich op de korrelgrenzen uitscheiden. De vormingssnelheid van deze carbiden is het hoogst bij 650 tot 750 °C (afhankelijk van het staaltipe).

In het temperatuurgebied van 450-850 °C verplaatsen de koolstofatomen zich vrij gemakkelijk naar de kristalgrenzen waar vervolgens chroomcarbiden worden gevormd en de kristalgrenzen armer aan chroom worden. Indien het chroomgehalte hier plaatselijk onder 12% daalt, ontstaat een voor corrosie gevoelige zone. De aantasting die hier het gevolg van is, wordt interkristallijne corrosie genoemd. Interkristallijn, omdat de aantasting langs de korrelgrenzen plaatsvindt. Als tengevolge van het lassen of een warmtebehandeling (hoge temperatuurbeïnvloeding) het roestvast staal gevoelig wordt voor interkristallijne corrosie, wordt dit sensitiveren genoemd.

Figuur 3.2 geeft een indruk hoe austenitisch Cr-Ni-staal met 18% Cr en 10% Ni gevoelig wordt voor interkristallijne corrosie in afhankelijkheid van het C-gehalte dat (voor de warmtebehandeling begon) in het austeniet was opgelost. De sensitiveringsgebieden komen overeen met het uitscheidingsgebied voor chroomcarbiden.

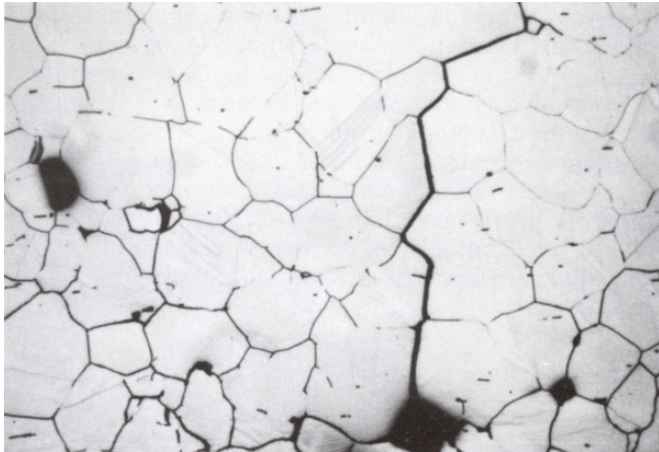


figuur 3.2 Sensitiveringsgebieden voor korrelgrensaantasting bepaald met de Strauss-proef bij 18%Cr-10%Ni staal [11]

Austenitische roestvaste staalsoorten zijn echter niet de enige die gevoelig zijn voor interkristallijne corrosie, ook ferritische roestvaste staalsoorten zijn hier gevoelig voor.

In figuur 3.3 is op een structuurfoto de interkristallijne aantasting van roestvast staal te zien.

Als chroomverarming rond de korrelgrenzen heeft plaatsgevonden, kan corrosie worden voorkomen door homogeen te gloeien bij ongeveer 900 °C. Bij deze temperatuur blijven de carbiden wel bestaan, maar door chroomdiffusie wordt de chroomverarming aan de korrelgrenzen opgeheven.



figuur 3.3 Voorbeeld interkristallijne aantasting in austenisch Cr-Ni-staal; aantasting volgt de austeniet korrelgrenzen

Een andere methode om de gevoeligheid voor interkristallijne corrosie te verminderen is het materiaal oplossend te gloeien bij 1050-1100 °C, waarna bij voorkeur in water moet worden afgeschrikt. Het gloeien moet worden uitgevoerd in een beschermende atmosfeer. Verder moet er rekening mee worden gehouden dat het afschrikken in water na gloeien risico's met zich meebrengt, zoals maat- en vormveranderingen. Voor verdere bijzonderheden over de verschillende warmtebehandelingen wordt verwezen naar hoofdstuk 10.

Chroomcarbiden worden niet alleen gevormd in de WBZ (warmte beïnvloede zone), maar ook in de rest van de constructie, wanneer de bedrijfstemperatuur in het sensitiveringsgebied ligt. In dat geval is er onder andere gevaar voor interkristallijne aantasting door condensaatvorming bij stoppen en starten van installaties of indien installaties chemisch worden gereinigd. Als er gevaar is voor dat soort aantastingen, is een andere materiaalkeuze noodzakelijk.

Om de vorming van chroomcarbiden te vermijden of te vertragen, staat een aantal methoden ter beschikking:

- verlaging van het koolstofgehalte (= 0,03%) zoals onder andere bij typen 1.4307 (AISI 304L) of 1.4404 (AISI 316L); let op de verschuiving van de sensitiveringsgebieden onder invloed van het koolstofgehalte in figuur 3.2;
- toevoegen van stabiliserende legeringselementen die sterkere carbidevormers zijn dan chroom; dit zijn titaan en niobium.

Indien roestvast staal langdurig aan bedrijfstemperaturen in het kritieke temperatuurgebied moet worden blootgesteld, is het wenselijk te kiezen voor een gestabiliseerde roestvaste staalsoort.

Bij de warmtebehandeling van de gestabiliseerde soorten (zie hoofdstuk 10), ontstaan in het materiaal Ti- of Nb-carbiden uitgescheiden binnen de kristallen en niet specifiek gelokaliseerd op de kristalgrenzen. Gestabiliseerd staal kan echter onder bijzondere omstandigheden bij het lassen soms toch nog gevoelig worden voor interkristallijne aantasting (zie onder 3.2.3 "knife-line attack").

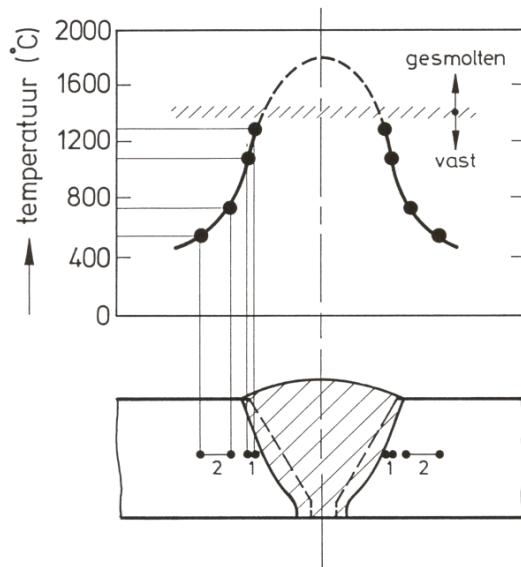
Indien interkristallijne corrosie plaatsvindt in de warmte beïnvloede zone (WBZ), dat wil zeggen op geringe afstand van de las, spreekt men van lasbederf of weld decay.

Maatregelen om interkristallijne corrosie tegen te gaan:

- Een juiste materiaalkeuze dus:
 - laag C-houdende typen gebruiken;
 - gestabiliseerde soorten gebruiken;
- indien warmzetten en warmbuigen dan temp. < 450 °C.

3.2.3 Knife-line attack

"Knife-line attack" is een vorm van corrosie, waarbij een zone, direct naast de las, met de breedte van een messnede wordt aangetast. Wordt gestabiliseerd roestvast staal gelast, dan kunnen zeer plaatselijk in de WBZ de titaancarbiden worden opgelost. Dit kan plaatsvinden in gebieden, waarin de temperatuur enkele malen boven 1100 °C is geweest. In de praktijk komen we dit tegen bij het lassen in meerdere lagen van grotere materiaaldikten. Hierdoor kan in een zeer nauw begrepsd gebied chroomcarbide uitscheiding plaatsvinden, wat kan resulteren in interkristallijne corrosie. Het toevoegen van niobium geeft in tegenstelling tot titaan nooit aanleiding tot knife-line attack. Een en ander wordt in figuur 3.4 nader geïllustreerd.



figuur 3.4 Temperatuursverdeling over een lasdoorsnede op plaatsen 1: kans op "knife-line attack" op plaatsen 2: kans op interkristallijne corrosie

Maatregelen om knife-line attack tegen te gaan:

- Geen gestabiliseerde soorten gebruiken, maar bijvoorbeeld laag-C-houdende typen;
- na het lassen stabiliserend gloeien.

3.2.4 Spanningscorrosie

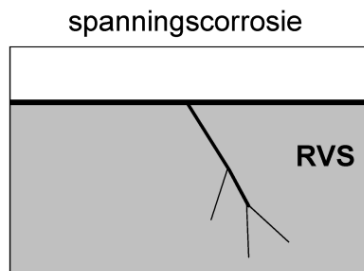
Spanningscorrosie treedt op in bepaalde metalen onder de gelijktijdige inwerking van een corrosief medium en spanningen. Spanningen kunnen zijn trekspanningen, spanningsconcentraties en soms restspanningen in het materiaal. Zonder de trekspanningen zou hetzelfde corrosieve medium veelal geen noemenswaardige aantasting van het metaal veroorzaken. Voor spanningscorrosie wordt vaak de afkorting SCC gebruikt (Engels: Stress Corrosion Cracking).

Spanningscorrosie in roestvast staal

Dit treedt over het algemeen op als wordt voldaan aan drie voorwaarden:

1. Aanwezigheid van chloride in het water. Dit hoeft maar heel weinig te zijn, leidingwater met 50 mg/liter bevat al genoeg chloride.
2. Een temperatuur hoger dan 50-60 graden Celsius.
3. Aanwezigheid van trekspanningen in het onderdeel. Deze spanningen kunnen ook spanningen tengevolge van 'koude deformatie' zijn.

Figuur 3.5 geeft schematisch het verloop van een spanningscorrosiescheur weer.



figuur 3.5 Schematische weergave van een spanningscorrosiescheur [6]

Een chloride houdend milieu vergroot de kans op spanningscorrosie, daarom moet de apparatenbouwer ook "chloridenbronnen" onderkennen en vermijden. Chloriden zijn aanwezig in zeewater, maar ook in PVC bevattende isolatiematerialen, folies, tapes, enz.; eveneens kunnen zij aanwezig zijn in beitsmiddelen en spoel- of afperswater. Bekend zijn de problemen rond het gebruik van roestvast staal in zwembaden [12].

Bij aantasting door chloriden treden scheuren op, die bij austenitisch staal meestal transkristallijn verlopen; dat wil zeggen dat de scheuren dwars door de kristallen heen lopen. Een tweede kenmerk betreft de vele vertakkingen aan het einde van een hoofdscheur (zie figuur 3.6 voor een voorbeeld van spanningscorrosiescheuren in austenitisch Cr-Ni-staal).



figuur 3.6 Spanningscorrosiescheuren in austenitisch Cr-Ni-staal; scheuren lopen dwars door de kristallieten heen

De hoofdscheurrichting staat bij spanningscorrosie steeds loodrecht op de spanningsrichting.

Om het optreden van spanningscorrosie te voorkomen, kan een warmtebehandeling bij 900 °C of hoger worden toegepast. Echter bij deze hoge temperaturen kan de sterkte zo ver terug lopen, dat zware constructies onder hun eigen gewicht kunnen bezwijken. In dit soort situaties is het noodzakelijk voor een lagere voorwarmtemperatuur te kiezen. In heel veel gevallen wordt zelfs niet hoger voorverwarmd dan 400 °C. Deze temperatuur is voldoende om de hoogste spanningsconcentraties te nivelleren, waardoor de constructie veel minder kritisch wordt. Door een juiste lasvolgorde kunnen de lasspanningen eveneens zo laag mogelijk worden gehouden.

Een verhoogde weerstand tegen spanningscorrosie is ook mogelijk om kwaliteiten met een aangepaste chemische samenstelling toe te passen. Men kan hierbij denken aan soorten met een hoger nikkelgehalte. Meer nikkel betekent veel meer nikkel. Uit kostenoverweging is het dan beter om

een ferritische kwaliteit in te zetten of bijvoorbeeld een zogenaamde lean duplex (dus met een laag Mo-gehalte of zonder Mo).

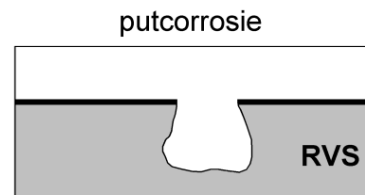
Daarnaast kan worden overwogen of duplex of ferritisch roestvast staal een alternatief kan zijn. In sommige milieus in de procesindustrie, kan de toepassing van deze typen staal een goede remedie zijn om spanningscorrosie tengevolge van chloriden in gelaste constructies tegen te gaan.

Maatregelen om spanningscorrosie tegen te gaan:

- ▶ Juiste materiaalkeuze;
 - een chroomstaal, een duplex staal of nikkellegering toepassen;
- ▶ spanningsarm gloeien toepassen;
- ▶ spanningsconcentraties vermijden (scherpe overgangen, lasfouten, oppervlak polijsten);
- ▶ zo min mogelijk lassen, snijden, knippen;
- ▶ trekspanningen in de constructie zo laag mogelijk houden;
- ▶ drukspanningen introduceren (hameren, shotpeenen);
- ▶ liefst niet koudbuigen en koudzetten - hierdoor nemen plaatselijk de spanningen toe.

3.2.5 Putvormige corrosie

Putvormige corrosie (pitting) is zeer gevaarlijk, omdat de aantasting niet gelijkmatig plaatsvindt, maar zeer plaatselijk (zie figuur 3.7). Er ontstaan putjes in het materiaal, die snel dieper kunnen worden. Putvormige corrosie in austenitisch roestvast staal treedt vooral op in chloridenhoudende milieus.



figuur 3.7 Schematische weergave van putvormige corrosie

De aantasting begint bij een plaatselijk defect in de oxide-laag. Er ontstaan kleine plekken direct onder het oppervlak die als een anode werken.

Behalve door een defect kan putvormige corrosie ook ontstaan doordat verf, vuil, roest, slib, micro organismen e.d. op het oppervlak vastzitten. Ook slakresten die na het lassen achterblijven, kunnen problemen geven. Beitsen en passiveren zijn een remedie om putvormige corrosie tegen te gaan. Een regelmatige controle op de vorming van afzettingen op materiaal van installaties in bedrijf is eveneens belangrijk.

Een andere weg die men kan volgen is minder pittinggevoelige staalsoorten te kiezen bij de bouw van de installatie.

Evenals bij spanningscorrosie geldt ook hier, dat de Mo-houdende soorten en vooral die met een hoog Mo-gehalte, minder gevoelig zijn voor putvormige corrosie. Ook kan worden gekozen voor duplex roestvaste staalsoorten.

Met titaan gestabiliseerde soorten zijn echter vaak weer iets gevoeliger voor putvormige corrosie dan andere austenitische soorten. Naarmate het staal meer chroom, molybdeen en stikstof bevat, wordt de weerstand tegen corrosie, vooral putvormige corrosie, hoger. De bijdrage van deze elementen aan de weerstand tegen putcorrosie in chloridenhoudende milieus wordt gegeven door de PRE-formule:

$$PRE = \text{Pitting Resistance Equivalent} = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N$$

Putvormige corrosie kan ook ontstaan door contaminatie, doordat vreemde metaaldelen op de een of andere manier op of in het oppervlak van het roestvast staal terecht zijn gekomen. De toetreding van zuurstof wordt daardoor belet, zodat het metaaloppervlak plaatselijk actief wordt. De vreemde deeltjes en verontreinigingen kunnen bijvoorbeeld ontstaan bij het gebruik van gereedschappen, zoals staal-

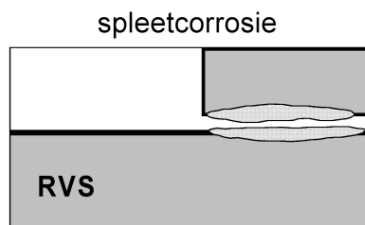
borstels en slijpschijven die ook voor ongelegeerd staal worden gebruikt. Daarom moet het verwerken van gewoon staal en roestvast staal in dezelfde ruimte en met dezelfde gereedschappen worden vermeden.

Maatregelen om putvormige corrosie tegen te gaan:

- ▶ Roestvaststaal met hoge PRE gebruiken;
- ▶ Mo-houdende typen gebruiken;
- ▶ geen Ti-gestabiliseerde typen toepassen;
- ▶ altijd beitsen en passiveren;
- ▶ contaminatie met vreemde deeltjes voorkomen.

3.2.6 Spleetcorrosie

Wanneer twee oppervlakken van roestvast staal in een vloeistof tegen elkaar liggen of wanneer een of ander niet-metallisch voorwerp het staal geheel of gedeeltelijk bedekt, ontstaat een spleet, waarin de vloeistof maar weinig uitwisseling heeft met de vloeistof daarbuiten. In zulke gevallen treedt vaak ernstige corrosie op die spleetcorrosie wordt genoemd (zie figuur 3.8).



figuur 3.8 Schematische weergave van spleetcorrosie

De aanwezigheid van chloriden kunnen de aantasting nog verder versterken.

Voorbeelden vinden we bij pakkingen tussen flenzen, waarbij de vloeistof tussen pakking en metaal kan kruipen. Andere voorbeelden waarbij men aan spleetcorrosie moet denken zijn: hoeklassen, pijp- en plaatverbindingen, alsmede koel- en verhogingspiralen.

De verklaring is, dat de zuurstofconcentratie in de spleet kleiner wordt dan daarbuiten en de zuurgraad wordt verhoogd, waardoor het staal in de spleet in oplossing gaat. Dit is dus een punt waarop men bij het ontwerpen van verbindingen in een constructie moet letten. Dit geldt uiteraard ook voor lasverbindingen; spleten moeten worden vermeden of moeten zo groot mogelijk worden gehouden. Ook spleten afdichten door lassen (rondom aflassen) is een middel om de kans op spleetcorrosie te verminderen. Ook kunnen spleten worden opgevuld door middel van soldeer, lijm, kunststof of anderszins. Wat het kiezen van minder spleetcorrosie-gevoelige staal-soorten betreft geldt, dat het gebruik van molybdeen-gelegeerde, niet gestabiliseerde staalsoorten - net als bij putvormige corrosie - het risico vermindert.

Maatregelen om spleetcorrosie tegen te gaan:

- ▶ Vermijden van kleine spleten;
- ▶ spleten opvullen;
- ▶ rondom aflassen;
- ▶ goed beitsen en passiveren;
- ▶ Mo-houdende typen gebruiken;
- ▶ geen Ti-gestabiliseerde typen gebruiken.

3.2.7 Contactcorrosie

Deze lokale vorm corrosie kan ontstaan wanneer er elektrisch contact is tussen twee of meer verschillende metalen in de aanwezigheid van een elektrisch geleidend milieu (condens, zout, zuur, enz.). Het minst edele metaal zal dan aangetast worden (zie ook figuur 3.9).

Ook bij contact tussen verschillende soorten roestvast staal kan galvanische corrosie optreden, maar in mindere mate.



figuur 3.9 Contactcorrosie in een gietijzeren pomphuis met een roestvaststalen waaiër

Het is om deze reden in corrosieve omgevingen, zoals industriële of maritieme milieus, beter geen martensitische of ferritische bouten en moeren kunnen worden toegepast om austenitisch roestvast staal te verbinden. Bij het lassen is de keuze van het juiste lastoevoegmateriaal van belang. Het lastoevoegmateriaal moet even edel of edeler zijn als het moedermateriaal.

Aanbrengen van een deklaag

Het aanbrengen van een deklaag op een van beide delen of bij voorkeur op beide delen is een simpele methode om contactcorrosie te voorkomen, het is ook de meest toegepaste methode. Er kunnen metallische deklagen worden gebruikt (bijv. zink, aluminium) of andere deklagen zoals primers en (chemisch resistente) verven. Bij voorkeur wordt een deklaag aangebracht op de beide metaaldelen. Dit is met name het geval bij zogenaamde zwart wit (Staal/RVS) verbindingen. In dit geval moet dan zowel het staal, de las en een stuk van het roestvast staal worden bedekt. Zorg voor het aanbrengen van de deklagen altijd dat de te bedekken delen goed gereinigd zijn.

Kathodische bescherming (KB)

Kathodische bescherming is een elektrochemische methode om contactcorrosie te bestrijden.

KB vindt plaats door het gebruik van een zogenaamde opofferingsanode van een ander metaal. Het minst edele metaal lost bij dit proces op. Het wordt als het ware 'opgeofferd' om het edeler metaal te beschermen. Vandaar de naam 'opofferingsanode'.

Als opofferingsanoden worden wel gebruikt:

- ▶ zink- en aluminiumlegeringen (voor maritieme installaties);
- ▶ magnesium- en zinklegeringen (voor landinstallaties).

Deze methode wordt toegepast bij bijvoorbeeld het beschermen van stalen schepen en sluisdeuren.

De bescherming vindt dan plaats door bijvoorbeeld zinkblokken op de scheepswand of sluisdeur aan te brengen (zie figuur 3.10).

Het is ook mogelijk om roestvast staal te beschermen met opofferingsanoden. Deze toepassing maakt een sterke groei door omdat de combinatie roestvast staal en opofferingsanoden het veel duurdere titanium kan vervangen. De toepassingen voor KB van roestvast staal zijn met name warmtewisselaars, leidingsystemen, Off Shore en pompen. Met een gedegen KB ontwerp, kan galvanische corrosie worden tegengegaan. Bijvoorbeeld contactcorrosie van een



figuur 3.10 Kathodische bescherming van een stalen schip aangedreven door een bronzen schroef door middel van zinkblokken

stalen caisson voor roestvaststalen zeewaterpompen wordt tegengegaan door op de duplex rvs risers anoden te installeren. Op die manier zal niet het stalen caisson zich opofferen, maar de opofferingsanode op de roestvaststalen riser. Tegelijkertijd wordt het roestvast staal beschermd door de anoden.

Kathodische bescherming met behulp van een externe spanningsbron

Kathodisch beschermen is ook mogelijk met gebruikmaking van niet-galvanische anoden. De elektronenstroom wordt dan geleverd door een externe spanningsstroombron, zoals een accu of een gelijkrichter. Dit systeem wordt ook wel het elektronisch compenseren van het spanningsverschil of 'opgedrukte spanning' genoemd. De stroomafgifte kan vele malen groter zijn dan die van galvanische anoden, waardoor ook grotere oppervlakken kathodisch beschermd kunnen worden. Geavanceerde modellen voor het berekenen van de stroom en potentiaal zijn beschikbaar.

In veel gevallen is de toepassing van een of andere manier van kathodische bescherming onmogelijk. Gebruikmaken van anoden kan eigenlijk alleen als constructie geheel is ondergedompeld.

Maatregelen om contactcorrosie tegen te gaan:

- ▶ Aanbrengen van een afsluitende laag op minimaal één en bij voorkeur op beide metalen;
- ▶ gebruik maken van kathodische bescherming door middel van opofferingsanoden dan wel het elektronisch compenseren van het spanningsverschil.

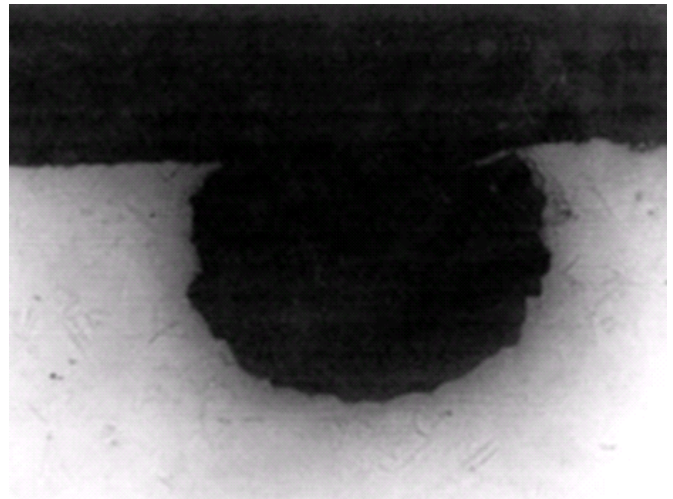
3.2.8 Biologische corrosie (MIC)

Biologische corrosie ook wel MIC (Microbiologisch Geïnduceerde Corrosie) genoemd is de aantasting van metalen door micro-organismen. Het faalmechanisme van MIC wordt geïnitieerd en gepropageerd door organismen als bacteriën, algen of zwammen die een slijmachtige laag op het oppervlak kunnen veroorzaken. Deze corrosie veroorzaakt lokale putvormige en kratervormige aantasting. Micro-organismen zijn aanwezig in alle natuurlijke, vochtige omgevingen. Ze hechten zich aan bijna alle oppervlakken, vermenvuldigen zich en bouwen biomassa op. Biologische corrosie is geen nieuwe vorm van corrosie, maar versnelt de andere corrosiemechanismen. De structuur op het oppervlak lijkt bij biologische corrosie op een lappendeken. Factoren die de agressiviteit beïnvloeden zijn o.a. de aanwezigheid van organische voedingsstoffen voor bacteriën, zoals koolstof- en stikstofverbindingen of ammoniak, die de vorming van deze biologische corrosie bevorderen. Vaak is deze vorm van corrosie herkenbaar, doordat er een

slijm laag op het materiaal aanwezig is. De stromingssnelheid van het medium heeft een belangrijke invloed op de vorming van een dergelijke slijm laag en dus deze vorm van corrosie.

Zelfs door normale verontreinigingen in bijvoorbeeld leidingssystemen kan, na een langdurige stilstand van het koelwater, in roestvaststalen leidingen MIC ontstaan.

Een voorbeeld van putvormige corrosie tengevolge van MIC in een koelwaterleiding is weergegeven in figuur 3.11. De aantasting is niet homogeen en daardoor ontstaan anodische en kathodische gebieden. Bij het corrosieproces worden corrosieproducten gevormd door het oplossen van het metaal. Hierdoor wordt de vervuiling meer heterogeen. Deze producten kunnen het metaal beschermen tegen verdergaande corrosie. De mate van bescherming hangt af of deze passieve film zich aan het oppervlak hecht, blijft zitten bij stroming en zich opnieuw vormt bij een beschadiging. Biologische groei in bijvoorbeeld een watersysteem kan men niet voorkomen. Er wordt immers altijd gewerkt met omgevingslucht en water, dat door bacteriën besmet is. Ook vanuit het proces kan besmetting plaatsvinden.



figuur 3.11 Putvormige corrosie in een koelwaterleiding tengevolge van MIC

Het gebruik van bijvoorbeeld waterstofperoxide en vooral ozon zijn mogelijkheden om biologische corrosie te beperken, omdat deze zeer sterke desinfectantia zijn. Voor het doden van de beruchte *Legionella* bacterie is ozon bijvoorbeeld zeer effectief. Voordelen van het gebruik van ozon ter bestrijding van MIC zijn:

- ▶ Hoge werkzaamheid ook bij lage concentraties en bij elke pH-waarde, zodoende weinig corrosie;
- ▶ geen micro-biologische weerstanden;
- ▶ geen legionellabesmetting;
- ▶ lage exploitatiekosten;
- ▶ zeer milieuvriendelijk, geen ongewenste bijproducten.

Het gebruik van ozon kent echter ook nadelen waaronder:

- ▶ Lage halfwaardetijd;
- ▶ slechte oplosbaarheid in water.

Van de vele vormen van microbiologisch geïnitieerde corrosie worden hier twee vormen genoemd [35]:

- ▶ *Corrosie van staal door zwavelbacteriën*
Zwavelbacteriën zijn aërobe bacteriën. Deze bacteriën oxideren het element zwavel en zwavelverbindingen naar zwavelzuur. Het zwavelzuur tast het staal aan.
- ▶ *Corrosie van staal door sulfaat reducerende bacteriën*
Sulfaatreducerende bacteriën komen veel voor in de grond, in slib en in oppervlaktewater en zeewater. Ze gedijen alleen bij de aanwezigheid van sulfaat of sulfiet en onder anaërobe omstandigheden. Bij anaërobe omstandigheden kan het water overigens gewoon belucht zijn omdat de anaërobe bacteriën bedekt kunnen zijn met een 'gewone' aërobe biofilm. Een biofilm is een complex

geheel met vele soorten micro-organismen die elkaar in stand houden.

Samengevat wordt het waterstof dat ontstaat aan de kathode door zuurstof dat door de bacteriën wordt gemaakt opgebruikt, waardoor ruimte is voor nieuwe kathodische corrosiereacties.

Kenmerkend bij deze veel voorkomende vorm van micro-biologisch geïnitieerde corrosie is het ontstaan van ijzer-sulfide, dat een zwarte laag doet ontstaan.

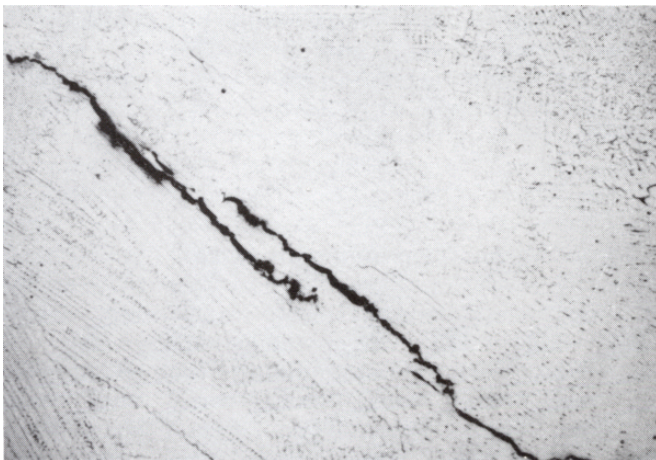
Maatregelen om biologische corrosie tegen te gaan:

- ▶ Regelmatig reinigen en inspecteren van het systeem;
- ▶ corrosie-inhibitoren aan het medium toevoegen;
- ▶ het toevoegen van waterstofperoxide of ozon aan het medium.

3.3 *Scheurvorming en verbrossing tengevolge van het lassen*

3.3.1 *Warmscheuren*

Austenitische lastoevoegmaterialen, die op grond van hun chemische samenstelling een volledig austenitische structuur bezitten, staan in de lastechniek bekend als scheurgevoelig. Dit geldt ook voor de WBZ van volaustenitische basismaterialen. Het lassen met volaustenitisch lastoevoegmateriaal kan vooral in dit opzicht moeilijkheden opleveren door de vorming van warmscheuren. Warscheuren ontstaan bij hoge temperatuur tijdens het stollen van het lasmetaal (zie figuur 3.12).



figuur 3.12 Warscheuren in type 1.4550 (AISI 347) lasmetaal

Wanneer roestvaste staalsoorten met een volledig austenitische structuur gelast worden, zijn deze gevoelig voor warmscheuren in het lasmetaal én de WBZ. Warscheuren die in het lasmetaal worden gevormd, zijn over het algemeen stolscheuren of solidification cracks en ontstaan als de krimpspanningen een kritische waarde overschrijden. Smeltscheuren (liquation cracks) worden over het algemeen in de WBZ gevormd, soms worden ze echter ook waargenomen in het lasmetaal als er in meerdere lagen gelast is.

Smeltscheuren ontstaan doordat er laagsmeltende vloeistoffilms op de korrelgrenzen wordt gevormd. Als austenitische roestvaste staalsoorten worden gelast met een volaustenitisch toevoegmateriaal, dan is het risico op warmscheuren groot. Indien echter in het austenitisch lasmetaal enkele procenten delta-ferriet (2-6%) aanwezig is, dan vermindert de scheurgevoeligheid aanzienlijk. Bij het lassen van typen 1.4301 (AISI 304) en 1.4401 (AISI 316) treedt daarom warmscheuren vrijwel niet op.

Met niobium (Nb) gestabiliseerde basis- en toevoegmaterialen blijken eveneens gevoelig te zijn voor stolscheuren, zelfs als er ferriet aanwezig is in het lasmetaal. Dit geldt

eveneens voor de WBZ van Nb- en Ti-gestabiliseerd austenitisch roestvast staal. Diverse elementen in het lasmetaal zoals P, S, O, Si en Nb zijn nadelig vanwege de (grote) kans op het ontstaan van stolscheuren.

Om problemen te voorkomen moeten daarom, naast een goed gekozen lasuitvoering, tevens hoge eisen aan de chemische samenstelling en het ferrietgehalte van basis- en lastoevoegmateriaal worden gesteld.

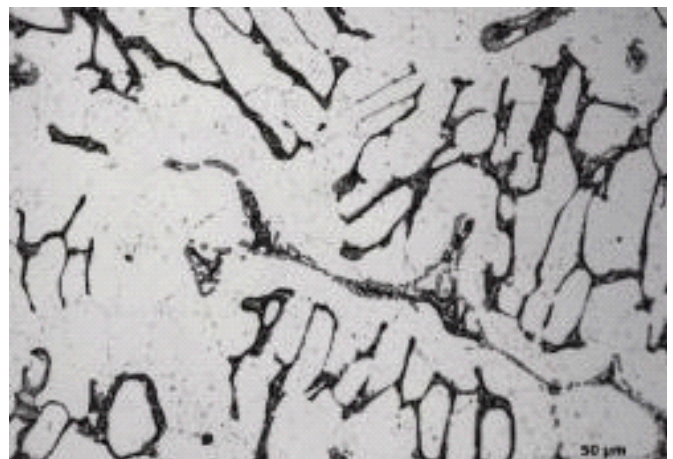
Volaustenitische kwaliteiten zoals type 1.4845 (AISI 310) zijn zeer gevoelig voor het optreden van warmscheuren. Aan het lasmetaal wordt vaak 3-8% Mn toegevoegd om deze scheurvorming te onderdrukken.

Maatregelen om warmscheuren te voorkomen:

- ▶ Zorgen dat het lasmetaal altijd enige procenten delta-ferriet bevat;
- ▶ P-, S-, O- en Si-gehalte van het lasmetaal zo laag mogelijk houden (bijv. $\%P + \%S < 0,020$);
- ▶ toevoegen van Mn aan het lasmetaal bij het lassen van volaustenitische soorten;
- ▶ bij Nb-houdende soorten: eisen stellen aan C- en Nb-gehalte, alsook aan de Nb/C.

3.3.2 *Verbrossing door sigma-fase*

Worden austenitische roestvaste staalsoorten, zoals 1.4845 (AISI 310S), 1.4404 (AISI 316L), 1.4449 (AISI 317) en de gestabiliseerde soorten 1.4541 (AISI 321) en 1.4550 (AISI 347), verhit in het temperatuurgebied dat ligt tussen ca. 450 en 850 °C, dan kan een intermetallische verbinding van ijzer en chroom ontstaan (FeCr), die sigma-fase wordt genoemd (zie figuur 3.13). Echter ook de ferritische roestvaste staalsoorten zijn gevoelig voor de vorming van sigma-fase. Sigma-fase treedt met name op bij percentages chroom > 16%. Ferrietvormers zoals Mo, Si verhogen de gevoeligheid voor sigma-fase vorming.



figuur 3.13 Sigma-fase vorming in 1.4404 [13]

Deze intermetallische verbinding is bij kamertemperatuur hard en bros en vermindert de taaiheid van het materiaal sterk. Ook bij ferritische chroomstaalsoorten kan deze sigma-fase voorkomen. De neiging tot uitscheiden wordt groter naarmate het Cr-gehalte hoger is. De molybdeenhoudende soorten zijn gevoeliger voor de vorming van deze fase, ditzelfde geldt voor kwaliteiten waaraan Si, Ti en Nb zijn toegevoegd.

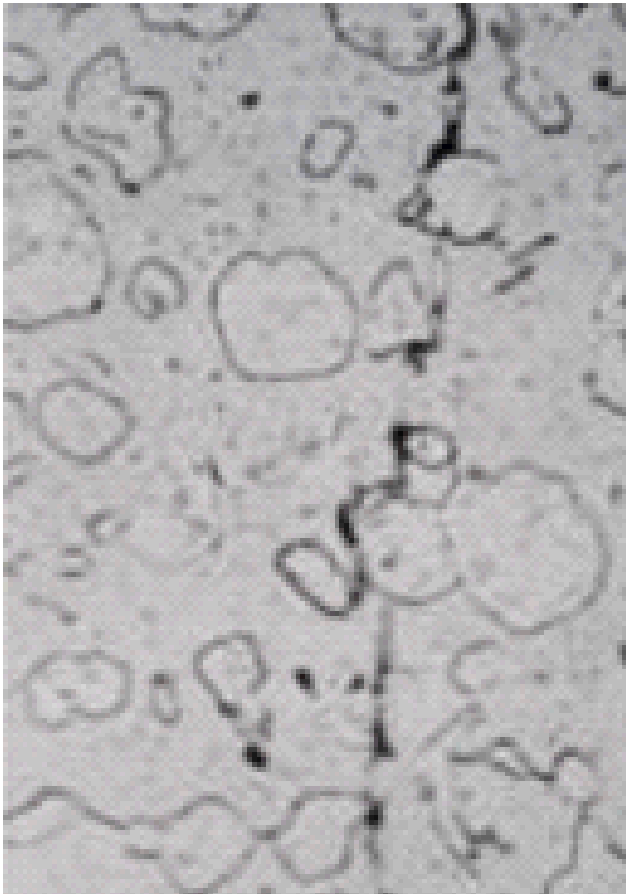
De vorming treedt bij soorten zonder molybdeen pas op na een langdurig verblijf in het kritieke temperatuurgebied. Komt in de austeniet delta-ferriet voor, dan kan bij soorten als 1.4404 de sigma-fase in het ferriet optreden na een relatief kort verblijf op hoge temperatuur. In bepaalde soorten met een hoog gehalte aan ferrietvormende elementen (bijvoorbeeld het hoog-Mo-houdende AISI 317) kan de sigma-fase al ontstaan gedurende de warmtecyclus bij het lassen, vooral bij het lassen in meerdere lagen.

De taaiheid van het materiaal neemt, naarmate het gehalte aan sigma-fase toeneemt, bij kamertemperatuur beduidend af, zodat er (zeer) lage kerfslagwaarden gevonden kunnen worden.

De ongunstige uitwerking van sigma-fase kan door een warmtebehandeling teniet worden gedaan, maar dit soort warmtebehandelingen wordt in de praktijk zelden uitgevoerd. Het verdient aanbeveling de hiervoor gevoelige staal-soorten te lassen met een relatief geringe warmte-inbreng. In hoofdstuk 4 zal eveneens aandacht worden geschonken aan de vorming van sigma-fase en andere precipitaten in Cr- en CrNi-staal. Vooral bij bepaalde hoog Cr-houdende hittevast staalsoorten moet met het uitscheidingsgedrag van deze precipitaten rekening worden gehouden. Ook duplex stalen zijn gevoelig voor deze sigma-fase verbrossing.

3.3.3 "475 °C"-brosheid

"475 °C"-brosheid komt voor bij staalsoorten met een chroomgehalte boven de 13%. Vooral ferritisch chroomstaal en duplex roestvast staal zijn hier gevoelig voor als ze worden verhit tussen de 400 en 550 °C. In dit temperatuurgebied vormt zich een uitscheiding (precipitatie) op de kristalgrenzen, waardoor het staal zeer bros kan worden (zie figuur 3.14).



figuur 3.14 "475 °C"-brosheid in 1.4002 [13]. Carbide uitscheidingen op de kristalgrenzen

De precipitatie wordt het snelst gevormd bij 475 °C vandaar de naamgeving "475 °C"-brosheid. Het is in eerste instantie zaak een roestvast staal te kiezen die bij een bedrijfstemperatuur in het betreffende gebied niet al te gevoelig is voor de verbrossing (bijvoorbeeld soorten met een wat lager Cr-gehalte). Bij het lassen van staalsoorten die wel gevoelig zijn, moet het kritieke temperatuurgebied (400 en 550 °C) zo snel mogelijk worden doorlopen. De eigenschappen van het staal, dat tengevolge van deze uitscheidingen verbrost is, kunnen worden verbeterd door het materiaal een warmtebehandeling te geven. Lasproces-

sen die een beperkte warmte-inbreng geven, bijvoorbeeld het laserlassen, verdienen de voorkeur.

3.3.4 Korrelgroei

Als ferritisch rvs verhit wordt boven 900 °C kan ernstige korrelgroei en daarmee verbrossing optreden.

Dit kan dus gebeuren bij bedrijfstemperaturen in dit temperatuurgebied, maar ook bij het lassen. Bij het lassen zal korrelgroei optreden in dat deel van de warmte beïnvloede zone dat verhit is geweest boven 900 °C.

Over het algemeen is de WBZ bij het lassen de meest kwetsbare zone voor korrelgroei bij ferritische roestvast staalsoorten. Wordt gebruik gemaakt van toevoegmateriaal met dezelfde chemische samenstelling als die van het basismateriaal, dan treedt echter ook in de las korrelgroei op. Om deze reden wordt veelal voor het lassen van ferritisch chroomstaal een austenitisch toevoegmateriaal gebruikt van het type 1.4833 (AISI 309S) of AISI 329.

Let er wel op dat bij het lassen met austenitisch lastoevoegmateriaal problemen op kunnen treden als de las aan wisselende temperaturen wordt blootgesteld.

De korrelgroei in de WBZ kan echter hiermee niet worden voorkomen. Omdat de structuur tot het smeltpunt ferritisch blijft, kan deze niet worden verfijnd door een warmtebehandeling. Aan chroomstaal wordt soms Ti, Nb (of een combinatie van beiden), Al of Ni toegevoegd om de korrelgroei te remmen.

3.3.5 Koudscheuren

Koudscheuren kunnen ontstaan in materialen als er aan de volgende voorwaarden wordt voldaan:

- In het materiaal moet zich opgeloste waterstof bevinden.
- Het materiaal dient een scheurgevoelige microstructuur te hebben.
- Er moeten hoge (trek)spanningen in het materiaal aanwezig zijn.
- De temperatuur moet onder de 150 °C zijn.

Als er een van deze voorwaarden ontbreekt, dan treden er ook geen koudscheuren op. Het bovenstaande geeft aan dat koudscheuren pas ontstaan als het materiaal is afgekoeld. Soms kunnen zelfs uren of dagen na het lassen nog koudscheuren in het lasmetaal ontstaan. De kans op koudscheuren neemt in het algemeen toe bij:

- een hoger koolstofgehalte en een hoger gehalte aan legeringselementen;
- een grotere materiaaldikte;
- hogere krimpkrachten (krimphinder);
- een snelle afkoeling van de las;
- een lage(re) temperatuur van de lasverbinding (voorwarm /tussenlaagtemperatuur);
- toenemende hoeveelheid diffundeerbare waterstof.

Van alle roestvast staalsoorten is alleen martensitisch roestvast staal gevoelig voor het ontstaan van koudscheuren.

De martensitische chroomstaalsoorten moeten worden beschouwd als moeilijk lasbare roestvast staalsoorten. Ze worden onder andere voor snijgereedschappen en matrijzen toegepast. Er zijn eveneens toepassingen in de olie-industrie, de (stoom)ketelbouw en de vliegtuigbouw waar 12% Cr-staal voor gelaste onderdelen uit pijp of plaat wordt gebruikt.

Martensitische roestvast staalsoorten met minder dan 0,15% C kunnen met goede voorzorgsmaatregelen nog wel worden gelast, maar voorwarmen en gloeien na het lassen is meestal noodzakelijk om scheurvorming te voorkomen. Het lassen van de varianten met hoge C-gehalten moet met de uiterste zorg geschieden en het liefst worden vermeden.

Bij niet of onvoldoende voorwarmen is de kans groot dat na het lassen van martensitisch chroomstaal koudscheuren ontstaan, voornamelijk in de WBZ. Ook kan vertraagde scheurvorming optreden als gevolg van de aanwezigheid van waterstof, zelfs na dagen.

Als te hoog wordt voorgewarmd, kan er restausteniet in

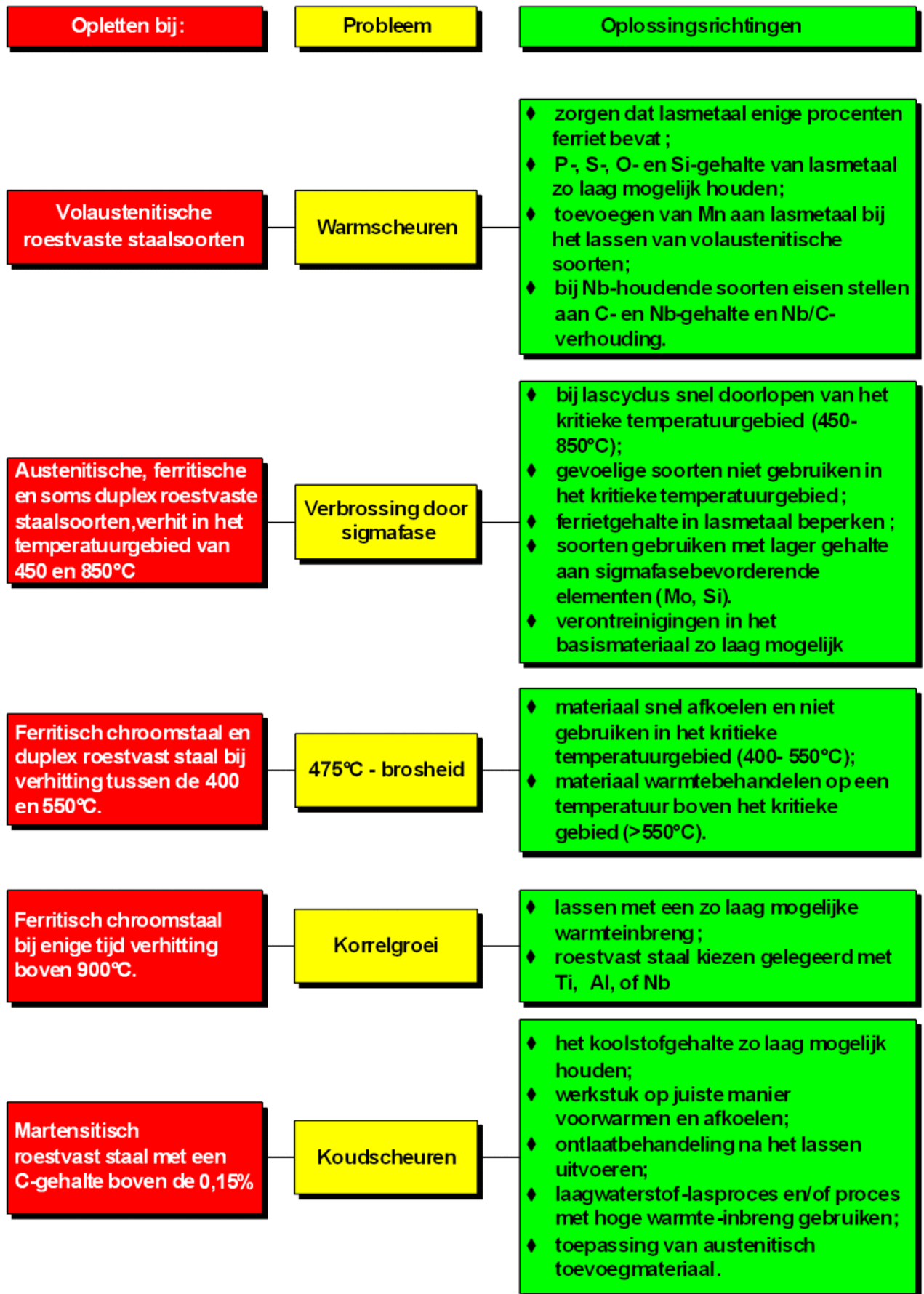
de las en de overgangszone achterblijven, dat zich na het spanningsarm gloeien kan omzetten in harde martensiet. Alleen als hoge eisen worden gesteld aan de sterkte of de fysische eigenschappen van de lasverbindingen worden lastoevoegmaterialen met ongeveer dezelfde chemische samenstelling als het basismateriaal toegepast. In alle andere gevallen worden toevoegmaterialen van het type 1.4832 (AISI 309L) of hoog Ni-houdende materialen aanbevolen. Door gebruik van dit relatief taaie toevoegmateriaal is de las in staat de optredende krimpspanning gelijkmatiger te verdelen.

3.3.6 Scheurvorming en verbrossing als functie van het Cr- en Ni-equivalent

Er is in het voorgaande al op gewezen dat bepaalde roestvaste staalsoorten en lastoevoegmaterialen gevoeliger zijn voor scheurvorming of verbrossing dan andere. In hoofdstuk 9 zal bij de bespreking van het Schaeffler-(De Long)-diagram nog verder worden besproken hoe het ontstaan van de eerder genoemde verschijnselen kan worden voorspeld op grond van het Cr- en Ni-equivalent van het opgemengde lasmetaal.

3.3.7 Problemen en oplossingsrichtingen bij het lassen van roestvaste staalsoorten

In figuur 3.15 is een overzicht gegeven van de problemen en de daarbij behorende oplossingsrichtingen die in dit hoofdstuk zijn besproken.



figuur 3.15 Overzicht van de beschreven problemen en de oplosrichtingen hiervoor

Hoofdstuk 4

Precipitaten in roest- en hittevast staal

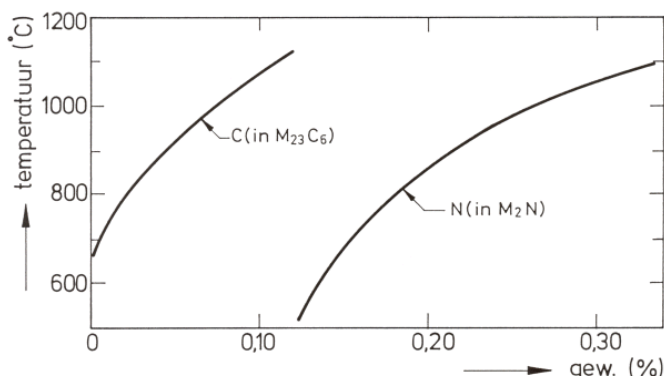
4.1 Inleiding

Bij de verschillende verwerkingsprocessen, maar ook bij het gebruik op hoge temperatuur, krijgt men bij roestvast staal te maken met precipitaten. In de meeste gevallen gaat het hierbij om carbiden en nitriden (of een mengvorm hiervan) en intermetallische fasen. Veelal hebben precipitaten een ongunstige uitwerking op de eigenschappen van roestvast staal; bij precipitatieharding echter maken we bewust gebruik van precipitaten om de eigenschappen van roestvast staal te verbeteren. In dit hoofdstuk wordt een algemeen theoretische achtergrond van precipitaten gegeven. Elders in deze publicatie zijn meer praktische facetten van precipitaten belicht:

- in hoofdstuk 3: effecten op corrosie en verbrossing;
- in hoofdstuk 10: oplossing van precipitaten bij de warmtebehandeling;
- in hoofdstuk 12: beproeving op aanwezigheid van precipitaten.

4.2 Carbiden en nitriden

Carbiden en nitriden in roestvast staal ontstaan als gevolg van de teruglopende oplosbaarheid van de elementen C en N bij daling van de temperatuur (zie figuur 4.1). Uitscheiding bij een bepaalde temperatuur is mogelijk, als de opgeloste hoeveelheid koolstof of stikstof groter is dan de oplosbaarheid bij die temperatuur.



figuur 4.1 Oplosbaarheid van C en N in austenitisch staal

4.2.1 Carbiden en nitriden in staal van het type 18Cr-10Ni-(Mo)

De carbiden en nitriden in de ongestabiliseerde austenitische Cr-Ni-stalen hebben respectievelijk de formule $M_{23}C_6$ en M_2N , waarin M uit Fe, Cr en Ni kan bestaan. De carbiden zullen zich in het temperatuurgebied 450-800 °C bij voorkeur uitscheiden op de kristalgrenzen. Is er naast austeniet ook ferriet aanwezig, dan zullen de carbiden, behalve op de korrelgrenzen, ook uitscheiden in het ferriet. De aanwezigheid van ferriet voorkomt de uitscheiding langs de korrelgrenzen echter niet.

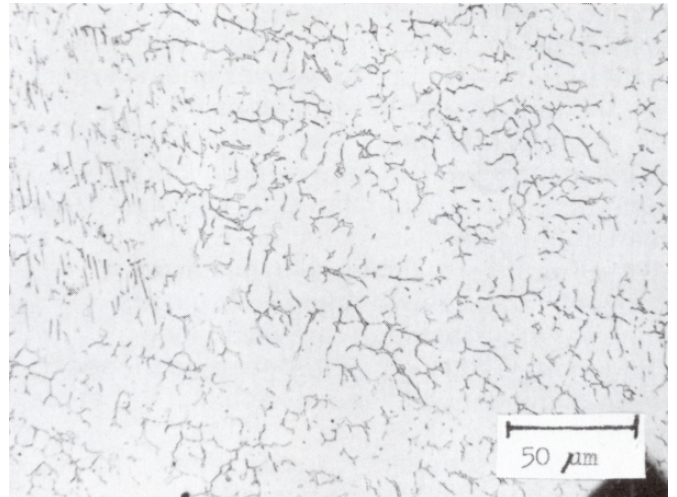
Indien voldoende koolstof aanwezig is, kan een complete film van carbiden langs de korrelgrenzen ontstaan. Bij hoge koolstofgehalten (0,08-0,15%) kan deze film in zeer korte tijd worden gevormd, bijvoorbeeld in lasverbindingen al tijdens afkoeling vanaf de smelttemperatuur. Bij lage koolstofgehalten kan zich echter geen doorlopende film vormen, omdat onvoldoende koolstof in het staal aanwezig is.

In feite kan de uitscheiding van carbiden en nitriden, als functie van temperatuur en tijd, in uitscheidingsdiagrammen worden weergegeven (zie hiervoor ook § 4.3.3).

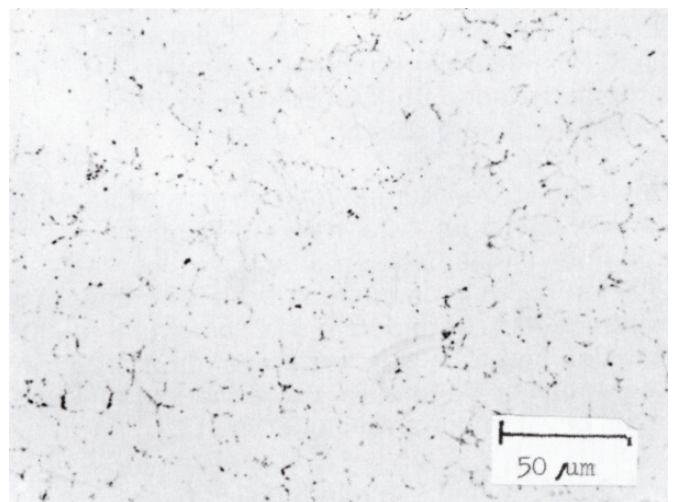
Chroomcarbiden op de korrelgrenzen verminderen de ductiliteit (echter minder drastisch dan bij sigma-fase) en maken

het staal of het lasmetaal tevens gevoelig voor interkristallijne corrosie (zie hiervoor ook figuur 3.2 in hoofdstuk 3). Doordat de oplosbaarheid van N in austeniet groter is dan van C, verloopt de uitscheiding van nitriden veel trager dan van carbiden. Pas wanneer het staal meer dan 0,15% N bevat, moet beneden 650 °C rekening worden gehouden met de uitscheiding van M_2N .

Figuren 4.2 en 4.3 tonen ter illustratie een paar structuurfoto's van 1.4404 (AISI 316L - lasmetaal). Figuur 4.2 is een opname van lasmetaal met enige procenten ferriet (het ferriet in de austenitische grondmassa is grijs aangeëtst). In figuur 4.3 zijn carbiden in 1.4404-lasmetaal na 500 uur gloeien bij 550 °C te zien (de zwarte puntjes op de foto zijn de carbiden; het lasmetaal bevat in dit geval ca. 0,02% C).



figuur 4.2 Ferriet in 1.4404 (AISI 316L) lasmetaal; ongeglööid (etsmiddel volgens Kalling)



figuur 4.3 Carbiden in 1.4404 (AISI 316L) lasmetaal; ge-glööid: 500 uur bij 550 °C (etsmiddel: verdunde Murakami oplossing)

4.3 Intermetallische fasen

Dit zijn uitscheidingen waarin meerdere metallische elementen voorkomen.

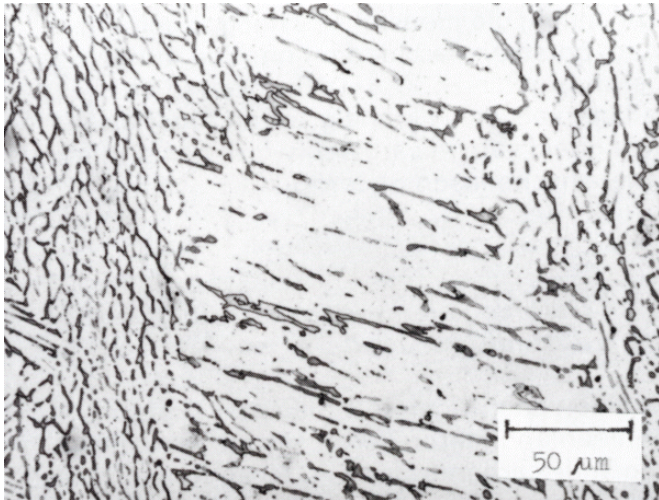
Uitscheidingen bij een bepaalde temperatuur kunnen in principe ontstaan als de opgeloste hoeveelheid koolstof en/of stikstof groter is dan de maximale oplosbaarheid bij die temperatuur.

De belangrijkste intermetallische fasen in roest- en hittevast staal zijn:

- sigma-fase;
- laves-fase;
- chi-fase;
- gamma prime-fase.

4.3.1 Sigma-fase (σ)

Sigma-fase (σ) is een intermetallische fase van het type FeCr, die ongeveer uit gelijke hoeveelheden Fe en Cr bestaat. Er kunnen echter ook Ni, Mo, Mn en Si in zijn opgelost. De sigma-fase ontstaat in ferritisch Cr-staal en in austenitisch Cr-Ni-staal tussen 450 en 850 °C. De precipitatiesnelheid voor sigma-fase is bij kwaliteit 1.4833 en 1.4845 het grootst bij 850 °C en bij de typen 1.4401, 1.4404, AISI 317, 1.4541 en 1.4550 bij 750 °C. In austenitische Cr-Ni-stalen verloopt de vorming meestal vrij traag. In austenitisch lasmetaal dat ferriet bevat, wordt sigma-fase veel sneller gevormd, omdat de fase eerder ontstaat uit ferriet dan uit austeniet. Figuur 4.4 toont sigma-fase in 1.4404 (AISI 316) lasmetaal.



figuur 4.4 Sigma-fase in 1.4404 (AISI 316L)-lasmetaal; gegloeid: 24 uur bij 800 °C (elektrolytisch geëet in 10% NaCN-oplossing)

Het effect van legeringselementen

De ferriet-stabiliserende elementen (Mo, Si, Nb, Ti en Al) blijken dan ook tevens elementen te zijn, die de kans op sigma-fasevorming vergroten. De werking van deze elementen is tweevoudig. Ze vergroten zowel de vormingssnelheid als de hoeveelheid sigma-fase. De elementen C, N en Ni echter vertragen en verminderen de sigma-fasevorming.

Voor austenitische staalsoorten zonder Nb, Ti en N, heeft men als vuistregel de volgende voorwaarde opgesteld voor het realiseren van een austenitische structuur zonder ferriet:

$$1,7 \times \%Ni + 0,6 \times (\%Mn - 1) + 16 \times \%C - 4 \times (\%Mo - 1) - 3 \times (\%Si - 1) \geq 0$$

Geen ferriet betekent meestal een geringere kans op sigma-fase vorming. Zie voor effecten van legeringselementen op sigma-fase ook onder § 4.3.3.

Vorming van sigma-fase in de praktijk en effecten op de eigenschappen

Voor de meeste austenitische staalsoorten geldt dat de afkoelsnelheden na gieten, lassen, smeden en walsen meestal zo groot zijn, dat het temperatuurgebied waarin σ -vorming plaatsvindt zo snel wordt doorlopen, dat geen of slechts weinig precipitatie optreedt. Is de afkoelsnelheid echter lager, bijvoorbeeld bij het lassen in meerdere lagen of als een gloeiing wordt uitgevoerd in het kritieke temperatuurgebied, dan kunnen in verschillende staaltypen aanzienlijke hoeveelheden sigma-fase worden gevormd.

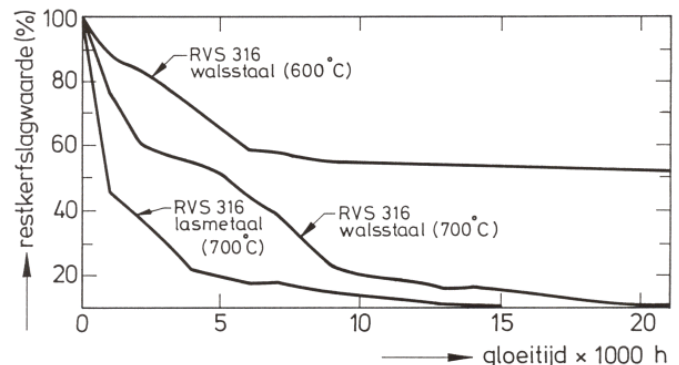
Een foto van sigma-fase in 1.4404 lasmetaal na 24 uur gloeien bij 800 °C is te zien in figuur 4.4. Door de gloeiing bij 800 °C ontstaat al in vrij korte tijd sigma-fase uit ferriet volgens:

ferriet $\rightarrow$ austeniet + sigma-fase

Door de aanwezigheid van sigma-fase neemt de hardheid toe. De ductiliteit - vooral bij lage temperatuur - en de corrosievastheid (in oxiderende milieus) nemen af. De invloed

van sigma-fase op de mechanische eigenschappen hangt vooral bij kleine percentages in sterke mate af van de verdeling en de grootte van het precipitaat. Wanneer de sigma-fase deeltjes zeer klein en regelmatig zijn verdeeld, kan sigma-fase zelfs tot een verhoging van de treksterkte en rekgrens leiden, maar met een verlaging van de ductiliteit.

Figuur 4.5 geeft een indruk van de verbrossing van type 1.4401 na een verblijf van maximaal 20.000 uur op respectievelijk 600 en 700 °C. Uit deze figuur blijkt dat ferriethoudend 1.4401-lasmetaal al na relatief korte tijd op 700 °C een lage kerfslagwaarde krijgt. Het blijkt ook dat het brosvan de temperatuur afhangt en dat walsstaal veel minder verbrost dan lasmetaal.



figuur 4.5 Verbrossing in 1.4401 basis- en lasmetaal

4.3.2 Andere intermetallische fasen

Laves-fase (Fe_2Mo)

De laves-fase is een Fe-Mo-verbinding van het type Fe_2Mo , die in Mo-houdend staal kan ontstaan. Soms bevat deze fase ook nog andere legeringselementen. De vorming van de laves-fase geschiedt meestal in een lager temperatuurgebied dan van de vorming van de sigma-fase. De vormingssnelheid neemt toe naarmate er meer Mo, enz. in het staal voorkomen.

Chi-fase (χ)

Bij kortstondig verblijf op ± 800 °C wordt op de korrelgrenzen van duplex roestvast staal al de brosse chi-fase uitgescheiden. Dit betreft een ongewenst ijzer-chroommolybdeenprecipitaat. Deze chi-fase is rijk aan chroom ($\pm 25\%$) en aan molybdeen ($\pm 20\%$). Voor de vorming van deze precipitaten wordt de matrix plaatselijk 'ontchroomd' en daalt ook het molybdeengehalte. Het resultaat hiervan is een aanzienlijke achteruitgang van de kerfslagwaarde en de corrosievastheid.

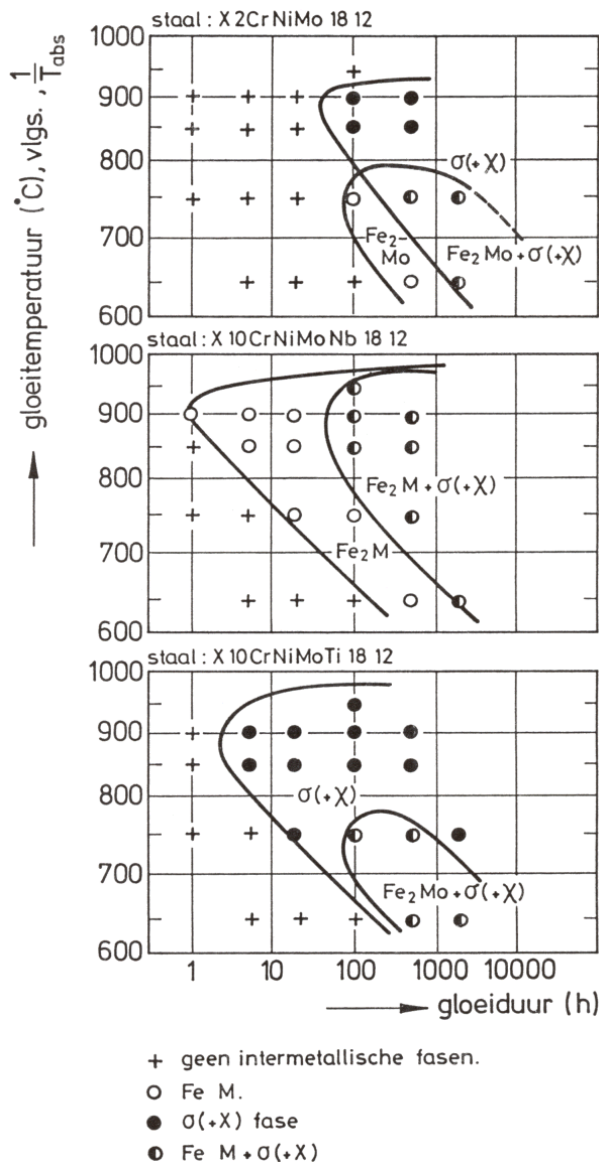
Gamma prime-fase (γ')

De gamma prime-fase is een fase van het type Ni_3Al of van de vorm $(Ni,Fe)_3(Ti,Al)$. Deze uitscheiding is, in tegenstelling tot de meeste andere intermetallische fasen, een gewenst precipitaat dat de sterkte verhoogt zonder de taaiheid veel te verlagen. We treffen de gamma prime-fase in grote hoeveelheden aan in precipitatiehardende superlegeringen, maar ook in bijvoorbeeld 1.4876 (Alloy 800 [X10NiCrAlTi32 20]). Om het precipitaat optimaal werkzaam te doen zijn, moet het materiaal een aangepaste warmtebehandeling ondergaan, het zogenoemde precipitatieharden.

4.3.3 Uitscheidingsdiagrammen

In dit soort diagrammen kunnen als functie van temperatuur en tijd de vormingsgebieden voor verschillende precipitaten worden weergegeven.

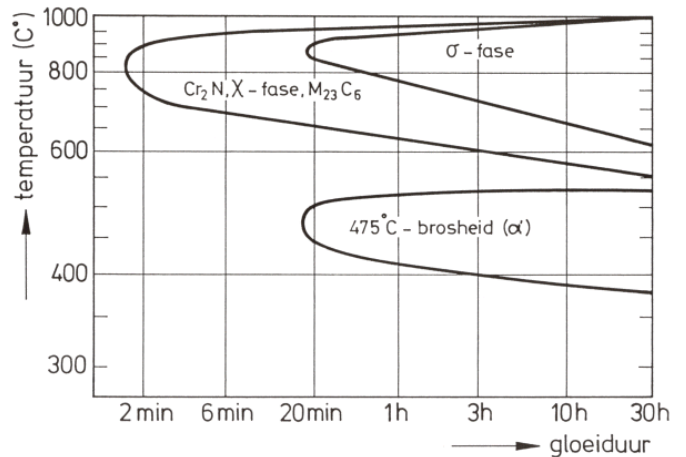
Figuur 4.6 geeft voor drie Mo-houdende austenitische staalsoorten het vormingsgebied aan voor verschillende intermetallische fasen. In het ongestabiliseerde staal (bovenste figuur) is boven ca. 800 °C alleen sigma-fase aanwezig en in geringe mate chi-fase. Onder 800 °C begint de uitscheiding met de vorming van de Fe_2Mo -fase bij kortere tijden.



figuur 4.6 Uitscheidingsdiagrammen austenitisch Cr-Ni-Mo-staal [14]

Door niobium (middelste diagram) wordt het gebied van de sigma-fasevorming naar een hogere temperatuur verschoven. In het staal met Nb wordt de vorming van de laves-fase versterkt. In het hele temperatuurgebied begint de laves-fase tevens eerder uit te scheiden dan sigma-fase. Titaan (onderste diagram in figuur 4.6) bevordert primair de vorming van sigma-fase. Door dit element wordt het ontstaan van de laves-fase teruggedrongen.

Figuur 4.7 geeft een indruk van de vorming van precipitaten in een duplex roestvast staal van het type 1.4462. In het temperatuurgebied 550-950 °C treffen we naast carbiden en nitriden de intermetallische fasen chi- en sigma-fase aan. Korte verblijftijden in dit temperatuurgebied kunnen al tot uitscheidingen leiden, die de daling van de taaiheid en een stijging van de hardheid veroorzaken. Tussen 450 en 550 °C is in figuur 4.7 het gebied van de 475 °C-brosheid aanwezig. Deze verbrossing is te wijten aan de precipitatie van ontmengde zones van Cr-rijke ferriet (α' -fase) langs de korrelgrenzen. Hoewel hier besproken bij de intermetallische fasen is α' -fase geen intermetallische verbinding. Er ontstaat meer naarmate het Cr-gehalte van het staal of het lasmetaal toeneemt.



figuur 4.7 Uitscheidingsdiagram duplex roestvast staal 1.4462 (X2CrNiMoN 22 5 3) [15]

Voor bij de conventionele Cr-stalen met meer dan 16% Cr en bij duplex roestvast staal moet daar terdege rekening mee worden gehouden. Door de 475 °C-brosheid kan de kwaliteit 1.4462 (X2CrNiMoN22 5 3) waaraan gelast is en vele andere duplex roestvast staalsoorten maar tot een bedrijfstemperatuur van maximaal 280 °C worden gebruikt. Dit blijkt misschien niet uit figuur 4.7 (die geldt voor basis-materiaal), maar in het diagram voor lasmetaal is het 475 °C-brosheidgebied naar kortere tijden en lagere temperaturen verschoven.

Bij de superferrietten kan de brosheid worden teruggedrongen door zeer lage gehalten aan C en N toe te laten.

Hoofdstuk 5

Kenmerkende gegevens in verband met verwerking en toepassing van de meest gebruikte typen roestvast staal

5.1 Algemeen

Van de belangrijkste typen roestvast en hittevast staal, die in de tabellen 2.1a t/m 2.4b van hoofdstuk 2 voorkomen, worden enige eigenschappen behandeld, die voor de verwerking en de toepassing van belang kunnen zijn. Wat de warmtebehandeling betreft wordt verwezen naar hoofdstuk 10, terwijl de bewerkbaarheid (verspaanbaarheid) wordt behandeld in hoofdstuk 7. Voor toepassing in veel chemische installaties is de kruipsterkte van het materiaal bepalend en in mindere mate de rekgrens.

In hoofdstuk 2, § 2.4.2 en hierin de figuren 2.2 en 2.3, is al aandacht besteed aan de invloed van de chemische samenstelling op de eigenschappen en welke ontwikkelingsrichtingen hebben plaatsgevonden om materialen met betere gebruiks- en vaak ook betere verwerkingseigenschappen te verkrijgen. Hier in het kort nog een opsomming:

- **Stabiliseren met Nb en Ti:**
betere bestendigheid tegen interkristallijne corrosie en hoge-temperatuureigenschappen;
- **lager C-gehalte:**
verbeterde bestendigheid tegen interkristallijne corrosie maar een lagere sterkte;
- **lager C-percentage en toevoeging N:**
beter bestand tegen interkristallijne corrosie + hogere sterkte;
- **hoger C-, Cr- en Si-gehalte:**
betere hoge-temperatuureigenschappen;
- **hoger Mo-gehalte:**
betere weerstand tegen pitting en spleetcorrosie;
- **hoger Cr-, Ni-, Mo- (en Cu-)gehalte:**
betere algemene corrosievastheid en bestendigheid tegen zuren;
- **hoger Cr-, lager Ni-gehalte, meestal Mo: duplex RVS:**
beter bestand tegen chloride-spanningscorrosie, hoge sterkte;
- **hoger N-gehalte:**
weerstand tegen putcorrosie verbeterd;
- **extreem laag C- en N-percentage, hoog Cr-gehalte:**
superferriet = goede algemene corrosievastheid, weinig gevoelig voor spanningscorrosie, goede sterkte.

We zullen ons in § 5.2 ten aanzien van de austenitische roestvaste Cr-Ni-staalsoorten alleen bezig houden met de meer conventionele austenitische soorten (in hoofdstuk 2 ook wel standaardkwaliteiten genoemd). De speciaal geleerde austenitische soorten en duplex roestvast staal zullen in hoofdstuk 8 worden behandeld.

Voor de in § 5.3 beschreven ferritische en martensitische chroomstaalsoorten zal ook alleen een aantal standaardkwaliteiten worden behandeld.

De meer geavanceerde typen als superferrieten en -martensieten zijn eveneens opgenomen in hoofdstuk 8. Wat de chemische samenstelling van de hierna te behandelen roestvaste staalsoorten betreft, wordt verwezen naar tabellen 2.1a t/m 2.4b.

5.2 Austenitische Cr-Ni-staalsoorten

Austenitische Cr-Ni-staalsoorten kent vele varianten. In het algemeen gesproken is de lasbaarheid van de austenitische roestvaste staalkwaliteiten, met name door het ontbreken van hardingsstructuren, goed. De conventionele austenitische Cr-Ni-staalsoorten, zoals de typen AISI 304L, 316L; 321; 347 en 318, kunnen probleemloos met de bekende lasprocessen worden gelast. Het lastoevoegmateriaal moet, afgezien van enkele bijzondere toepassingen, 3 tot 10% ferriet bevatten om het optreden van warmscheuren te

voorkomen. De lasnaadvorm moet zodanig zijn, dat de warmte kan worden afgevoerd; met andere woorden een scherpe V-naad moet worden afgeraden. Een staand deel van 1 tot 1,5 mm is noodzakelijk vanwege de slechte warmtegeleiding van austenitisch roestvast staal. Door onder andere de grote uitzettingscoëfficiënt van dit type staal moet de lasnaad een grotere openingshoek hebben dan bij gelijke toepassing in koolstofstaal. Ook dient een grotere vooropening te worden gekozen en moeten meer en zwaardere hechtlassen worden toegepast. De vooropening kan eenvoudig worden verkregen door stukjes lasdraad van de juiste diameter in de lasnaad te hechten en deze bij het lassen eerst middels slijpen te verwijderen. De hoge elektrische weerstand van austenitische roestvast staal laat niet toe dat een roestvast staal elektrode even hoog in stroom wordt belast als een ongelegeerd staal elektrode. De lasvormingen zijn bij austenitisch roestvast staal relatief groot, omdat austenitisch roestvast staal een lagere warmtegeleiding en een hogere uitzettingscoëfficiënt bezit. Dit geldt voor de in de tabellen 2.2a en b (ASTM/AISI 300-serie) aangegeven austenitische roestvaste staalsoorten. Achtereenvolgens zullen worden behandeld:

- 18/10-typen voor normale corrosievaste toepassingen:
 - conventionele typen zonder Mo (1.4301, 1.4541 en 1.4550);
 - conventionele typen met Mo 1.4401-soorten;
 - een aantal stikstofhoudende typen (1.4318 (AISI 304LN) en 1.4406 (AISI 316LN));
 - soorten met hogere Mo-gehalten (1.4438 typen).
- Typen voor met name hoge-temperatuurgebruik:
 - de zogenoemde H-kwaliteiten*;
 - typen met verbeterde oxidatievastheid (1.4833, 1.4845, 1.4864).
- Een 18/10-soort met verbeterde verspaanbaarheid:
 - type 1.4305.

Type 1.4301 (AISI 304) en 1.4306 (AISI 304L)

Door de combinatie van een aantal zeer gunstige eigenschappen wordt dit type roestvast staal op grote schaal toegepast. Tot de gunstige eigenschappen (zie ook tabel 5.1) behoren onder andere:

- De goede vervormbaarheid in gegloeide toestand ten aanzien van buigen, dieptrekken, forceren en dergelijke. Rekening moet wel worden gehouden met het feit dat vervormingen aanleiding kunnen zijn voor structuurveranderingen, waardoor het materiaal licht magnetisch wordt;
- de goede polijstbaarheid;
- de uitstekende weerstand tegen corrosie in tal van (oxiderende) milieus;
- goede taaiheidseigenschappen bij zeer lage temperaturen.

tabel 5.1 Samenvatting van de eigenschappen van typen 1.4301 (AISI 304) en 1.4306 (AISI 304L)

1.4301 (AISI 304) en 1.4306 (AISI 304L)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	+
hittevastheid	+/-
verspaanbaarheid	-
lasbaarheid	+
sterkte	+
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	+
vervormbaarheid	+
warmtegeleiding	-
elektrische geleiding	-
+ + = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

Een nadeel van deze kwaliteit is onder andere de matige tot slechte verspaanbaarheid, veroorzaakt door de grote taaiheid, slechte warmtegeleiding en grote mate van versteving. Afhankelijk van de dikte en het lasproces is de kwaliteit 1.4301 goed lasbaar. Het koolstofgehalte van

type 1.4301 is maximaal 0,07%. Bij reparatielassen en het lassen van zwaardere werkstukken is de hoeveelheid toegevoerde warmte zo groot, dat er chroomcarbide-uitscheiding kan plaatsvinden (sensivering), wat kan leiden tot interkristallijne corrosie. Of er wel of geen interkristallijne corrosie plaatsvindt, is echter ook afhankelijk van het milieu. Het verdient daarom aanbeveling alle werkstukken van type 1.4301 homogeen of oploosend te gloeien, indien het milieu interkristallijne corrosie kan veroorzaken. Om carbidevorming door het lassen te voorkomen, moet het koolstofgehalte lager zijn dan 0,03%, zoals bij type 1.4306 het geval is. Wanneer typen 1.4301 en 1.4306 langdurig aan bedrijfstemperaturen tussen 450 en 850 °C worden blootgesteld, ontstaan er weer zoveel carbiden, dat er ook dan gevaar voor interkristallijne corrosie bestaat. Onder deze condities genieten daarom de gestabiliseerde roestvaste staaltypen als 1.4541 (AISI 321) of 1.4550 (AISI 347) de voorkeur.

De huidige fabricagemethoden van roestvast staal zijn zo beheersbaar, dat moderne 1.4306 typen vaak een verlaagd koolstofgehalte hebben (0,02 tot 0,01% en soms zelfs nog lager). Hiermede is het probleem van de carbidevorming voor een belangrijk deel opgelost. Deze staalsoorten bevatten echter ook vaak zuurstofbindende elementen, waardoor de lasbaarheid (aanvloeiing) sterk negatief wordt beïnvloed. Dit kan zelfs zo ver gaan, dat er bijvoorbeeld geen goede doorlassingen meer gemaakt kunnen worden door een onvoldoende bevochtiging van de lasnaadklanten.

De typen 1.4301 en 1.4306 vinden veel toepassing in de chemische, levensmiddelen- en olie-industrie voor vaten, verdampers, pijpen, enz. Afgezien van het gevaar van sensivering van type 1.4301 kunnen de materialen zeer goed worden gelast. Als toevoegmateriaal kunnen worden gebruikt 19 9 (L) en 23 12 (L) (zie voor keuze toevoegmaterialen tabel 2.8). Naast deze 1.4301-typen wordt regelmatig type 1.4303 (AISI 305) gebruikt. Dit is een dieptrek-kwaliteit met een wat hoger Ni-gehalte en is daardoor scheur gevoeliger bij het lassen (nikkel vormt met zwavel laagsmeltende eutectica op de korrelgrenzen). De verkrijgbaarheid van dit type is echter problematisch.

Type 1.4541 (AISI 321)

De samenstelling van deze staalsoort komt vrijwel overeen met die van type 1.4301. Het materiaal bevat echter titaan (minstens vijf maal het koolstofgehalte), waardoor de vorming van chroomcarbiden als het materiaal wordt blootgesteld aan hoge temperaturen, zoals bij het lassen, wordt voorkomen. We spreken in dit geval van een gestabiliseerd roestvast staaltipe.

Nadelen van de toevoeging van titaan (zie ook tabel 5.2) zijn onder andere de verminderde polijstbaarheid en enige teruggang in vervormbaarheid ten opzichte van het type 1.4301. Bij verspanen zullen de titaancarbiden extra beitslijtage veroorzaken. Qua corrosieweerstand is deze kwaliteit goed te vergelijken met het type 1.4301. Het toepassingsgebied is dan ook nagenoeg gelijk, met uitzondering van die toepassingen waar hoogglans gepolijste oppervlakken vereist zijn. Sommige instanties (TUV) geven aan dat laag-koolstofhoudende (L)-typen tot maximaal 350 °C mogen worden voorgewarmd, terwijl de gestabiliseerde typen tot 400 °C mogen worden voorgewarmd. De algemene corrosievastheid kan onder bepaalde omstandigheden door titaan ongunstig worden beïnvloed. Daarnaast is het materiaal gevoelig voor "knife line attack" (zie hiervoor ook § 3.2.3).

Toevoegmetalen die met titaan zijn gestabiliseerd voldoen niet goed. De oorzaak is, dat tijdens het lassen ongeveer 80% van het titaan verloren gaat door oxidatie. Om deze reden wordt het toevoegmetaal niet met titaan, maar met niobium gestabiliseerd 19 9 Nb (1.4550). De type 1.4541 kan worden gelast met toevoegmateriaal type 19 9 L (1.4306) of met een 19 9 Nb lastoevoegmateriaal, hoewel bij het gebruik van dit laatste type de kans op warmscheuren toeneemt. Qua sterkte is lastoevoegmateriaal van het type 19 9 L altijd superieur aan het basismateriaal

tabel 5.2 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4541 (AISI 321)

1.4541 (AISI 321)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	+
hittevastheid	+
verspaanbaarheid	+/- → -
lasbaarheid	+
sterkte	+
polijstbaarheid	-
taaiheid lage temperatuur	+
vervormbaarheid	-
warmtegeleiding	-
elektrische geleiding	-
+ + = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

1.4541, ook bij hogere temperatuur toepassingen. Alleen bij toepassingen waar kruip een rol speelt en in sommige corrosieve milieus geniet een 1.4550 de voorkeur, dit wordt dan meestal voorgeschreven.

Type 1.4550 (AISI 347)

Evenals type 1.4541 kan type 1.4550 worden beschouwd als een verbeterd type 1.4301 voor gebruik bij temperaturen tot ca. 400 °C. Als stabiliserend element is niobium toegevoegd in een hoeveelheid van minstens tien maal het koolstofgehalte. De toevoeging van dit element beïnvloedt de corrosievastheid van het materiaal minder dan titaan. Door de korrelverfijnende invloed van niobium is de structuur van type 1.4550 bovendien fijner dan die van type 1.4541, wat resulteert in gunstige mechanische eigenschappen (zie ook tabel 5.3). Het staal is bovendien minder gevoelig voor "knife line attack" (zie hiervoor ook § 3.2.3). Bij type 1.4550 kunnen dezelfde warmtebehandelingen worden toegepast als bij type 1.4541.

Het toevoegmetaal voor het lassen van type 1.4550 kan dezelfde samenstelling hebben als het werkstukmateriaal (19 9 Nb), omdat er van het element niobium - waarvan slechts ongeveer 20% verloren gaat - genoeg in de las terecht komt.

Echter evenals bij het type 1.4541 kan ook toevoegmateriaal van het type 19 9 L (AISI 304L) worden toegepast.

tabel 5.3 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4545 (AISI 347)

1.4550 (AISI 347)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	+ (+)
hittevastheid	+
verspaanbaarheid	+/- → -
lasbaarheid	+
sterkte	+
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	+
vervormbaarheid	+
warmtegeleiding	-
elektrische geleiding	-
+ + = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

Typen 1.4401 (AISI 316) en 1.4404 (AISI 316L)

Door de combinatie van een aantal zeer gunstige eigenschappen wordt dit type roestvast staal op grote schaal toegepast. In vergelijking met de andere Cr-Ni-staalsoorten heeft type 1.4401 een betere corrosievastheid in vooral chloriden bevattende milieus. De toevoeging van molybdeen vermindert of voorkomt zelfs in sommige gevallen het optreden van putcorrosie; ook is het materiaal beperkt bestand tegen zwavelzuur, sulfaathoudend water en zeewater. Door de aanwezigheid van molybdeen heeft dit materiaal bij hoge temperatuur goede kruipeigenschappen.

Tot de overige gunstige eigenschappen in gegloeide toestand (zie ook tabel 5.4) behoren onder andere de goede vervormbaarheid ten aanzien van buigen, dieptrekken, forceren en dergelijke, een goede polijstbaarheid en goede taaiheidseigenschappen bij zeer lage temperaturen. Rekening moet worden gehouden met het feit dat vervormingen aanleiding kunnen zijn voor structuurveranderingen, waardoor het materiaal licht magnetisch wordt, alhoewel in mindere mate dan type 1.4301.

tabel 5.4 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4401 (AISI 316) en 1.4404 (AISI 316L)

1.4401 (AISI 316) en 1.4404 (AISI 316L)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	++
hittevastheid	+
verspaanbaarheid	+/- → -
lasbaarheid	+
sterkte	+ (voor L-typen geldt: - (rekgrens))
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	+
vervormbaarheid	+
warmtegeleiding	-
elektrische geleiding	-
++ = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

Een nadeel van 1.4401 is onder andere de matige tot slechte verspaanbaarheid, die veroorzaakt wordt door de grote taaiheid, slechte warmtegeleiding en een grote mate van versteviging. Voor producten of onderdelen die door verspanen worden geproduceerd, is de toevoeging van Ca tegenwoordig standaard.

Zowel de 1.4401 als de 1.4404 moeten niet toegepast worden op temperaturen hoger dan 650 °C. Type 1.4401 is ook gevoelig voor interkristallijne corrosie. Bij zwaardere lasconstructies of bij een langdurig verblijf tussen 450 en 850 °C moeten deze kwaliteiten eveneens niet toegepast worden. In die gevallen moet aan de gestabiliseerde typen 1.4580 (AISI 316Nb) - minder gangbaar - of 1.4571 (AISI 316Ti) de voorkeur worden gegeven. Ook wordt in deze gevallen wel type 1.4404 (AISI 316L) toegepast.

Zowel type 1.4401 als 1.4404 zijn goed lasbaar. Het lasmetaal is door de aanwezigheid van ferriet niet gevoelig voor warscheuren. Het ferriet is echter wel een initiator voor het ontstaan van sigma-fase. Dit kan geschieden bij meerlagen lassen en als het materiaal langdurig bij hoge temperatuur wordt gebruikt. Als toevoegmateriaal worden over het algemeen 19 12 2 dan wel 19 12 2 L toegepast.

Typen 1.4318 (AISI 304LN) en 1.4406 (AISI 316LN)

Een nadeel van de L-kwaliteiten is de lagere rekgrens. Daar deze waarde bepalend is wanneer op sterkte wordt geconstrueerd, betekent dit, dat roestvaststalen constructies van deze materialen zwaarder moeten worden uitgevoerd. Dit heeft geleid tot het ontwikkelen van stikstofhoudend roestvast staal, zoals typen 1.4318 en 1.4406. Dit zijn staalsoorten met een rekgrens > 270 à 290 N/mm². Deze staaltypen vereisen veelal geen speciale stikstofhoudende toevoegmaterialen.

Lastoevoegmateriaal 19 9 L (AISI 308L) en 19 12 3 L (AISI 316L) gebruikt voor stikstofhoudend roestvast staal, heeft een 0,2%-rekgrens van ongeveer 400 N/mm² en is gelijkwaardig aan het te lassen materiaal.

Door de stabiele austenitische structuur van het te lassen materiaal, kan een normaal toevoegmateriaal bij een grote vermenging met het plaatmateriaal een las met een te laag ferrietgehalte geven, wat in de praktijk een grotere kans op warscheuren zal betekenen. Daarom is het aan te bevelen voor de grondnaden 23 12 L (AISI 309L) toe te passen.

Bij het lassen van I-naden verdient het aanbeveling de eerste laag aan de niet-corrosieve zijde aan te brengen met een bufferelektrode van het type 23 12 L of 23 12 2 L (AISI 309Mo) en de tweede laag aan de corrosieve zijde met een normale elektrode 19 9 L of 19 12 3 L. Ook bij V- en X-naden kan de grondlaag met een bufferelektrode worden gelegd. De resterende vulling en de tegenlaag worden met een elektrode van het type 19 9 L of 19 12 3 L aangebracht.

Typen 1.4438 (AISI 317L) en 1.4439 (AISI 317LN)

De AISI 317 soorten (zie ook tabel 5.5) zijn ontwikkeld omdat type 1.4401 voor extremere condities te pittinggevoelig is. Type 1.4438 heeft een hoger gehalte aan legeringselementen dan type 1.4401. Het hogere chroomgehalte is belangrijk voor de corrosievastheid.

Het lasmetaal moet bij het lassen van 1.4438 en 1.4439 volledig austenitisch zijn en dit vereist dan ook een aangepaste elektrode (19 13 4 N L) of MIG/MAG-draad (13 13 4 N L). Voor het lassen van I-, V-, en X-naden in deze kwaliteiten, zie het laatste stukje onder 1.4318 en 1.4406.

Bij het lassen van I-naden verdient het aanbeveling de eerste laag aan de niet-corrosieve zijde aan te brengen met een bufferelektrode van het type 23 12 L of 23 12 2 L (AISI 309Mo) en de tweede laag aan de corrosieve zijde met een normale elektrode 19 9 L of 19 12 3 L. Ook bij V- en X-naden kan de grondlaag met een bufferelektrode worden gelegd. De resterende vulling en de tegenlaag worden met de elektrode van het type 19 13 4 N L, 19 12 3 L of 19 13 4 N L gelegd.

tabel 5.5 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4438 (AISI 317L) en 1.4439 (AISI 317LN)

1.4438 (AISI 317L) en 1.4439 (AISI 317LN)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	++
hittevastheid	+
verspaanbaarheid	+/- → -
lasbaarheid	+ → +/-
sterkte	+ (voor L-typen geldt: - (rekgrens))
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	+
vervormbaarheid	+
warmtegeleiding	-
elektrische geleiding	-
++ = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

Type 1.4948 (AISI 304H), 1.4919 (AISI 316H), 1.4941 (AISI 321H) en AISI 347H

De aanduiding "H" in deze kwaliteiten slaat op "hoge temperatuur", waarmee wordt aangegeven dat deze roestvaste staalsoorten geschikt zijn voor gebruik op hoge temperaturen. Door het verhoogde koolstofgehalte en ten opzichte van de gangbare soorten een lager Cr-gehalte, een hoger Ni-gehalte en een vaak aangepaste warmtebehandeling, kenmerken deze kwaliteiten zich door betere kruipeigenschappen en zijn ze ongevoeliger voor de uitscheiding van sigma-fase. Voor het lassen van de meeste H-kwaliteiten zijn aangepaste lastoevoegmaterialen in de handel.

Type 1.4828 (AISI 309)

Dit materiaal is door het relatieve hoge gehalte aan chroom en nikkel sterk en taai en wordt tot de hittevlavaste staalsoorten gerekend (zie ook tabel 5.6). Het heeft redelijke kruipeigenschappen en oxidatievastheid. Het staal vindt toepassing bij de vervaardiging van luchtverhitters, warmte-wisselaars, branderonderdelen en andere componenten voor gebruik bij hoge temperatuur. Type 1.4828 is goed lasbaar met type 23 12 L (AISI 309L) toevoegmateriaal.

tabel 5.6 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4828 (AISI 309)

1.4828 (AISI 309)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	++
hittevastheid	+(+)
kruipvastheid	+(+)
verspaanbaarheid	+/- → -
lasbaarheid	+
sterkte	+
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	+
vervormbaarheid	+
warmtegeleiding	-
elektrische geleiding	-
++ = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

Type 1.4845 (AISI 310)

Dit materiaal heeft betere eigenschappen bij hoge temperatuur dan type 1.4828 en is oxidatievast in lucht tot 1100 °C (zie ook tabel 5.7). Door het hoge chroom- en nikkelpercentage is dit materiaal nagenoeg niet gevoelig voor opkoling. Het heeft redelijk goede kruipeigenschappen en de koud- en warmvervormbaarheid is goed. Het staal wordt voor zeer veel doeleinden, waarbij hittevastheid wordt geëist, gebruikt (vooral in de chemische industrie en in olieraffinaderijen). Opgemerkt moet echter worden dat het lasmetaal gevoelig is voor warmscheuren, vooral in de grondlaag, als deze (te) snel afkoelt. Daarom wordt soms voor de grondlaag een toevoegmetaal gebruikt, waarbij in het neergesmolten metaal ferriet voorkomt. Type 1.4841 (AISI 314) is een variant van 1.4845 (AISI 310) met een hoger Si-gehalte; het is daarom beter oxidatiebestendig bij hoge temperatuur, maar ook veel scheurgevoeliger dan type 1.4845.

tabel 5.7 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4845 (AISI 310)

1.4845 (AISI 310)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	++
hittevastheid	++
kruipvastheid	+(+)
verspaanbaarheid	+/- → -
lasbaarheid	+ → +/-
sterkte	+
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	+
vervormbaarheid	+
warmtegeleiding	-
elektrische geleiding	-
++ = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

Type 1.4864 (AISI 330)

Type 1.4864 is een austenitische, corrosievaste staalsoort die een goede kruipsterkte, oxidatievastheid en weerstand tegen opkoling bezit tot 1200 °C, mede door de aanwezigheid van ca. 1,5% Si (zie ook tabel 5.8). Het materiaal is niet gevoelig voor sigma-fasevorming en goed bestand tegen thermische schokken. Door het hoge Ni-gehalte heeft het staal ook een goede weerstand tegen spanningscorrosie in chloridenhoudende milieus. Het wordt veel toegepast in de ovenbouw. Het is goed lasbaar met een toevoegmateriaal van ongeveer dezelfde chemische samenstelling als het werkstukmateriaal.

Type 1.4305 (AISI 303)

Deze staalsoort is speciaal ontwikkeld voor verspanende bewerking, dus daar waar een goede verspaanbaarheid

tabel 5.8 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4864 (AISI 330)

1.4864 (AISI 330)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	++
hittevastheid	++
kruipvastheid	++
verspaanbaarheid	+/- → -
lasbaarheid	+ → +/-
sterkte	+
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	+
vervormbaarheid	+
warmtegeleiding	-
elektrische geleiding	-
++ = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

wordt geëist (zie ook tabel 5.9). Deze wordt verkregen door toevoeging van de elementen zwavel en selen. Door deze toevoegingen gaat echter de mogelijkheid tot vervormen achteruit, terwijl ook de corrosievastheid ongunstig wordt beïnvloed.

Een groot voordeel ten opzichte van de overige austenitische soorten is, dat dit materiaal bij bewegende delen zeer weinig neiging heeft tot vreten. Het vindt toepassing als materiaal voor bouten, moeren, fittingen, draadstangen en naalden van afsluiters. Het is af te raden type 1.4305 te lassen, aangezien lassen bij dit type aanleiding geeft tot poreusheid en scheuren. Indien lassen onvermijdelijk is, moeten basische elektroden en lasdraden worden gebruikt.

tabel 5.9 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4305 (AISI 303)

1.4305 (AISI 303)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	+/-
hittevastheid	+/-
verspaanbaarheid	++
lasbaarheid	--
sterkte	+
polijstbaarheid	+/-
taaiheid lage temperatuur	+
vervormbaarheid	-
warmtegeleiding	-
elektrische geleiding	-
++ = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

5.3 Ferritische en martensitische chroomstaalsoorten

5.3.1 Ferritische chroomstaalsoorten

De lasbaarheid van ferritisch roestvast staal is in het algemeen matig tot redelijk. Rekening moet worden gehouden met korrelgroei en/of uitscheidingen in de warmte beïnvloede zone, waardoor de taaiheid en corrosiebestendigheid afneemt. Om deze redenen verdient het aanbeveling te lassen met een minimale warmte-inbreng en een met titaan gelegeerd type toe te passen Om het verlies aan taaiheid in de warmte beïnvloede zone te compenseren, wordt vaak met austenitisch toevoegmateriaal gelast. Bij dun ferritisch chroomstaal (max. 6 mm) wordt in de praktijk zelden voorgewarmd bij het lassen. Bij dikten > 6 mm wel. Afhankelijk van de dikte, maar vooral van de spanningstoestand van de te lassen constructie moet worden voorgewarmd tussen 50 en 250 °C.

Bij toepassingen die bij hoge temperatuur worden ingezet en waarbij zwavel uit het proces vrijkomt, mag niet gelast worden met een AISI 309L type. Het nikkel in dit type staal (12 tot 14%) kan dan namelijk preferent worden aangetast.

Voor dergelijke toepassingen moet worden gelast met een lastoevoegmateriaal welke een met het basismateriaal overeenkomende chemische samenstelling heeft, of met een lastoevoegmateriaal van het type AISI 329 (25%Cr - 4,5%Ni). De genoemde aantasting treedt namelijk niet op als het nikkelgehalte lager is dan 5%. In de andere gevallen kan probleemloos worden gelast met een AISI 309L lastoevoegmateriaal.

Type 1.4003 (zie ook tabel 5.10)

Door het lage koolstofgehalte is dit materiaal niet hardbaar. Het wordt toegepast bij lasconstructies, waarbij geen warmtebehandeling na het lassen kan worden uitgevoerd. Tijdens het lassen ontstaat namelijk geen of zeer weinig martensiet in de warmte beïnvloede zone. Het toevoegmateriaal dat wordt gebruikt is 23 12 L (AISI 309L). Als een chroomstaalsoort als toevoegmetaal wordt gebruikt, zoals type 1.4016, moet na het lassen worden gegloeid op 700-750 °C.

tabel 5.10 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4003

1.4003	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	+
hittevastheid	+/-
verspaanbaarheid	-
lasbaarheid	+
sterkte	+
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	+/-
vervormbaarheid	+
warmtegeleiding	+/-
elektrische geleiding	+/-
++ = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

Type 1.4016 (AISI 430)

Dit materiaal is één van de belangrijkste ferritische chroomstaalsoorten. De corrosievastheid is minder dan die van de chroom-nikkelstaalsoorten (zie ook tabel 5.11). Het materiaal is ook bestand tegen zwavelhoudende gassen. Bij warm vervormen moet oververhitting worden voorkomen. Type 1.4016 is redelijk lasbaar met lastoevoegmateriaal van het type 22 12H (AISI 309). Wordt met ferritisch toevoegmetaal gelast, dan heeft voorwarmen op 100-200 °C zin om het materiaal een redelijke kerftaaiheid te verlenen. Aansluitend moet worden gegloeid op 750-850 °C om 475 °C-brosheid op te heffen. Smeltlassen moet echter tot een minimum worden beperkt in verband met de optredende korrelgroei direct naast de las, die niet meer door een warmtebehandeling kan worden verholpen. Lasprocessen die een minimale warmte-inbreng geven, verdienen om deze reden de voorkeur. Bij voorkeur geldt dat er beter niet aan dit type

tabel 5.11 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4016 (AISI 430)

1.4016 (AISI 430)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	+/-
hittevastheid	+
verspaanbaarheid	-
lasbaarheid	--
sterkte	+
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	-
vervormbaarheid	-
warmtegeleiding	+/-
elektrische geleiding	+/-
++ = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

gelast wordt, temeer omdat deze kwaliteit gevoelig is voor interkristallijne corrosie. Door de toevoeging van zwavel of seleen aan type 1.4016 wordt de automatenkwaliteit 1.4104 (AISI 430F(Se)) verkregen. De corrosievastheid van deze automatenkwaliteit is minder dan die van type 1.4016 en de lasbaarheid is slecht. Dit is waarschijnlijk de reden dat dit type in Europa niet geleverd wordt.

Type 1.4749 (AISI 446)

In verband met het hoge chroomgehalte behoort deze kwaliteit tot de ferritische hittevast staalsoorten (zie ook tabel 5.12). Tot ongeveer 1000 °C is het bestand tegen oxidatie. Er moet echter rekening worden gehouden met slechte sterkte-eigenschappen bij hoge temperaturen. Type 1.4749 is goed corrosievast en wordt door het ontbreken van nikkel aanbevolen indien zwavelhoudende gassen aanwezig zijn bij hoge temperatuur. Omdat deze staalsoort een lage uitzettingscoëfficiënt heeft, wordt het ook wel gebruikt als zogenaamd "glashechtend staal" en als "smeldraad". Lassen kunnen worden gemaakt met type 25 20 toevoegmetaal na voorwarmen op 200-300 °C. Het lassen kan ook met type 23 12 (AISI 309) toevoegmetaal worden uitgevoerd; in dat geval is voorwarmen op 100-200 °C voldoende.

De kwaliteit 1.4509 is tegenwoordig erg populair als relatief goedkoop alternatief voor de kwaliteit 1.4301.

tabel 5.12 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4749 (AISI 446)

1.4749 (AISI 446)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	+
hittevastheid	++
verspaanbaarheid	-
lasbaarheid	+/-
sterkte	+
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	-
vervormbaarheid	-
warmtegeleiding	+/-
elektrische geleiding	+/-
++ = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

5.3.2 Martensitische chroomstaalsoorten

De conventionele martensitisch chroomstalen kenmerken zich door een relatief hoog koolstofgehalte. Dit is nodig om een hard slijtvast materiaal te verkrijgen. De structuur, die bestaat uit martensiet, is bros en heeft een lage rek. Door deze lage rek kan de bij het lassen optredende krimpspanningen moeilijk worden opvangen, waardoor scheuren ontstaan. Het lassen aan deze conventionele martensitisch chroomstalen moet worden afgeraden.

Chroomstalen uit deze serie met een relatief 'laag' koolstofgehalte kunnen worden gelast, mits wordt uitgegaan van een laag waterstof houdend lastoevoegmateriaal met een hoge rek (bijvoorbeeld een type AISI 309L). Tevens moet, afhankelijk van de dikte, het actuele koolstofgehalte en de warmte-inbreng, worden voorgewarmd tussen de 200 en 300 °C. Dikwijls moet na het lassen worden warmtebehandeld op een temperatuur van 650 tot 750 °C. Dit kan met succes worden uitgevoerd indien gelast is met 'matching' lastoevoegmateriaal. Zwak martensitisch chroomstaal (13%Cr-4%Ni) wordt in de praktijk gelast met een in chemische samenstelling overeenkomend lastoevoegmateriaal.

Alleen bij dikwandige constructies of bij constructies met een hoge eigenspanning wordt voorgewarmd op ca. 100 °C. De tussenlagentemperatuur mag hiervan niet te veel afwijken, daar het martensietstartpunt van dit staal ligt op ca. 240 °C en het martensiet finishpunt MF op ca. 120 °C. Om een volledige plotselinge overgang van austeniet naar

martensiet te voorkomen, moet elke laag (of lasrups) worden afgekoeld tot een temperatuur lager dan het MF, alvorens de volgende laag (of lasrups) mag worden gelegd.

Type 1.4006 (AISI 410)

Van de martensitische chroomstaalsoorten wordt dit type het meest toegepast (zie ook tabel 5.13). Door de goede oxidatievastheid tot 650 °C wordt het veel gebruikt voor ovenonderdelen en branders. In de olie-industrie wordt het toegepast als bekledingsmateriaal. Het wordt niet aanbevolen voor sterk agressieve milieus. Type 1.4006 is goed te lassen, waarbij zowel met 23 12 L (AISI 309L) als met 13 (AISI 410) toevoegmateriaal kan worden gelast. Voorwarmen op 200-300 °C verdient aanbeveling. Met 13 (AISI 410) toevoegmetaal gelaste verbindingen moeten op minstens 700 °C worden gegloeid.

tabel 5.13 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4006 (AISI 410)

1.4006 (AISI 410)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	+ / -
hittevastheid	+ / -
verspaanbaarheid	-
lasbaarheid	+
sterkte	+
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	-
vervormbaarheid	+
warmtegeleiding	+ / -
elektrische geleiding	+ / -
++ = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

Type 1.4028 (AISI 420)

Dit materiaal wordt gebruikt waar een grote hardheid, sterkte en goede slijtvastheid worden geëist (zie ook tabel 5.14). De beste corrosievastheid wordt in de geharde toestand verkregen. De verspaanbaarheid kan eventueel worden verbeterd door toevoeging van zwavel of seleen, dit gaat ten koste van de lasbaarheid. 1.4028 wordt wel gebruikt voor snijgereedschap. Voorkeur voor gebruik als snijgereedschap hebben tegenwoordig echter de kwaliteiten 1.4034 of 1.4112. Het lassen aan 1.4028 moet zoveel mogelijk worden vermeden in verband met de grote hardheid en de hieruit voortvloeiende scheur-gevoeligheid in de warmte beïnvloede zone. Indien het beslist moet worden gelast, kan het volgende worden aanbevolen:

- ▶ Als toevoegmetaal 13; 19 9 L of 17 gebruiken;
- ▶ materialen voorwarmen op 300-350 °C;
- ▶ na het lassen gloeien op 680-730 °C, voordat er een verdere mechanische bewerking plaatsvindt.

tabel 5.14 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4028 (AISI 420)

1.4028 (AISI 420)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	+ / -
hittevastheid	+ / -
verspaanbaarheid	-
lasbaarheid	--
sterkte	+
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	-
vervormbaarheid	-
warmtegeleiding	+ / -
elektrische geleiding	+ / -
++ = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

Type 1.4057 (AISI 431)

Deze martensitische staalsoort heeft naast een grote sterkte een goede corrosievastheid (zie ook tabel 5.15). In de veredelde toestand is de corrosievastheid beter dan die van typen 1.4006 (AISI 410) en 1.4021 (AISI 420). Het wordt o.a. in de vliegtuigbouw toegepast en voor pompassen. Zoals bij alle martensitische staalsoorten moet het lassen zo veel mogelijk worden vermeden. Indien dit wel nodig is, moet de volgende procedure worden aangehouden:

- ▶ Opwarmen tot in het austenietgebied op 980 °C gedurende 10 minuten;
- ▶ afkoelen tot 300 - 200 °C;
- ▶ lassen;
- ▶ na het lassen af laten koelen tot 50 - 60 °C;
- ▶ hierna temperen.

Deze procedure is weergegeven om aan te tonen dat voor het lassen van dergelijke staalsoorten hele speciale procedures noodzakelijk zijn. Het is daarom altijd verstandig eerst de leverancier te raadplegen. Men kan toevoegmetaal van type 22 12H (AISI 309) gebruiken, waarbij moet worden voorverwarmd op 100-200 °C of toevoegmetaal van type E 19 (AISI 309) of 19 9 L (AISI 308L), waarbij voorwarmen moet plaatsvinden op 300-350 °C.

tabel 5.15 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4057 (AISI 431)

1.4057 (AISI 431)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	+
hittevastheid	+ / -
verspaanbaarheid	--
lasbaarheid	--
sterkte	+
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	-
vervormbaarheid	-
warmtegeleiding	+ / -
elektrische geleiding	+ / -
++ = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

5.4 Duplex roestvaste staalsoorten

Dit type van chroom-nikkelstaal heeft de laatste jaren aan belang gewonnen. Vanwege zijn ferritische-austenitische structuur wordt het ook duplex-staal genoemd. Het gehalte aan chroom ligt tussen 24 en 27%, het nikkelgehalte tussen 4,5 en 7% en het molybdeen gehalte tussen 2 en 6%. Het wordt steeds meer toegepast bij de constructie van chemische apparaten, bij het transport van aardgas en aardolie en in boorplatforminstallaties.

Duplex roestvaste staalkwaliteiten verenigen een aantal eigenschappen van de ferritische en austenitische kwaliteiten zoals:

- ▶ Een hoge rekgrens (> 450 N/mm²);
- ▶ een ten opzichte van de austenitische kwaliteiten relatief lage uitzettingscoëfficiënt;
- ▶ de overgang van taai naar bros breukgedrag bij lagere temperatuur dan bij de ferritische kwaliteiten.

Door de ten opzichte van de standaard austenitische roestvaste staalkwaliteiten betere weerstand tegen onder andere lokale aantastingsvormen en de circa 2 × hogere rekgrens, kan duplex roestvast staal in veel toepassingen als vervanger dienen voor austenitisch roestvast staal. Door de hogere sterkte kan lichter geconstrueerd worden, wat tot gewichtsbeparing leidt. De maximale gebruikstemperatuur is beperkt tot circa 280 °C. Boven deze temperatuur kunnen allerlei nadelige effecten optreden, zoals 475 °C brosheid, α -fase uitscheidingen en uitscheidingen van chroomnitriden. Ten opzichte van austenitisch roestvast staal is de vervormbaarheid minder goed. Door de hogere sterkte moet rekening worden gehouden met een grotere terugvering, hogere pro-

ceskrachten en meer gereedschapslijtage. Door de lagere rek zal bij buigen een grotere buigstraal moeten worden gehanteerd. In toepassingen waar spanningscorrosie kan optreden (bijvoorbeeld chloride-bevattende milieus) is het voor producten die zwaar gedeformeerd zijn aan te raden deze aansluitend te gloeien op 1010 tot 1100 °C. Door de goede weerstand tegen met name lokale corrosievormen, gecombineerd met de ten opzichte van de austenitische kwaliteiten hoge sterkte, worden momenteel de duplex roestvaste staalkwaliteiten met name toegepast in de chemische en petrochemische industrie, in de offshore, de oliewinning en gaswinning en voor onderdelen van rookgasontzwavelingsinstallaties [38].

Type 1.4462 (AISI 329LN)

1.4462 is het standaard type van een duplex roestvast staal met goede mechanische eigenschappen (zie ook tabel 5.16). Het heeft een hoge bestendigheid tegen corrosie in het algemeen en putcorrosie in het bijzonder. Door de austeniet/ferriet verhouding is dit type roestvast staal na het lassen ook zonder warmtebehandeling bestand tegen interkristallijne corrosie.

1.4462 duplex roestvast staal is goed lasbaar. Door een juiste keuze van het lastoefoegmateriaal (bv G 25 7 2 L) en een goede beheersing van de thermische cyclus is het mogelijk een lasverbinding tot stand te brengen die qua mechanische eigenschappen en corrosieweerstand overeenkomt met het basismateriaal. Met name de afkoelsnelheid in het temperatuurtraject 1200 tot 800 °C is belangrijk. Een te hoge afkoelsnelheid levert een te groot aandeel ferriet, waardoor de taaiheid en de weerstand tegen putcorrosie en interkristallijne corrosie nadelig worden beïnvloed. Daarentegen kan een te lage afkoelsnelheid tot ongewenste uitscheidingen leiden, waardoor en de taaiheid en de corrosieweerstand nadelig worden beïnvloed.

tabel 5.16 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4462 (AISI 329LN)

1.4462 (AISI 329LN)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	++
hittevastheid	+
verspaanbaarheid	-
lasbaarheid	+/-
sterkte	++
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	-
vervormbaarheid	-
warmtegeleiding	+/-
elektrische geleiding	+/-
++ = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

Type 1.4362 (S32304)

Type 1.4362 is een goed alternatief voor de typen AISI 304 en AISI 316 (zie ook tabel 5.17). 1.4362 wordt vaak toegepast in chloriderijke milieus. De lasbaarheid van deze legering is vergelijkbaar met de 1.4462.

Zowel het molybdeen-vrije duplex staal (1.4362) als het molybdeenhoudende type 1.4462 kunnen worden gelast met G 25 7 2 lastoefoegmateriaal. Het lastoefoegmateriaal moet een hoger Ni-gehalte hebben (17 à 19%) dan het basismateriaal, alsmede toevoegingen van stikstof (0,12 tot 0,18%). Indien hieraan wordt voldaan kan er weinig mis gaan. Een te lage warmte-inbreng (<0,5 kJ/mm) moet worden vermeden. Echter ook te hoge tussenlaagtemperaturen (interpass) moeten worden vermeden (maximaal toelaatbaar = 250 °C). Voorwarmen is niet noodzakelijk en wordt slechts toegepast, als de constructie bijvoorbeeld tengevolge van grote dikten of gecompliceerde vormgeving een hoge eigenspanning bezit. Spanningsarm gloeien wordt niet toegepast.

tabel 5.17 Samenvatting van de eigenschappen van type 1.4362 (AISI 329LN)

1.4362 (S32304)	
criterium	beoordeling
corrosievastheid	+
hittevastheid	+
verspaanbaarheid	-
lasbaarheid	+/-
sterkte	+
polijstbaarheid	+
taaiheid lage temperatuur	-
vervormbaarheid	-
warmtegeleiding	+/-
elektrische geleiding	+/-
++ = zeer goed; + = goed; +/- = matig; - = slecht; -- = zeer slecht	

Verdere ontwikkelingen op het gebied van duplex stalen gaan onder andere in de richting van soorten met superieure corrosie eigenschappen en hoge sterkten zoals bijvoorbeeld de 1.4410, een zogenaamde superduplex roestvast staal met een hoog chroom- (24%) en nikkelgehalte (8%).

Hoofdstuk 6

Lasprocessen en naadvormen

6.1 Algemeen

6.1.1 Lasprocessen en hun toepassingen

Roest- en hittebestendige staalsoorten kunnen met vrijwel alle bestaande lasprocessen met succes worden gelast. Bij het lassen van roestvast staal moeten - net als bij het lassen van ongelegeerd staal - maatregelen worden genomen om het staal tegen de invloed van de omringende lucht te beschermen. De elektrodebekleding, het laspoeder en het beschermgas moeten het smeltbad zo goed mogelijk beschermen tegen deze omringende lucht en vooral (maar niet alleen) tegen de zuurstof. Eén van de schadelijke effecten van zuurstof is een verminderde corrosieweerstand als gevolg van een ongewenste oxidatie van zowel de las als het aangrenzende basismateriaal.

Beperkingen in de toepassing van lasprocessen kunnen een gevolg zijn van de vorm en afmetingen van het werkstuk, het aantal producten en de gestelde kwaliteitseisen. Evenzo spelen economische overwegingen een rol bij de proceskeuze. Hoewel bijvoorbeeld het lassen met beklede elektroden (Bmbe) nog steeds gebruikt wordt, is dit proces uit oogpunt van economie voor een belangrijk deel verdronken door het MAG-lassen. Terwijl voor het gemechaniseerd lassen met succes gebruik wordt gemaakt van het MAG-, TIG- en plasmalassen. Een specifieke vorm van het gemechaniseerd lassen is het TIG-lassen van pijp/pijp- en pijp/pijplaatverbindingen, al dan niet onder toevoeging van draad. Hiervoor is tegenwoordig een groot aanbod van betrouwbare apparatuur beschikbaar. Milieueisen spelen een steeds belangrijker rol en ook hier kan de proceskeuze door worden beïnvloed (hoofdstuk 15, "Veiligheid en gezondheid").

De grote uitzettingscoëfficiënt van austenitisch roestvast staal en in mindere mate duplex roestvast staal maakt het nodig klemrichtingen te gebruiken of veelvuldig te hechten met niet te kleine hechten. Ook moet een zodanige lasvolgorde worden aangehouden, dat vervormingen en daardoor spanningen in de gelaste onderdelen zo klein mogelijk worden gehouden. Martensitische en ferritische roestvast staalsoorten kennen deze problemen in veel mindere mate, omdat de uitzettingscoëfficiënten vrijwel overeenkomen met die van staal.

Door de geringere warmtegeleidbaarheid van roestvast staal ten opzicht van die van ongelegeerd staal blijft de warmte meer geconcentreerd rond het smeltbad. Dit houdt in dat er met een zodanige stroomsterkte en/of lassnelheid moet worden gelast dat het smeltbad niet 'oververhit' kan raken. Het lassen in positie kan door hetzelfde effect ook moeilijker zijn en vraagt meer concentratie van de lasser. Doordat het smeltbad de warmte slechter kwijt kan, zakt het gemakkelijker uit. Bij het lassen van dunne plaat kan, door het gebruik van bijvoorbeeld (watergekoelde) koperen onderlegstrippen (heatsinks), de warmte beter worden afgevoerd. Hierdoor wordt een teveel aan plaatselijke warmte in het werkstuk tegengegaan, wat gunstig is om de vervorming minimaal te houden.

Voor het lassen van geplateerd staal wordt verwezen naar hoofdstuk 8. Een overzicht van geschikte lasprocessen voor het lassen van roestvast staal staat in tabel 6.1. In deze tabel zijn de lasprocessen opgenomen waarmee roestvast staal in principe kan worden gelast, dan wel kan worden gesneden. Onderscheid wordt gemaakt in mogelijke, mogelijke maar niet gebruikelijke, en niet toe te passen processen. Bovendien zijn de toe te passen plaatdikten aangegeven en de positie waarin kan worden gelast. In tabel 6.1 zijn ook enkele lasprocessen niet opgenomen. Dat zijn het autogeen lassen, het hardsolderen met de vlam

en het zachtsolderen. Dit zijn processen die wel kunnen worden toegepast, maar daarbij moeten de consequenties van hun toepassing goed worden gerealiseerd. Het is namelijk mogelijk dat bij toepassing van deze processen de corrosiebestendigheid van de verbinding (sterk) achteruit gaat. Mocht dit onder de praktijkomstandigheden van weinig belang zijn en stuiten de aanbevelen en daarom kwalitatief betere processen op praktische bezwaren, dan is het gebruik van de drie genoemde verbindingsmethoden te overwegen.

Voor het verbinden van roestvast stalen platen met een geringe wanddikte < 3mm kunnen met succes ook andere verbindingprocessen worden ingezet, zoals het mechanisch verbinden, solderen of lijmen. Het solderen van roestvast staal wordt besproken in § 6.11, het lijmen in § 6.12 en het mechanisch verbinden in § 6.13. Meer informatie over het verbinden van dunne plaat (lassen, lijmen, mechanisch verbinden en solderen) is terug te vinden op de websites www.dunneplaat-online.nl en www.verbinden-online.nl.

Vorbereiding/-behandeling

De voorbereiding voor het lassen start al door tijdens de opslag, transport en verwerking het materiaal te beschermen tegen beschadiging en vervuiling. Richtlijnen voor transport, opslag en montage zijn gegeven in 'NEN-EN-1011-3: 2000 en'. Voor het lassen wordt verwezen naar 'Aanbevelingen voor het lassen van metalen; Deel 3: Booglassen van corrosiebestendige staalsoorten' van dezelfde norm.

In het kort komen de belangrijkste maatregelen neer op:

- Gebruik van kunststof of houten kratten en pallets (spijkers verzonken), kunststof latten, steunen, bekledingen, tussenlagen, noppenfolie, plakfolie, enz.
- Platen, buizen en lange producten moeten goed worden ondersteund, omdat anders vervormingen op kunnen treden.
- Het vermijden van vervuiling (contaminatie). In het algemeen kan worden gesteld dat roestvast staal in schone ruimten verwerkt moet worden. IJzerdeeltjes, vliegroe, roet en chloorbevattende middelen kunnen aanleiding geven tot aantasting van het oppervlak. Gebruik geen chloorhoudende viltstift.
- Contact met andere metalen, in het bijzonder ongelegeerd staal, moet worden vermeden. De contaminatie die daarbij ontstaat kan later (galvanische) corrosie bevorderen. Gereedschappen en hulpmiddelen die geschikt zijn voor roestvast staal zijn: aluminiumbrons (voor relatief kleine series), hardmetaal (voor massafabricage), en gereedschapsstaal (bijvoorbeeld 1.2379), bij voorkeur voorzien van een niet-metallische laag (nitree-laag, titaannitride-laag, e.d.). Buiggereedschappen worden vaak gemaakt van het veredelstaal 42CrMo + QT, dat vervolgens wordt genitreed.
- Bij het be- en verwerken van roestvast staal moet er tevens voor worden gezorgd, dat de gereedschappen alleen voor roestvast staal worden gebruikt en niet voor bijvoorbeeld ongelegeerd staal.

Voor het lassen moet het materiaal schoon en vooral vetvrij zijn. Ook eventueel aanwezige restanten van beschermfolie moeten uiteraard volledig verwijderd zijn. Als de lasnaadkanten ruw en/of geoxideerd (aanloopkleuren) zijn tengevolge van de voorbereiding van de lasnaadkanten, dan moet er eerst voor worden gezorgd dat de lasnaadkanten glad en blank worden gemaakt. Bramen die tengevolge van de voorbereiding van de lasnaadkanten zijn ontstaan, moeten altijd worden verwijderd om problemen bij het lassen te voorkomen.

6.1.2 Voorbewerking en lasposities

Vorbewerking

Voor het scheiden en aanbrengen van lasnaadkanten zijn zowel het lasersnijden, het plasmassnijden als machinale bewerkingen goed bruikbaar. De keuze wordt bepaald door kwaliteit- en economische overwegingen. Een belangrijk

tabel 6.1 Overzicht van las- en snijprocessen voor roestvast staal

las- en snijprocessen		toe te passen materiaaldikte			laspositie
		< 3 mm	3-8 mm	> 8 mm	
Booglassen met beklede elektrode (Bmbe) rutiel/basisch					alle
MAG-lassen	kortsluitboog (KSB)		1)	1)	alle
	speciale KSB (CMT, Coldarc, enz.)				alle
	sproei-boog				PA/PB
	pulserend				alle
	gevulde draad				alle
hoog vermogen MAG-lassen					PA/PB
laser-MAG-hybride					PA/PB
boogsolderen TIG					alle
boogsolderen plasma					alle
boogsolderen MIG/MAG					alle
boogsolderen laser					alle ⁶⁾
TIG-lassen (inclusief puls-TIG)			1)	1)	alle
onder poeder lassen					PA
plasmalassen (melt-in en key-hole)					alle ⁷⁾
puntlassen					alle
projectielassen					alle
rolnaadlassen					alle
elektronenstraallassen					PA
Nd:YAG staaf laserlassen (dioden of lampengepompt)			2)	2)	alle ⁶⁾
Yb:YAG disk laserlassen (dioden gepompt)			2)	2)	alle ⁶⁾
Yb:YAG fiber laserlassen (dioden gepompt)			2)	2)	alle ⁶⁾
CO ₂ -laserlassen				3)	alle ⁶⁾
diodelaserlassen					alle ⁶⁾
diffusielassen					alle
wrijvingslassen			4)	4)	alle
ultrasoon lassen					alle
explosielassen		5)	5)	5)	alle
hardsolderen en hoogtemperatuursolderen (oven)	oven				alle
	inductie				alle
	diffusie				alle
	laser				alle
snijden	autogeen				nvt
	plasma				alle ⁶⁾
	laser				alle ⁶⁾
= mogelijk = mogelijk maar niet gebruikelijk = niet toepassen		1) = specifiek toegepast voor grondnaden 2) = vermogen groter dan 2000 W nodig 3) = vermogen minimaal 4000 W 4) = minimaal één deel rotatiesymmetrisch 5) = geschikt voor pijp-pijpplaatverbindingen en pijp-pijpverbindingen 6) = mits gekoppeld aan robot 7) = melt-in in alle posities en key-hole alleen PA			

deel van de totale kosten wordt gevormd door de lasnaad-voorbewerking. Deze kosten zijn mede afhankelijk van de gewenste maatvoering. Het machinaal voorbereiden is op het eerste gezicht een dure werkwijze, maar hierdoor kunnen de totale kosten toch lager uitkomen door bijvoorbeeld een goede maatnauwkeurigheid van de te verbinden onderdelen, waardoor minder uitval bij het lassen ontstaat. Bij het laserlassen kiest men om deze reden vaak voor het machinaal voorbereiden van de lasnaadkanten, dan wel het met de laser snijden van de te verbinden productdelen. Het waterstraalsnijden wordt wel ingezet voor het snijden van roestvast staal maar slechts zelden voor het aanbrengen van lasnaadkanten.

Door het plasmasnijden onder water uit te voeren worden de structuur en vervorming bij de meeste roestvast staal typen minimaal beïnvloed en schadelijke dampen, gassen en deeltjes kunnen dan direct worden afgevangen. Echter bij het snijden van martensitisch roestvast staal en de duplex roestvast staal typen kunnen tengevolge van waterstofopname problemen ontstaan door de aanwezigheid van waterstof en is dus af te raden.

In vrijwel alle gevallen moeten de lasnaadkanten na het aanmaken worden gereinigd. Oliën van het machinaal bewerken moeten worden verwijderd en bij het snijden moet de aanwezige lichte oxidehuid worden weggeslepen. Lasergesneden lasnaadkanten hoeven meestal niet verder te worden nabewerkt.

Een belangrijke stelregel bij het machinaal bewerken is dat gereedschappen, die worden gebruikt bij roestvast staal, gescheiden moeten worden houden van die voor het bewerken van staal om contaminatie te voorkomen. Bij voorkeur moet in gescheiden ruimten worden gewerkt. Gereedschap zoals roestvaste stalen borstels, opgelaste bikhamers, enz. moeten daarom duidelijk herkenbaar te zijn, bijvoorbeeld door middel van een aan te brengen kleur op de handvaten. Ook moeten slijpschijven, te gebruiken voor roestvast staal, alleen voor het bewerken van dat materiaal worden gebruikt.

Om het hechten van lasspatten op het oppervlak te voorkomen, zijn antispattmiddelen toe te passen. Deze middelen (meestal op siliconenbasis) worden vlak naast de lasnaad aangebracht. Ze kunnen bij ondeskundig (overvloedig) gebruik echter poreusheid in de las veroorzaken.

Kort samengevat kan gesteld worden dat:

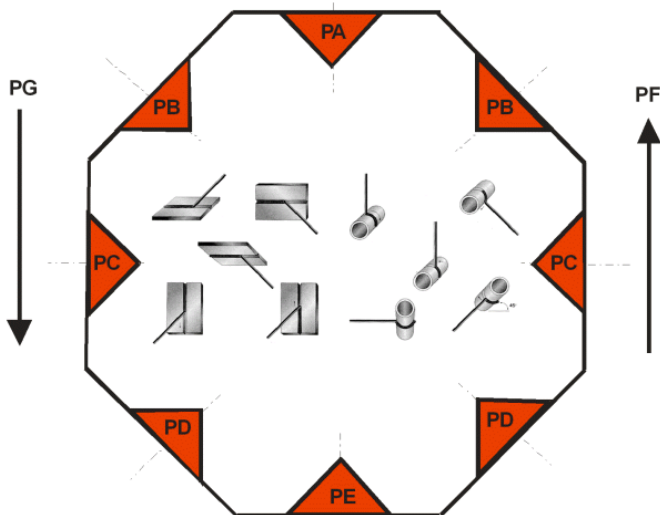
- ▶ Het machinaal voorbereiden een goede maatnauwkeurigheid geeft, maar op zich een dure voorbereidingsmethode is. Een bijkomend voordeel is wel dat er geen warmte in het materiaal wordt ingebracht.
- ▶ Het plasmasnijden heeft een geringere maatnauwkeurigheid ten opzichte van het machinaal voorbereiden, maar de kosten liggen lager.
- ▶ Het lasersnijden geeft voor kleine materiaaldikten een hoge nauwkeurigheid en hoge bewerkingssnelheid, maar de kosten liggen hoger dan bij het plasmasnijden. De hoe-

veelheid ingebrachte warmte is aanzienlijk lager ten opzichte van het plasmasnijden.

Over het aanbrengen van lasnaden geeft hoofdstuk 7 meer informatie.

Lasposities

De fundamentele lasposities zijn opgenomen in de NEN-EN-ISO 6947:1987-nl, waarin tevens definities van hellings- en rotatiehoeken in relatie tot de laspositie zijn opgenomen. Figuur 6.1 toont de meest voorkomende lasposities conform deze norm.



figuur 6.1 Schematisch overzicht van de lasposities conform de NEN-EN-ISO 6947:1987-nl
 PA = onder
 PB = horizontaal
 PC = uit de zij
 PD = horizontaal boven het hoofd
 PE = boven het hoofd
 PG = verticaal neergaand
 PF = verticaal opgaand (stapelen)

6.1.3 Veiligheidsmaatregelen

Zoals eerder opgemerkt wordt in hoofdstuk 15 uitgebreid ingegaan op de aspecten veiligheid en gezondheid (ARBO) in relatie tot het lassen. In het kort samengevat moet op de volgende punten worden gelet:

1 Maatregelen bij de voorbereiding van het lassen

- ▶ Indien vuile en vette plaatkanten met oplosmiddelen worden gereinigd, moet dat in een aparte ruimte gebeuren, waar niet wordt gelast. Kan dat niet, dan moeten zwak alkalische ontvettingsmiddelen worden gebruikt.
- ▶ In verband met brandgevaar moeten middelen als aceton en wasbenzine niet worden toegepast op de lasplaats. Bovendien verdampen deze middelen snel en zijn ze nadelig voor de gezondheid. Er zijn goede oplosmiddelen in de handel die, mits gecombineerd met een goede afzuiging en persoonlijke bescherming (handschoenen), veilig te gebruiken zijn.
- ▶ Het gebruik van trichloorethyleen is niet toegestaan op de lasplaats en hierbuiten mag trichloorethyleen alleen in aparte ruimten en vaak in speciale baden worden toegepast. Op de lasplaats zal trichloorethyleen onder invloed van de ultraviolette straling van de lasboog worden omgezet in het zeer giftige fosgeengas.
- ▶ Indien het installeren van een ontvettingsinrichting wordt overwogen, moet vooraf overleg worden gepleegd met de Arbeidsinspectie.

2 Maatregelen tijdens het lassen

Schadelijke effecten, zoals die worden veroorzaakt door het inademen van lasrook, worden pas na enige tijd merkbaar. Daarom is een goede persoonlijke bescherming van belang en een consequent gebruik van afzuiginstallaties

noodzakelijk: bij het lassen van roestvast staal mag hier nooit tegen worden gezondigd!

In Nederland mag voor het lassen van roestvast staal geen gebruik worden gemaakt van recirculatieapparatuur, dit is apparatuur die ook wel bekend staat als 'mobiele afzuiging'. Dit soort apparatuur werkt namelijk met filters (al dan niet elektrostatisch) die niet in staat zijn het schadelijke zeswaardige chroom uit de lasrook te filteren.

- ▶ Wanneer met gasbooglasprocessen wordt gewerkt, moet men alert zijn op het ontstaan van onder andere ozon (O_3) gas, dat in een maximale concentratie van 0,12 ppm TGG-1u (1 ppm = 1 deeltje per miljoen deeltjes) aanwezig mag zijn. Het is snel te ruiken, maar dan zit men al dicht tegen de toelaatbare concentratie aan. Een goede ventilatie in combinatie met een afzuiging is noodzakelijk. Bij twijfel: METEN!
- ▶ Bij alle lasprocessen waarbij een boog zichtbaar is, moet vanwege het ontstaan van lasrook een goede (liefst plaatselijke) afzuiging worden toegepast. Het element chroom in roestvast staal kan in een specifieke samenstelling (Cr-VI ofwel zeswaardig chroom) na langdurig inademen, kankerverwekkend zijn. Een probleem hierbij is dat eventuele longaandoeningen zich pas openbaren na tientallen jaren en daarom niet altijd in verband te brengen zijn met de werkomstandigheden. Dit betekent dat om eventuele risico's te vermijden, onder alle omstandigheden een goede afzuiging en persoonlijke beschermingsmiddelen altijd noodzakelijk zijn en dat bij voorkeur altijd een lashelm met een voorziening voor luchtverversing door de lasser moet worden gebruikt (overdrukhelm).

Uitgebreidere informatie is te vinden op de website www.lasrook-online.nl.

6.1.4 Koelstrippen, opspaninrichtingen, hechten

Austenitische roestvaste staalsoorten hebben in vergelijking met ongelegeerde en laaggelegeerde staalsoorten een uitzettingscoëfficiënt die ongeveer 1,5 maal zo groot is en een circa 3 maal geringere warmtegeleiding. De kans op vervorming en/of doorbranden tijdens het lassen is daardoor aanzienlijk groter. Om dit risico tot een minimum te beperken kunnen de volgende voorzorgsmaatregelen worden genomen:

- ▶ Aanbrengen van (watergekoelde) koperen koelstrippen in de onmiddellijke omgeving van de lasnaad (heatsinks), waardoor in het bijzonder bij het lassen van dunne plaat toch een snelle warmteafvoer mogelijk is. Hierdoor ontstaat minder krimp en vindt de minste verandering van de structuur van het roestvaste staal plaats. Er moet echter wel op gelet worden dat er geen koper in het smeltbad terecht komt. Vloeibaar koper kan namelijk gemakkelijk via de korrelgrenzen in het basismateriaal dringen en kan daardoor warscheuren veroorzaken. Koper kan bijvoorbeeld in het smeltbad terecht komen als de lasboog het koper van het backingmateriaal omsmelt in plaats van de te verbinden delen. De oplossing moet dan ook meestal in de uitvoering van het lassen worden gezocht (verkeerde stand lastoorts, te hoog voortlooptempo, enz.);
- ▶ het is aan te raden gebruik te maken van een opspaninrichting met een centrale koperen strip onder de lasnaad (backingstrip), waarin gaatjes zijn aangebracht voor het toevoeren van een beschermend (backing)gas. Bij het lassen van roestvast staal moet ALTIJD backinggas worden gebruikt;
- ▶ het gelaste product moet pas uit de klemmerinrichting worden genomen als deze voldoende is afgekoeld;
- ▶ gebruik maken van meer hechtlassen dan bij ongelegeerd en laaggelegeerd staal indien inklemmen niet mogelijk is. Het aantal hechten moet voldoende zijn om de gewenste vooropening in stand te kunnen houden. Hechtlassen kunnen bronnen van problemen zijn, zodat aan het starten en stoppen, ter vermindering van poreusheid en kraterscheurtjes, de nodige aandacht moet worden gegeven. Het is aan te bevelen als er kraterscheurtjes aanwezig zijn deze altijd uit te slijpen voordat met lassen verder wordt gegaan.

Ook bij het maken van hechtlassen moet altijd backing-gas worden gebruikt!

6.2 Booglassen met beklede elektrode (Bmbe)

Het lassen met elektroden van roestvast staal verschilt niet veel met dat van ongelegeerd staal. Rekening moet worden gehouden met de geringere warmte- en elektrische geleidbaarheid van austenitisch roestvast staal. Deze eigenschap brengt met zich mee dat de elektroden korter zijn en dat er met een ca. 25% lagere stroomsterkte moet worden gelast. Het peukverlies kan door de grotere kans op oververhitting van de rest van de elektrode oplopen tot circa 10%.

Stroombron

De hoogste stroomsterkte die wordt gebruikt bij het lassen met een elektrode met een diameter van 5 mm bedraagt ongeveer 200 A. Bij hoogrendements elektroden kan dat oplopen tot ca. 300 A. Bij het maken van doorlassingen in dunne plaat moet de stroomsterkte nauwkeurig instelbaar zijn tussen de 30 en 120 A.

De meeste roestvaste staalelektroden kunnen zowel met gelijkstroom als met wisselstroom worden verlast. Wel is er een trend meer gelijkstroom te gebruiken. Bij gelijkstroomlassen is de neiging tot spatten geringer dan bij het lassen met wisselstroom. Meestal wordt de elektrode op de +pool aangesloten.

Tegenwoordig worden voor het booglassen met beklede elektroden vrijwel uitsluitend inverter stroombronnen gebruikt. Dit type stroombronnen is klein en compact en kan uitstekend worden verplaatst. Over het algemeen kan met inverter stroombronnen zowel met wisselstroom als gelijkstroom worden gelast. Bij inverter stroombronnen kan gekozen worden uit een groot aantal typen met bijbehorend bereik ten aanzien van de stroomsterkte. Voor al deze stroombronnen geldt daarom dat de stroomsterkte nauwkeurig afgestemd kan worden op de gewenste materiaal-dikte of laspositie.

Elektrodetypen

Er bestaat een uitgebreid assortiment van elektroden, zodat voor elke kwaliteit roestvast staal een geschikt type voorhanden is.

Tabel 6.2 geeft een overzicht van veel bij het booglassen met beklede elektrode gebruikte elektrodetypen, volgens de NEN-EN 1600.

Rendement

Beklede elektroden worden geleverd met een rendement oplopend van 100 tot ca. 160%. Bij voorkeur moet een hoogrendements elektrode worden gebruikt, als de omstandigheden, zoals onder meer de materiaaldikte en laspositie, enz., dit toelaten. De hoogrendementstypen zijn speciaal bedoeld voor het lassen van staande en liggende hoeklassen en stompse naden onder de hand. Bij die typen lasnaden kan het lassen met beklede hoogrendements elektroden soms concurrerend zijn met het MAG lassen.

Synthetische hoogrendements elektroden, die voorzien zijn van een ongelegeerde stalen kern draad met de legeringselementen in de bekleding, moeten bij het lassen van roestvast staal aan roestvast staal niet worden toegepast. Ze zijn wel geschikt voor het lassen van zogenaamde "zwart-wit" verbindingen, dat wil zeggen verbindingen van ongelegeerd of laaggelegeerd staal aan roestvast staal.

Vaak zullen de kosten bij gebruik van het MAG-lassen lager zijn dan bij het lassen met beklede elektrode. Nog economischer is het gebruik van het onder poeder lassen (OP). Voor meer informatie over de economie, zie hoofdstuk 14. De posities waarin OP gelast kan worden, zijn echter beperkt (vrijwel alleen PA). Uit oogpunt van straling en de ontwikkeling van lasrook moet aan het onder poeder lassen sterk de voorkeur worden geven.

tabel 6.2 Overzicht van een aantal veel gebruikte elektroden voor het lassen met beklede elektrode conform de NEN-EN 1600

basismateriaal		lastoevoegmateriaal	
NEN-EN 10088		AISI	NEN-EN 1600
naam	nummer		beklede elektroden
X5CrNi18-10	1.4301	304	E 199
X2CrNi18-9	1.4307	304 L	E 19 9 L
X2CrNi19-11	1.4306		
X5CrNiTi18-10	1.4541	321	E 19 9 Nb
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	316	E 19 12 2
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	316 L	E 19 12 3 L
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	316 Ti	E 19 12 3 Nb
X2CrNiMo18-15-4	1.4438	317 L	E 19 13 4 N L
X10CrNi18-8	1.4310	301	E 19 9
X2CrNi18-7	1.4318	301 L	E 19 9 L
X12CrNi23-13	1.4833	309 S	E 22 12
X8CrNi25-21	1.4845	310 S	E 25 20
X25CrNiMo18-15-4	1.4438	317 L	E 19 13 4 N L
X2CrTi12	1.4512	409	E 19 9 L
X6Cr17	1.4016	430	E 17 of E 19 9 L
X3CrTi17	1.4510	430 Ti/439	E 23 12 L
X2CrMoTi18-2	1.4521	444	E 19 12 3 L
X2CrTiNb18	1.4509	441	E 23 12 L
X6CrMo17-1	1.4113	434	E 19 12 3 L
X2CrNi23-4	1.4362		E 25 7 2 N L
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462		E 25 7 2 N L
X12G13	1.4006	410	E 13 of E 19 9 L
X20Cr13	1.4021		E 13 of E 19 9 L
X30Cr13	1.4028	420	E 13 of E 19 9 L

Lasnaadvormen

Bij het lassen van roestvast staal wordt in plaat tot ca. 5 mm een I-naad toegepast. Vanaf 5 tot ca. 12 mm een V-naad met een openingshoek van 60°. Bij plaatdikten groter dan ca. 12 mm is vanwege een meer gelijkmatige krimp de voorkeur te geven aan een X-naad. Een U-naad is goed toe te passen voor het eenzijdig lassen van pijpen. In tabel 6.3 is een overzicht gegeven van toe te passen lasnaadvormen voor het Bmbe lassen.

6.2.1 Keuze van het elektrodetype

Soorten van de bekleding

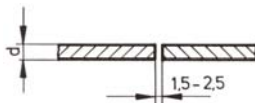
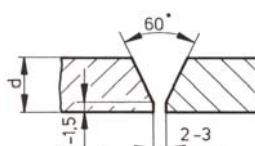
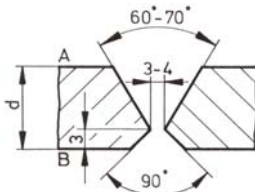
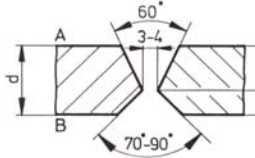
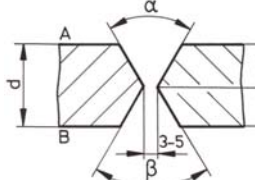
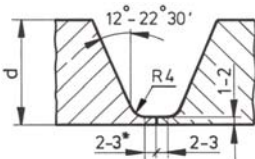
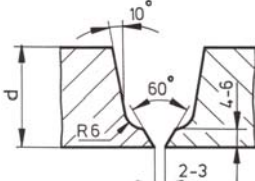
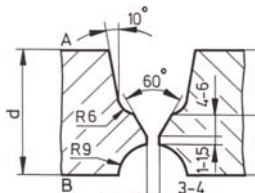
Beklede elektroden voor het lassen van roestvast staal zijn in te delen naar twee hoofdtypen en wel de rutiel en de basische typen. Hiervan zijn er ook nog enkele mengvormen. Elk type elektrode kent zijn eigen specifieke voordelen en beperkingen.

De belangrijkste eigenschappen van rutiel beklede elektroden kunnen als volgt worden samengevat:

- goed te verlassen, ook in positie;
- geschikt voor het maken van doorlassingen en vullingen;
- glad lasuiterlijk en goede slaklossing;
- lage ontsteekspanning;
- geringe neiging tot spatten.

Elektroden met een rutiel-type bekleding worden vanwege deze eigenschappen en de goede verlasbaarheid het meeste toegepast. Vanwege het gladde uiterlijk en de goede aanvloeiing wordt dit type elektroden ook wel ingezet bij op vermoeiing belaste constructies.

tabel 6.3 Lasnaadvormen voor het lassen met beklede elektroden

No	materiaaldikte	benaming	naadvorm	opmerkingen
1	< 2,5	T-naad éénzijdig		Geschikt voor alle posities.
2	< 5	I-naad tweezijdig		Eventueel de keerzijde uitslijpen voor het tegenlassen. Geschikt voor alle posities.
3	5 - 12	V-naad één- en tweezijdig		Bij éénzijdig doorlassen moeten hogere eisen aan voorbereiding en aanbouwen worden gesteld dan bij tweezijdig lassen.
4	≥ 8	ongelijkzijdige X-naad		Bestemd voor het in positie lassen. Zijde A eerst lassen, zo nodig zijde B uitslijpen vóór het tegenlassen.
5	≥ 12	ongelijkzijdige X-naad		Zijde A wordt als regel eerst gelast. Om de vervorming tot een minimum te beperken kan afwisselend aan de zijden A en B worden gelast. Zo nodig wordt zijde B uitgeslepen voor het tegenlassen.
6	≥ 12	gelijkzijdige X-naad		Lasvolgorde: Eerst grondnaad zijde A, zijde B geheel vullen, zijde A aflassen. $\alpha = 70-90^\circ$ $\beta = 60-75^\circ$
7	onbeperkt	U-naad éénzijdig		De grondlaag wordt uitgevoerd met het TIG-lasproces en bij voorkeur met toevoegmateriaal. Maat 3* is afhankelijk van de cupdiameter. Vooropening 0-1 mm. Specifiek voor pijplassen.
8	onbeperkt	U-naad één- en tweezijdig		Eventueel keerzijde uitslijpen en tegenlassen.
9	> 25	dubbele U-naad		Eventueel keerzijde uitslijpen en tegenlassen.

De belangrijkste eigenschappen van basisch beklede elektroden zijn:

- matig verlasbaar;
- hoge ontsteekspanning nodig;
- tamelijk ruw lasuiterlijk;
- relatief veel spatvorming;
- matige slaklossing;
- lasmetaal met goede kerftaaiheidseigenschappen (laag waterstof).

Basische elektroden worden over het algemeen daar ingezet waar goede mechanische eigenschappen en taaiheid van het lasmetaal de primaire eisen zijn, of in specifieke gevallen waaronder:

- toepassingen bij zeer lage temperaturen, in verband met de goede kerftaaiheid beneden $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- toepassingen in hoogtemperatuurinstallaties onder andere in verband met de geringe gevoeligheid voor de vorming van brosse fasen;
- in lasverbindingen die onder hoge spanning komen te staan (in verband met de geringe warmteontwikkelingsgevoeligheid);
- het maken van doorlassingen;
- voor het verkrijgen van een laag waterstofgehalte. Drogen van de elektroden bij een hoge temperatuur is mogelijk.

6.2.2 Lasuitvoering

De booglengte beïnvloedt, afhankelijk van het type en de dikte van de bekleding, de boogspanning en hierdoor de warmteontwikkeling.

De booglengte moet daarom tijdens het lassen zo constant mogelijk worden gehouden. Een langere boog verhoogt de stikstofopname, waardoor het ferriet-percentages in het lasmetaal zal dalen. Om afbrand van legeringselementen en stikstofopname tegen te gaan, moet met een constante, relatief korte, booglengte worden gelast. Basische elektroden moeten altijd met een korte booglengte worden gelast.

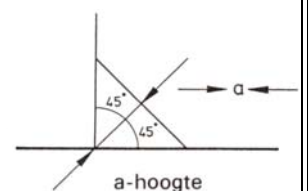
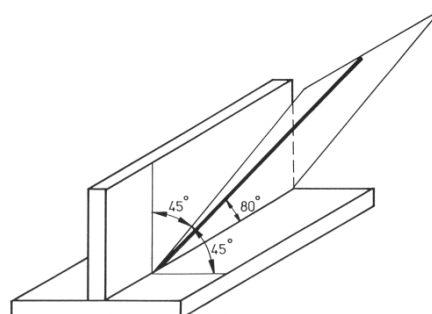
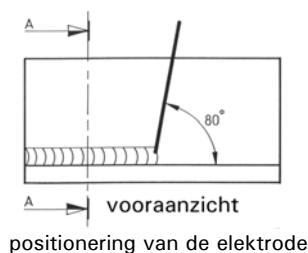
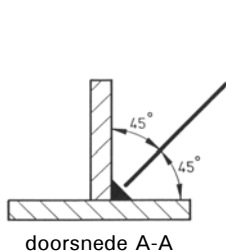
Voor een goede inbranding moet, naast een voldoende hoge lasroom, de lassnelheid zo zijn, dat het smeltbad niet voor de elektrode uit gaat lopen.

Hechtlassen moeten op korte afstand en met voldoende lengte worden gelegd. Voor de kwaliteiten die tijdens het lassen moeten worden voorgewarmd, geldt dat ook tijdens het hechten moet worden voorgewarmd. Alvorens een las wordt gelegd, moeten de hechtlassen worden aangeslepen. Dit geldt speciaal voor grondlagen in afgeschuinde naden.

Ter voorkoming van kraterscheuren wordt de elektrode aan het eind van een rups en voor elke onderbreking naar de kant weggetrokken of over een afstand van 10 tot 15 mm terug bewogen en daarna langzaam omhoog getrokken. Het starten buiten de lasnaad en vervolgens via de lasnaad naar de lasplaats "lopen" is bij roestvast staal nooit toegestaan, daar deze plaatsen onder ongunstige omstandigheden aanleiding kunnen geven tot spanningscorrosie. In de tabellen 6.4 en 6.5 zijn richtwaarden gegeven voor het maken van respectievelijk staande hoeklassen en stompe lassen. De positionering van de elektrode en de betekenis van a-hoogte is onderaan tabel 6.4 weergegeven.

tabel 6.4 Richtlijnen voor het maken van staande hoeklassen

Plaatdikte	a-hoogte	elektrodediameter en -lengte	rendement	stroomsterkte per elektrode	laslengte
[mm]	[mm]	[mm]	[%]	[A]	[mm]
2 - 3	ca. 2,5	2,5 × 350	100	50 - 80	250 - 300
		2,5 × 300	150	60 - 90	300 - 350
3 - 4	2,5 - 3	3,25 × 350	100	70 - 90	300 - 350
		3,25 × 350	150	80 - 120	400 - 450
5 - 7	ca. 3,0	4,0 × 350	100	90 - 140	350 - 500
		3,25 × 450	130	90 - 120	ca. 450
		4,0 × 450	130	120 - 160	ca. 600
		3,25 × 350	150	80 - 120	500 - 600
		4,0 × 450	150	130 - 170	650 - 750
8 - 10	ca. 3,5	5,0 × 350	100	160 - 200	450 - 550
		4,0 × 450	130	120 - 160	ca. 500
		5,0 × 450	130	160 - 210	ca. 650
		4,0 × 450	150	130 - 170	550 - 650
		5,0 × 450	150	170 - 230	650 - 750
10 - 12	ca. 4,0	5,0 × 350	100	160 - 210	380 - 500
		5,0 × 450	130	160 - 220	ca. 620
		5,0 × 450	150	170 - 230	600 - 700
10 - 14	ca. 4,5	5,0 × 350	100	160 - 220	300 - 420
		5,0 × 450	130	160 - 230	ca. 520
		5,0 × 450	150	170 - 230	650 - 750
> 14	ca. 5,0	5,0 × 450	130	160 - 230	ca. 400
		5,0 × 450	150	170 - 230	450 - 500



tabel 6.5 Richtwaarden voor elektrodediameter en stroomsterkte voor de diverse naadvormen

no.	benaming	naadvorm	materiealdikte	theoretische naadinhoud [cm³/m]	onder de hand		verticaal lassen		opmerkingen
					elektrode Ø	lasstroom (benadering) [A]	elektrode Ø	lasstroom (benadering) [A]	
1	I-naad éénzijdig		< 2,5		TIG	40...100		30...60	Geschikt voor alle posities.
2	I-naad tweezijdig		2,5	–	2 - 2,5	30...65	2 - 2,5	40	Geschikt voor alle posities. De keerzijde zo nodig uitslijpen voor het tegenlassen.
			3	–	2,5 - 3,25	50...90	2,5	50	
			4	–	3,25 - 4	70...120	2,5	60	
3	V-naad één- en tweezijdig		5...6	27...36	2,5 - 3,25	50...90	2,5	50	Bij éénzijdig doorlassen moeten hogere eisen worden gesteld aan voorbewerking en aanbouwen dan bij tweezijdig lassen.
			8	60	3,25 - 4-5	80...220	2,5 - 3,25	80	
			10	80	3,25 - 4-5	80...240	3,25	90	
			12	114	3,25 - 4-5	80...240	3,25	90	
4	ongelijkzijdige X-naad		8	45	grondlaag 3,25 rest 4 - 5	80...100 140...240	3,25	80	Bestemd voor het in positie lassen. Zijde A eerst lassen, zo nodig zijde B uitslijpen voor het tegenlassen.
			10	63			3,25	80	
5	ongelijkzijdige X-naad		13	95			3,25	80	Zijde A wordt als regel eerst gelast. Om de vervorming tot een minimum te beperken, kan afwisselend aan de zijden A en B worden gelast.
			16	133			3,25	90	
6	gelijkzijdige X-naad		20	186			3,25 - 4	100	Lasvolgorde: Eerst grondnaad zijde A, zijde B geheel vullen, zijde A aflassen. α = 70-90° β = 60-75°
			23	253			3,25 - 4	110	
			25	293			3,25 - 4	110	
7	U-naad éénzijdig		13	152	grondlaag TIG rest 4 - 5 zo nodig verkanten	120...240	3,25	90	De grondlaag wordt uitgevoerd met het TIG-lasproces en bij voorkeur met toevoegmateriaal. Maat 3* is afhankelijk van de cupdiameter. Speciaal toe te passen voor het pijplassen.
			16	195			3,25	100	
			20	253			3,25 - 4	110	
			23	297			3,25 - 4	110	
			25	326			3,25 - 4	110	
8	U-naad één- en tweezijdig		13	90	grondlaag TIG of 2,5 - 3,25 rest 4 - 5. Indien nodig tegenlassen met 3,25 - 4	50...90 140...240	3,25	80	Eventueel de keerzijde uitslijpen en tegenlassen.
			16	140			3,25 - 4	89	
			20	210			3,25 - 4	100	
			23	280			3,25 - 4	110	
			25	320			3,25 - 4	110	
9	dubbele U-naad (asymmetrisch)		25	240	grondlaag 2,5 - 3,25, rest 4 - 5	50...90 140...240	3,25 - 4	110	Eventueel de keerzijde uitslijpen en tegenlassen.
			30	325			3,25 - 4	120	
			35	415			3,25 - 4	120	
			40	510			3,25 - 4	120	

6.3 MAG-lassen

6.3.1 Inleiding

Het MAG-lassen is een gasbooglasproces waarbij een mechanisch aangevoerde en stroomvoerende draad in een beschermgas wordt verlast. Bij het MAG-lassen wordt een beschermgas gebruikt, dat uit argon met toevoeging van zuurstof, koolzuur, waterstof of combinaties van deze gasen bestaat. Dit zijn actieve beschermgassen of gasmengsels, waaraan het MAG-lassen (Metaal Actief Gas) zijn naam ontleent. Roestvast staal wordt altijd MAG gelast. Het gebruik van inerte gassen als argon en helium, dan wel mengsels van deze gassen geeft bij het MIG-lassen van roestvast staal bolle en slecht aangevloeide lassen. De selectie van het juiste beschermgas is van zowel technische als economische factoren afhankelijk. Het MAG-lassen van roestvast staal is, indien dit wordt vergeleken met het lassen van laag- of ongelegeerd staal, niet zo zeer moeilijker, maar wel anders.

6.3.2 De apparatuur

De MAG-apparatuur bestaat uit de stroombron, de lastoorts, het draadaanvoermechanisme en een voorziening voor het beschermgas (zie figuur 6.2). Er wordt gelast met een stroombron, waarbij een constante spanning kan worden ingesteld en die dus een vlakke stroom-spanningskarakteristiek heeft. Het MAG-lassen wordt uitgevoerd met de draad aangesloten op de + pool (zie voor meer informatie VM 124 "MIG/MAG-lassen en zijn varianten").

Een keuze kan worden gemaakt uit lastoortsen met en zonder vloeistofkoeling; de zogenaamde gas- en vloeistofgekoelde lastoortsen. Voor toepassingen boven 250 A komen uitsluitend vloeistofgekoelde lastoortsen in aanmerking. MAG-lastoortsen voor het handmatig lassen hebben een inschakelduur van maximaal 60%. Bij het gemechaniseerd lassen worden altijd lastoortsen gebruikt met een inschakelduur van 100%.

Het gedeelte dat zorgt voor het draadtransport, vanaf de rol tot aan de contactbuis, is het meest kwetsbare deel van de MAG-apparatuur. Goed afstellen van de draadaanvoerrollen, regelmatig schoonblazen van de draadgeleiding

(liner) en frequent vervangen van de contactbuis is noodzakelijk. De voorkeur moet worden gegeven aan een draad-aanvoermecanisme met minimaal vier aandrijfrollen, een planetaire aandrijving of een duwbandaandrijving. Hierdoor wordt een betere greep op de draad verkregen, waardoor de aandrukkracht op de lasdraad beperkt kan zijn. Dit wordt belangrijker als de te verlassen draden zachter zijn. De groeven in de draadrollen moeten aangepast zijn aan de te gebruiken draaddiameter en de te verlassen draden. Bij het lassen van roestvast staal verdient het aanbeveling altijd een teflon draadgeleider (liner) in de kabel gebruiken om adhesie tussen de metalen te vermijden.

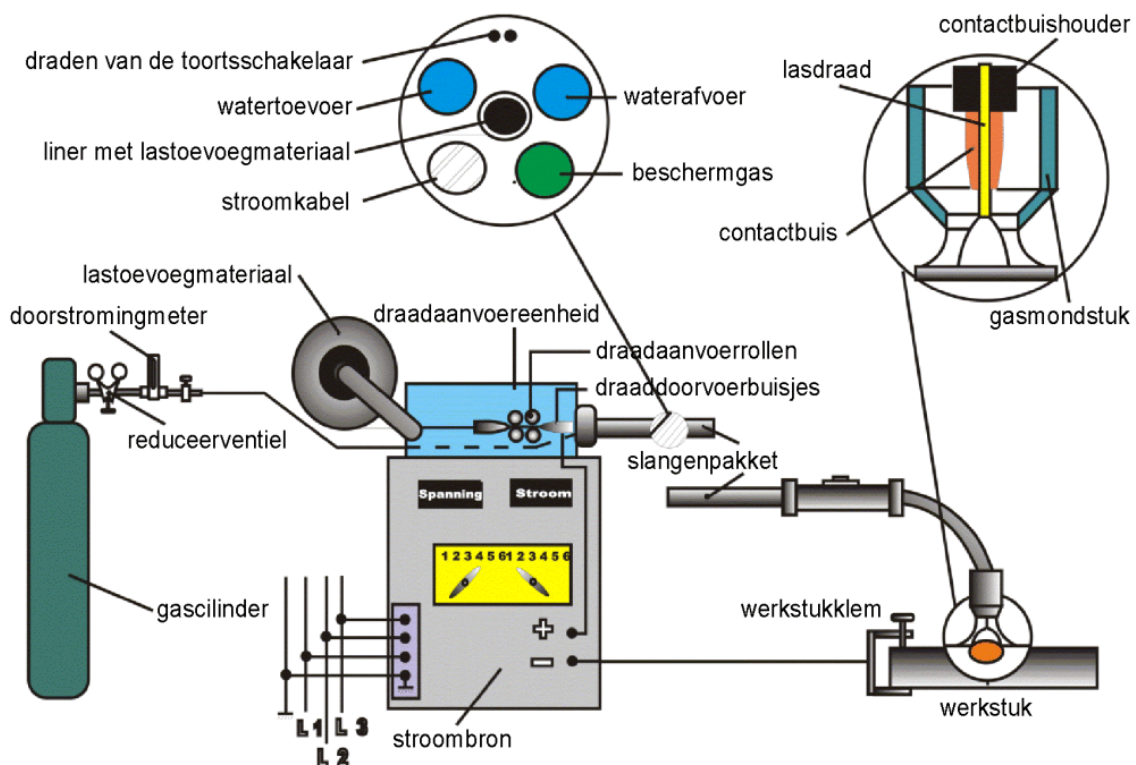
Voor het met de hand lassen van roestvast staal komen doorgaans de draaddiameters 0,8 tot 1,2 mm in aanmerking. Het gemechaniseerd lassen kan tot een draaddiameter van 1,6 mm worden uitgevoerd. Voor het met de hand lassen van gevulde draad worden meestal draden van Ø1,0, 1,2 en soms 1,6 mm gebruikt.

Het beschermgas kan worden verkregen uit een gascilinder gemonteerd op de lasmachine zelf. Bij voorkeur worden echter de cilinders buiten geplaatst in aparte ruimten en getransporteerd via een centraal leidingsysteem naar de lasplaats. Bij gebruik van grote hoeveelheden van hetzelfde gas kan ook gebruik worden gemaakt van bulkopslag, waarbij het beschermgas eveneens via een ringleiding naar de laswerkplaats wordt getransporteerd.

6.3.3 Druppelafsplitsing

Bij het MAG-lassen kan een aantal manieren worden onderscheiden ten aanzien van de wijze waarop de druppel van de lasdraad wordt afsplitst, er wordt dan ook wel over 'boogtypen' gesproken. De boogtypen waarmee kan worden gelast, bepalen in belangrijke mate het toepassingsgebied van het MAG-lassen. Zo wordt onderscheiden het:

- ▶ kortsluitbooglassen;
- ▶ open booglassen waaronder het:
 - sproeiboog lassen;
 - pulsboog lassen;
 - roterende boog lassen.



figuur 6.2 Schema van MIG/MAG-apparatuur

Kortsluitboog lassen

Het kortsluitboog lassen (figuur 6.3) wordt veelal uitgevoerd met massieve draden met diameters van 0,8 tot 1,2 mm. Als gevolg van de betrekkelijk lage boogspanning en stroomsterkte is de warmte-inbreng tijdens het kortsluitboog lassen gering en kan er in alle posities worden gelast. Het kortsluitboog lassen wordt voornamelijk gebruikt voor het maken van doorlassingen in pijp en plaat en het lassen van dunne plaat.

Nadelen van de geringe warmte-inbreng zijn dat er, bij een onjuiste uitvoering van het lassen, bindingsfouten kunnen optreden en het wat grovere uiterlijk van de las.

De lasstroom is bij het kortsluitboog lassen vrijwel altijd lager dan 200 A bij lasspanningen tussen de 15 en 20 Volt. Voordelen van het kortsluitboog lassen zijn:

- ▶ weinig warmte-inbreng en dus kleine vervormingen van de te verbinden delen;
- ▶ er kan in alle posities worden gelast;
- ▶ het lassen van dunne plaat is uitstekend mogelijk;
- ▶ er kunnen uitstekend doorlassingen mee worden gemaakt.

Er zijn echter ook beperkingen te noemen, zoals:

- ▶ de kleine warmte-inbreng maakt dat de lasser alert moet zijn op het voorkomen van bindingsfouten, wel is dit gevaar bij roestvast staal kleiner dan bij ongelegeerd staal door de slechtere warmtegeleidbaarheid van roestvast staal;
- ▶ het kortsluitbooglassen is minder geschikt voor het afvullen van lasnaden (economie);
- ▶ bij onjuiste instellingen van de apparatuur kunnen spat-ten optreden.

Openboog lassen - sproeiboog lassen

Bij het sproeiboog lassen (figuur 6.4) wordt meestal gebruikgemaakt van lasdraden met een diameter van 1,0 tot 1,6 mm. Door de hogere boogspanning en stroomsterkte is de warmte-inbreng groter dan bij het kortsluitboog lassen. De vorm van de druppelafsplitsing is onder andere afhankelijk van het type lasdraad, het type beschermgas, de uitsteeklengte en de ingestelde lasparameters. Het sproeiboog lassen wordt specifiek toegepast voor het lassen van dikkere plaat. De afsplitsing van de druppels kenmerkt zich bij het sproeiboog lassen door een stroom van zeer fijne druppel-

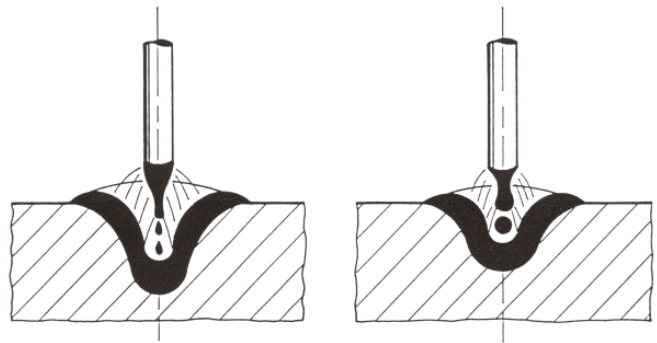
tjes die zich vrij door de boog bewegen. Het sproeiboog lassen wordt vrijwel alleen in de PA en PB positie toegepast (zie figuur 6.1).

Voordelen van het sproeiboog lassen zijn:

- ▶ een hoge neersmelt en dus hoge lassnelheden;
- ▶ goede aanvloeiing van de laskanten, waardoor bindingsfouten kunnen worden voorkomen;
- ▶ fraai en glad uiterlijk van de las.

Er zijn ook beperkingen te noemen, zoals:

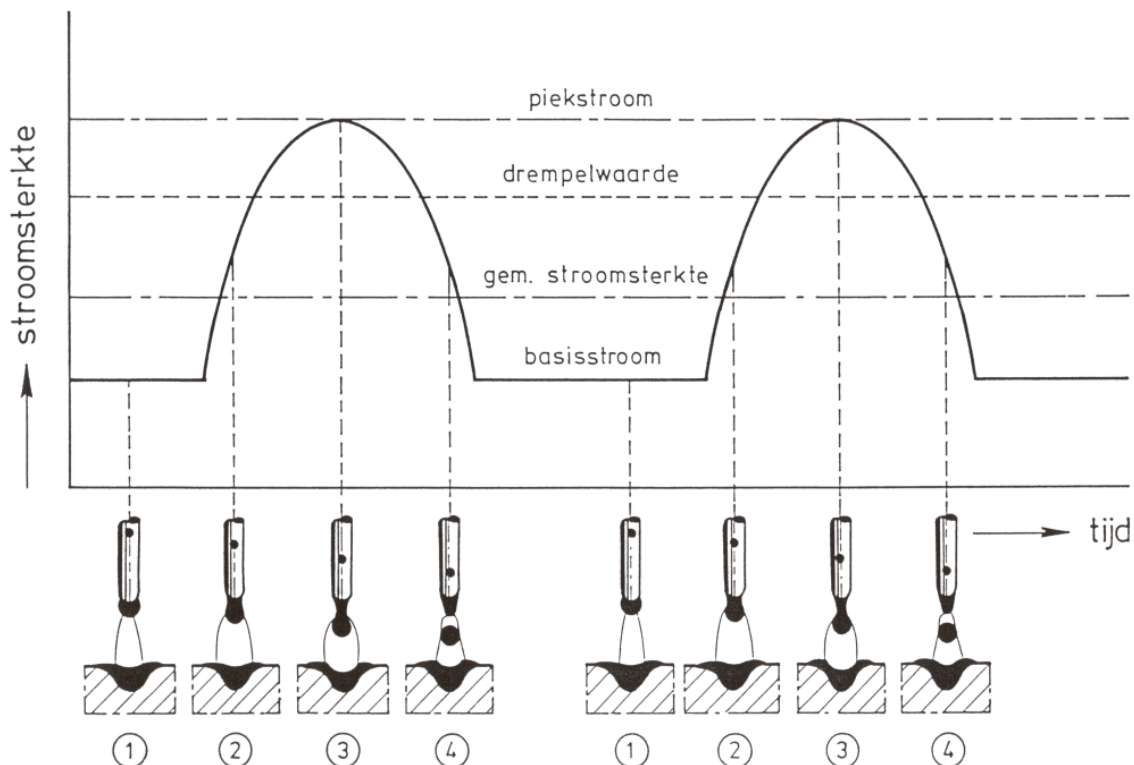
- ▶ grote warmte-inbreng, waardoor de structuur van het materiaal negatief wordt beïnvloed en er meer kans is op het vervormen van het product of de productdelen;
- ▶ door de dunvloeibaarheid van het smeltbad kan uitsluitend onder de hand worden gelast of kunnen er staande hoeklassen worden gelegd;
- ▶ sterke verkleuring bij het lassen van roestvast staal.



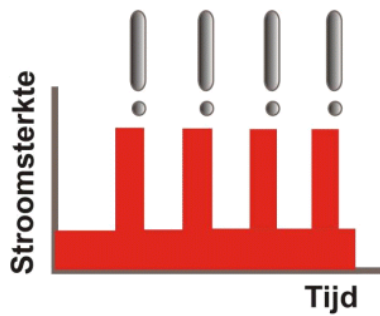
figuur 6.4 Vormen van druppelafsplitsing bij het openboog lassen. Links de druppelafsplitsing bij een sproeiboog en rechts bij een pulsboog

Openboog lassen - pulsboog lassen

Bij het pulsboog lassen (zie figuur 6.4 rechts en 6.5) kunnen de voordelen van het kortsluitboog- en het sproeiboog lassen worden gecombineerd en de nadelen zoveel mogelijk geëlimineerd. Het is namelijk bij het pulsboog lassen uitstekend mogelijk om in positie te lassen, waarbij de inbranding beter is gewaarborgd en de kans op bindingsfouten kleiner is.



figuur 6.3 Het kortsluitbooglassen (verschillende stadia van de druppelafsplitsing)



figuur 6.5 Schematische weergave van het pulsboog lassen: één druppel per puls

Bij het pulsboog lassen wordt gelast met afwisselend een lage basisstroom, die slechts dienst doet om de boog in stand te houden, en een korte, hoge piekstroom. De piekstroom zorgt voor de druppelafsplitsing en de inbranding. Om met een pulsboog te kunnen lassen moet de MAG-apparatuur zijn voorzien van een speciale regeling. In veel gevallen is tegenwoordig de MAG-apparatuur standaard voorzien van de mogelijkheid om met een pulsboog te kunnen lassen.

Om het instellen van de lasparameters bij het pulsboog lassen te vergemakkelijken, zijn er voorgeprogrammeerde stroombronnen op de markt (synergische stroombronnen) waarbij, na het kiezen van het type lasdraad, de draaddiameter en het type beschermgas, de andere lasparameters automatisch worden ingesteld. De synergische pulsboog apparatuur stelt de lasparameters zodanig in, dat er één druppel per puls (tijdens de piekstroom) wordt afgesplitst (zie figuur 6.5). Uit onderzoek is namelijk gebleken dat hierbij de meest stabiele procesvoering wordt verkregen. De toe te passen lastoevoegmaterialen zijn niet anders dan bij het lassen met een continue stroomsterkte en kunnen worden gevonden in tabel 2.8 van hoofdstuk 2.

Voordelen van het pulsboog lassen zijn:

- ▶ warmte-inbreng tussen het kortsluitboog lassen en het sproei-boog lassen in, hierdoor kan er met een open las-boog in positie worden gelast;
- ▶ goede aanvloeiing van de lasranden, waardoor bindingsfouten kunnen worden voorkomen;
- ▶ fraai en glad uiterlijk van de las zonder spatten;
- ▶ lassen van geringe materiaaldikten;
- ▶ er kan met dikker lasdraden worden gelast, waardoor er minder kans is op draadstoringen.

Er zijn ook beperkingen te noemen van het pulsboog lassen, zoals:

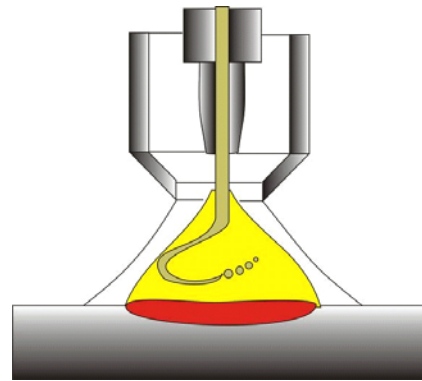
- ▶ minder geschikt voor het maken van doorlassingen, doordat er met een openboog wordt gelast;
- ▶ vrij sterke verkleuring bij het lassen van roestvast staal.

Openboog lassen - roterendeboog lassen

Als vanuit het traditionele openboog lassen de spanning en stroomsterkte verder worden opgevoerd, ontstaat bij hoge spanningen en stroomsterkten, in combinatie met een vergrote uitsteeklengte, een zogenaamde roterende boog, ook wel gemodificeerde openboog genoemd.

De combinatie van de genoemde factoren zorgt ervoor dat het draaduiteinde verweekt, waardoor dit tengevolge van de erop uitgeoefende elektromagnetische krachten gaat roteren (zie figuur 6.6).

De verweking van het draadeinde wordt veroorzaakt door de weerstandsverhitting van het uit de contactbuis stekend draadeinde. Naast de grotere uitsteeklengte spelen ook het type lastoevoegmateriaal, de afmetingen hiervan en het type beschermgas een belangrijke rol of en wanneer er een roterende boog wordt verkregen. Het MAG-lassen met een roterende boog kan, afhankelijk van de gekozen instellingen, zowel voor het oplassen van roestvast staal worden gebruikt als voor het verbindingslassen.



figuur 6.6 Roterende boog bij het MAG-lassen

Doordat er gewerkt wordt met hoge stroomsterkten en dus draadsnelheden, wordt er veel materiaal per tijdseenheid neergesmolten of kunnen er hoge lassnelheden worden bereikt. Hierdoor is de roterende boog een efficiënt boogtype om mee te lassen. De keerzijde hiervan is dat het lasbad groot is en dat deze variant hierdoor alleen geschikt is voor het lassen onder de hand (PA positie).

Het roterendeboog lassen stelt speciale eisen aan de lasapparatuur (stroombron, draadaanvoereenheid, lastoorts) en wordt tegenwoordig door een aantal leveranciers op de markt gebracht als alternatief voor het traditionele MAG-lassen. Soms wordt ook wel gesproken van het hoogvermogen MAG-lassen. De apparatuur heeft een hogere aanschafprijs dan de traditionele MAG-apparatuur.

Voordelen van het roterendeboog lassen zijn:

- ▶ er kunnen hoge lassnelheden en neersmeltsnelheden worden bereikt;
- ▶ de kans op lasfouten is betrekkelijk gering door de grote warmte-inbreng.

Er zijn ook beperkingen, zoals:

- ▶ de grote warmte-inbreng beïnvloedt de structuur van het materiaal in negatieve zin;
- ▶ de grote warmte-inbreng zorgt voor een aanzienlijke vervorming van de te verbinden delen;
- ▶ de apparatuur is kostbaar (hoog vermogen, speciale draad-aanvoereenheid), 2 - 4 × standaard MAG-apparatuur;
- ▶ er kan alleen maar in de PA positie worden gelast;
- ▶ zeer sterke verkleuring van de las en WBZ bij het lassen van roestvast staal.

6.3.4 Beschermgassen

Bij het MAG-lassen van roestvast staal speelt de keuze van het beschermgas een belangrijke rol. Het beschermgas heeft namelijk invloed op de chemische samenstelling van het lasmetaal, de structuur van het lasmetaal die vervolgens weer van invloed is op de corrosievastheid, de mechanische eigenschappen en het visuele uiterlijk van de las. De basis van het beschermgas voor het MAG-lassen van roestvast staal is argon met daaraan toevoegingen van zuurstof (O_2), koolzuur (CO_2), helium en waterstof of een combinatie van deze gassen.

Het gehalte aan CO_2 moet worden beperkt tot maximaal 3% om opkoling en dus een teruggang van de corrosie-eigenschappen te vermijden. Om ongewenste afbrand van legeringselementen tegen te gaan en om te voorkomen dat de las onnodig sterk oxideert, moet het gehalte aan O_2 in het beschermgas eveneens worden beperkt tot maximaal 2%. Door toevoeging van zuurstof wordt de oppervlaktespanning van het vloeibare metaal verminderd, waardoor een fijnere druppelovergang ontstaat en het smeltbad mooier aanvloeit. Het lassen in positie wordt echter lastiger als het zuurstofgehalte in het beschermgas toeneemt.

Door helium toevoegingen aan het beschermgas wordt meer boogenergie verkregen en wordt de inbranding breder en ronder van vorm. Door de grotere boogenergie onder helium houdende beschermgasmengsels kan bij het MAG-lassen

met hogere lassnelheden worden gelast. Er zit echter ook een risico aan, dat door de slechte warmtegeleiding van roestvast staal er oververhitting van het smeltbad optreedt, waardoor de kwaliteit van de lasverbinding in gevaar kan komen.

Een geringe toevoeging van waterstof aan het beschermgasmengsel maakt bij het MAG-lassen een iets hogere lassnelheid mogelijk, maar belangrijker is dat waterstof (2-5%) een reducerende werking heeft en daardoor een minder geoxideerde las. Dergelijke beschermgasmengsels mogen overigens niet in materiaalcombinaties worden gebruikt die gevoelig zijn voor waterstof geïnitieerde scheurvorming (bijvoorbeeld de duplex en de martensitische roestvaste staaltypen).

Specifieke beschermgasmengsels worden vaak aanbevolen voor het kortsluit-, sproe- en pulsboog lassen.

Tabel 6.6 geeft een samenvatting van beschermgasmengsels die gebruikt kunnen worden voor het MAG-lassen van roestvast staal. Deze tabel is zeker niet volledig, elke gasleverancier heeft vaak zijn eigen onderscheidende beschermgasmengsels voor algemene en/of specifieke toepassingen.

tabel 6.6 Overzicht van een aantal beschermgasmengsels voor het MAG-lassen van roestvast staal

%Ar	%CO ₂	%O ₂	%H ₂	%He	toepassing en/of eigenschappen
98	–	–	2	–	
95	–	–	5	–	goede penetratie
98-99	–	1-2	–	–	goede lasbaarheid, gunstig voor sproeiboog lassen, meer oxidatie van het oppervlak
98	2	–	–	–	mooie aanvloeiing. Universeel toepasbaar
96	3	–	1	–	goede lasbaarheid, iets ingesnoerde boog, pulsboog lassen, blank lasuiterlijk. Niet gebruiken voor duplex en martensitisch roestvast staal
72,5	2,5			25	meer boogenergie, pulsboog lassen

Bovenstaande aanbevelingen gelden voor het MAG-lassen met massieve draden. Bij het MAG-lassen met gevulde draden neemt de slak voor een deel de bescherming van het smeltbad en de overgaande metaaldruppels over. Het traditionele MAG-lassen is niet (zonder meer) geschikt voor toepassing in de buitenlucht. Tocht en wind kunnen de gasbescherming verstoren, wat tot poreusheid in de las kan leiden. Als richtwaarde wordt wel een maximale toelaatbare lichtsnelheid van 0,5 m/s aanbevolen. Moet het lasproces wel buiten worden toegepast, dan moeten voorzorgsmaatregelen worden genomen (bijvoorbeeld het plaatsen van een lastent).

6.3.5 Lastoevoegmaterialen

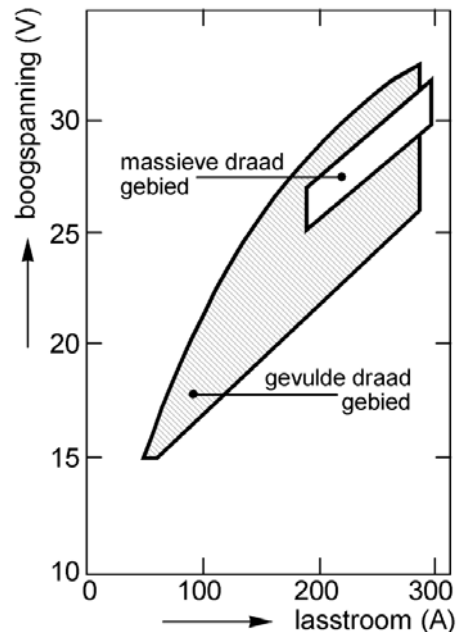
Massieve lasdraden

Leveranciers van lastoevoegmaterialen hebben voor het MAG-lassen van vrijwel alle roestvaste staalsoorten, massieve lasdraden ontwikkeld. In massieve lasdraden zijn de oxidatiegevoelige elementen met een nauwkeurig vastgestelde overmaat aanwezig om afbrand te kunnen compenseren. Voor massieve lastoevoegmaterialen is een verdere aanpassing niet mogelijk en in veel gevallen ook niet nodig. Aanpassing aan laspositie, lasnaadvorm en materiaaldikte wordt gevonden in de procesparameters in combinatie met de diameter van het lastoevoegmateriaal. Dit houdt in, dat als het te lassen materiaal bekend is, de keuze van het toe te passen (massieve) lastoevoegmateriaal over het algemeen beperkt is. Als algemene vuistregel wordt wel gehanteerd dat de chemische samenstelling van het lastoevoegmateriaal minimaal gelijk moet zijn aan het basismateriaal, dit geldt ook voor duplex roestvast staal. Zoals gebruikelijk bij het lassen zijn hier echter weer vele uitzonderingen op,

wat niet in de laatste plaats veroorzaakt wordt door de grote diversiteit aan roestvaste staalsoorten.

Gevulde lasdraden

Gevulde draden worden over het algemeen gebruikt vanwege de hogere neersmeltsnelheden en/of lassnelheden die kunnen worden bereikt. Het gebruik van gevulde lasdraden verruimt over het algemeen ook het werkgebied bij het MAG-lassen zoals te zien is in figuur 6.7.



figuur 6.7 Werkgebieden voor het MAG-lassen met massieve en gevulde lasdraden

Gevulde lasdraden, die verlast worden onder beschermgas zijn in drie groepen te verdelen n.l.:

► Rutiel gevulde lasdraden

Deze hebben laseigenschappen die vergelijkbaar zijn met rutiel elektroden. In deze groep wordt onderscheid gemaakt in snelstollende typen geschikt voor het lassen in alle posities en langzaam stollende typen. Moderne rutiel gevulde lasdraden zijn de zogenaamde microgelegeerde lasdraden met als belangrijkste verbetering een verbeterde kerftaaiheid van het lasmetaal. Rutiel gevulde draden geven een mooi glad lasuiterlijk met een beperkte overdikte van de las. De slaklossing is uitstekend. Vanwege de goede aanvloeiing van deze draden worden ze wel ingezet voor het vervaardigen van lassen in dynamisch belaste constructies.

► Basische gevulde lasdraden

Deze lasdraden hebben het karakter en eigenschappen die vergelijkbaar zijn met een basische elektrode en worden vooral ingezet als er eisen worden gesteld aan de mechanische eigenschappen van de lasverbindingen. Ook voor het maken van doorlassingen zijn basische gevulde draden aan te bevelen. Over het algemeen is het lasuiterlijk ruwer, de slaklossing slechter en zijn de lassen boller ten opzichte van bijvoorbeeld rutiel gevulde draden. Dit kan bij dynamisch belaste constructies een nadeel zijn.

► Metaalpoeder gevulde lasdraden

Dit is een gevulde lasdraad die zeer weinig slak geeft en die vooral wordt gebruikt voor het gemechaniseerd lassen (robots) vanwege het feit dat de slak voor het leggen van opeenvolgende lagen niet verwijderd hoeft te worden. Bij metaalpoedergepulde lasdraden wordt, met gelijke lasparameters, een hogere neersmelt verkregen ten opzichte van een massieve lasdraad. De mechanische eigenschappen van de lasverbinding zijn te vergelijken met een massieve lasdraad.

De rutiel- en metaalpoeder gevulde lasdraden worden het meest ingezet van alle gevulde lasdraden voor het lassen van roestvast staal. Tabel 6.7 geeft een overzicht van toepasbare massieve en gevulde lasdraden voor het lassen van roestvast staal.

6.3.6 Lasnaadvoorbewerkingen

Voor het aanbrengen van lasnaadkanten ten behoeve van het MAG-lassen kunnen dezelfde methoden worden gebruikt als bij het lassen met beklede elektroden (Bmbe), zie hiervoor tabel 6.3.

6.3.7 Lasparameters

Voor het instellen van de apparatuur bij het MAG-lassen met massieve draad onder Ar - 2% CO₂ beschermgas is een aantal richtwaarden in figuur 6.8 weergegeven.

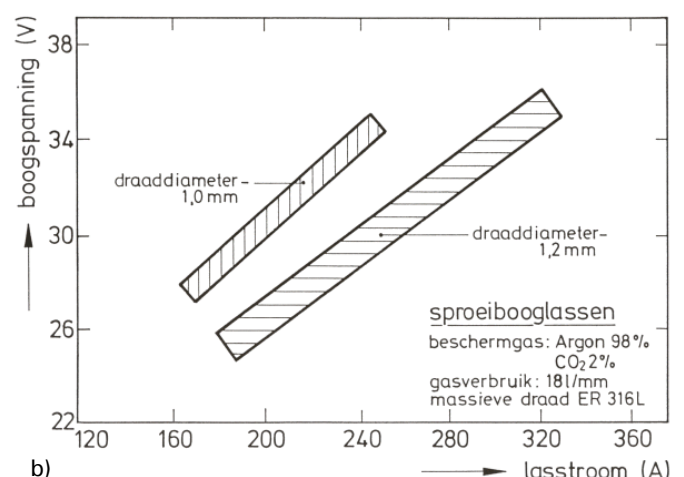
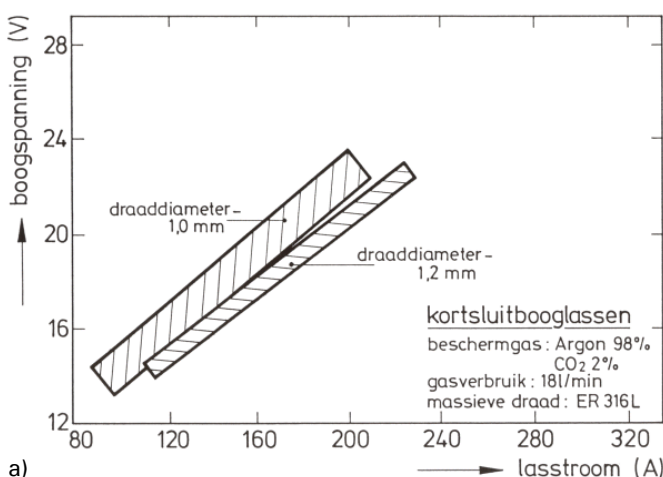
Onderscheid is gemaakt tussen het kortsluit- en het sproei-boog lassen voor twee draaddiameters te weten 1,0 en 1,2 mm.

Voor het MAG-lassen met gevulde draad zijn in tabel 6.8 globale richtwaarden bij het lassen van verschillende draaddiameters ten aanzien van de stroomsterkte, boogspanning en de neersmeltsnelheid gegeven.

Voor het lassen van grotere materiaaldikten (> 3 mm) is het MAG-lassen een veel economischer proces dan het TIG-lassen (zie hierna). Het proces kan met succes worden ingezet voor zowel het lassen van plaat, profiel als pijp. Een groot voordeel hierbij is dat het proces zeer goed gemechaniseerd kan worden toegepast. De meeste robots die worden gebruikt voor het lassen van roestvaststalen producten zijn uitgerust met het MAG-lasproces.

tabel 6.7 Overzicht van toepasbare massieve en gevulde lasdraden voor het MAG-lassen van roestvast staal

basismateriaal			lastoevoegmateriaal	
NEN-EN 10088		AISI	NEN-EN-ISO 14343	NEN-EN-ISO 17633
naam	nummer		massieve draden	gevulde draden
X5CrNi18-10	1.4301	304	G 19 9 L	T 19 9 L
X2CrNi18-9	1.4307	304 L	G 19 9 L	T 19 9 L
X2CrNi19-11	1.4306			
X5CrNiTi18-10	1.4541	321	G 19 9 Nb	T 19 9 Nb
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	316	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	316 L	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571	316 Ti	G 19 12 3 Nb	T 19 12 3 Nb
X2CrNiMo18-15-4	1.4438	317 L	G 19 13 4 L	T 19 13 4 N L
X10CrNi18-8	1.4310	301	G 19 9 L	T 19 9 L
X2CrNiN18-7	1.4318	301 L	G 19 9 L	T 19 9 L
X12CrNi23-13	1.4833	309 S	G 22 12 H	T 22 12 H
X8CrNi25-21	1.4845	310 S	G 25 20	T 25 20
X2CrTi12	1.4512	409	G 19 9 L	T 13 Ti
X6Cr17	1.4016	430	G 17 of G 19 9 L	T 17 of T 19 9 L
X3CrTi17	1.4510	430 Ti/439	G 23 12 L	T 23 12 L
X2CrMoTi18-2	1.4521	444	G 19 12 3 L	T 19 12 3 L
X2CrTiNb18	1.4509	441	G 23 12 L	T 23 12 L
X6CrMo17-1	1.4113	434	G 19 12 3 L	T 19 12 3 Nb
X2CrNiN23-4	1.4362	–	G 25 7 2 L	T 25 9 3 N L
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	–	G 25 7 2 L	T 22 9 3 N L
X12G13	1.4006	410	G 13 of G 19 9 L	T 13 of T 19 9 L
X20Cr13	1.4021	–	G 13 of G 19 9 L	T 13 of T 19 9 L
X30Cr13	1.4028	420	G 13 of G 19 9 L	T 13 of T 19 9 L



figuur 6.8 Richtwaarden voor de in te stellen boogspanning en stroomsterkte bij het kortsluit- (a) en sproei-booglassen (b)

tabel 6.8 Richtwaarden voor het lassen met gevulde draad

draaddiameter	lasstroom	boogspanning	neersmeltsnelheid
(mm)	(A)	(V)	(g/min)
1,0	60	19	22
	80	20	26
	100	21	30
1,2	100	20	25
	150	21	45
	200	24	60
1,4	150	20	40
	200	23	70
	250	26	80
1,6	150	28	45
	250	30	90
	350	36	170

6.4 TIG-lassen

6.4.1 Inleiding

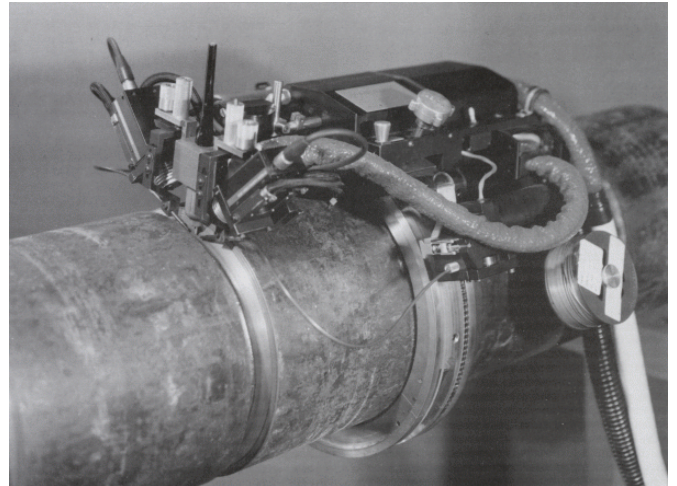
TIG-lassen is een gasbooglasproces waarbij de toevoegdraad en de warmte onafhankelijk van elkaar worden toegevoerd. De warmte wordt opgewekt door de boog tussen de - niet afsmeltende - wolframelektrode en het werkstuk. De naam TIG is afkomstig van de Engelse aanduiding "Tungsten Inert Gas". De Angelsaksische afkorting is GTAW, die staat voor "Gas Tungsten Arc Welding". De Duitse aanduiding is WIG (Wolfram Inert Gas).

Het TIG-lassen wordt hoofdzakelijk gebruikt voor het lassen van dun roestvast staal tot ca. 4 mm, voor het maken van doorlassingen in pijp en plaat en het in positie lassen van pijp. Bij meer dan 3 mm materiaaldikte wordt het TIG-lassen vrijwel uitsluitend toegepast voor het leggen van grondlagen. Boven de 3 mm materiaaldikte is het namelijk minder economisch het TIG-lassen toe te passen door de relatief lage lassnelheid. In figuur 6.9 is het TIG-lassen schematisch weergegeven.

Het TIG-lassen van roestvast staal kan met een continue of met een pulserende gelijkstroom worden uitgevoerd. Voor het lassen van dun roestvast staal (materiaaldikte < 1 mm) zijn ook wel toepassingen bekend waarbij met wisselstroom wordt gelast, dit moet toch als uitzondering worden gezien.

Het TIG-pulsboog lassen biedt een aantal voordelen:

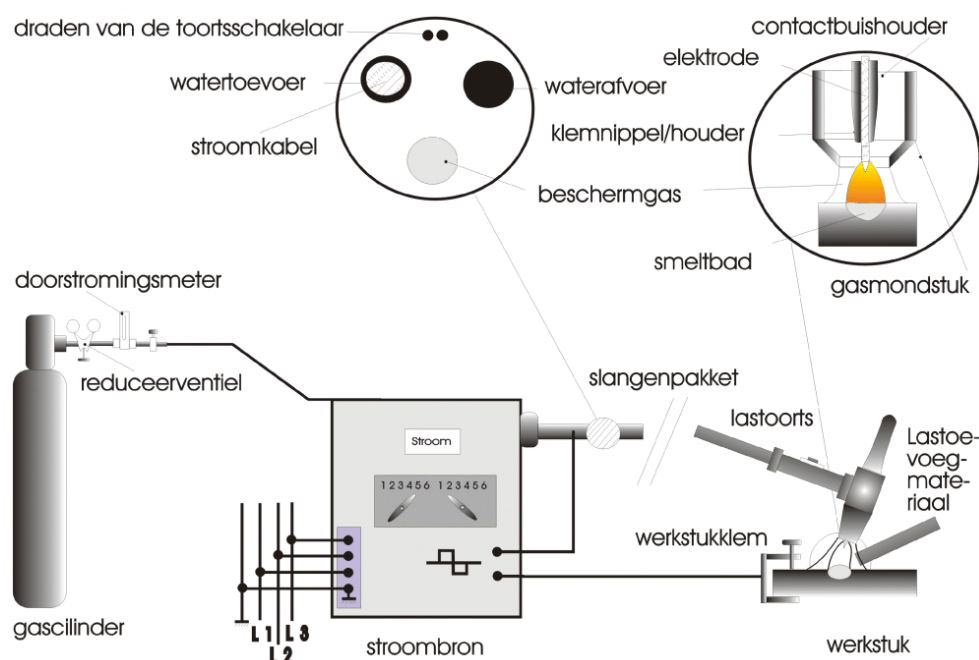
1. Bij het in positie lassen wordt een betere smeltbadbeheersing verkregen.
2. De vorm van de las is door de instelling van procesparameters (o.a. pulstijd en stroomsterkte) te beïnvloeden.
3. Het TIG-pulsboog lassen is bij uitstek een proces om gemechaniseerd in alle posities toe te passen. Een voorbeeld is het maken van pijpverbindingen met orbitale laskoppen, waarbij het TIG-pulsboog proces wordt ingezet, dit is weergegeven in figuur 6.10.



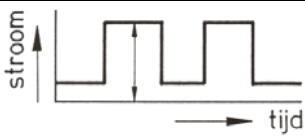
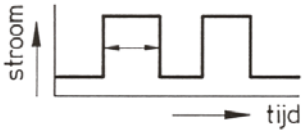
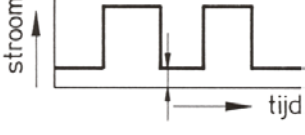
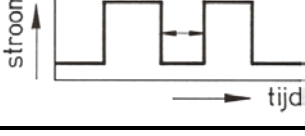
figuur 6.10 Orbitale laskop voor het TIG-pulsboog lassen van pijpen

In figuur 6.11 zijn de invloeden van de in te stellen functies bij het TIG-pulsboog lassen (tijd en stroom) weergegeven. Er kan bij het TIG-pulsboog lassen zowel met als zonder toevoegmateriaal worden gelast.

Het TIG-lassen is niet geschikt voor toepassing in de buitenlucht. Tocht en wind kunnen de gasbescherming verstoren, wat tot poreusheid in de las kan leiden. Als richtwaarde wordt wel een maximale toelaatbare luchtsnelheid van 0,25 m/s aanbevolen. Moet het proces buiten worden toegepast, dan moeten voorzorgsmaatregelen worden genomen om de gasbescherming te waarborgen (bijvoorbeeld het plaatsen van een lastent).



figuur 6.9 Schematische weergave van het TIG-lassen

	functie	beïnvloeding
	PULSSTROOM	smeltbad vorming
	PULSTROOMTIJD	badbreedte
	GRONDSTROOM	mate van stolling
	GRONDSTROOMTIJD	▶ stollingstijd smeltbad ▶ verplaatsing elektrode naar de rand van het smeltbad ▶ synchronisatie van gemechaniseerde lasprocessen

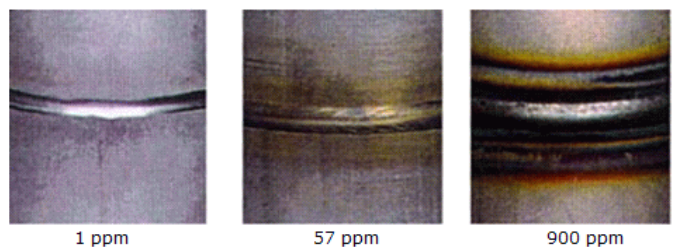
figuur 6.11 Invloed van de stroom en bijbehorende tijden op het lasbad bij het TIG-pulsboog lassen

6.4.2 Beschermgassen voor het TIG-lassen

De bescherming van het smeltbad bij het TIG-lassen is gebaseerd op het verdringen van de omgevingslucht door een (bijna altijd) inert gas. Naast het smeltbad moeten ook de elektrode en het lastoevoegmateriaal worden beschermd tegen invloeden vanuit de omgevingslucht. In de meeste gevallen wordt voor het TIG-lassen van roestvast staal argon als beschermgas gebruikt. De ontsteekspanning bij dit beschermgas is relatief laag, terwijl ook de boogspanning laag is, wat de stabiliteit van de boog bevordert. De zuiverheid van het beschermgas moet beter zijn dan 99,996% (kwaliteit 4.6 - EN 439). Gezien de gewenste zuiverheid moet aandacht worden geschonken aan de gasdichtheid van het gehele gasleidingssysteem. Dat geldt vanaf de gascilinder tot aan de lastoorts. Toevoeging van 2 tot 5% waterstof verhoogt de boogspanning iets en dus neemt bij gelijke lassnelheid de hoeveelheid ingebrachte warmte ook iets toe. Waterstof werkt reducerend, zodat een blanker oppervlak van de las en zijn directe omgeving wordt verkregen, hierdoor kan de nabewerking worden verminderd. Bij voor waterstof gevoelige materialen, zoals de duplex en martensitische roestvaste staalsoorten, kunnen argon/helium mengsels worden gebruikt, bijvoorbeeld in de verhouding 75/25 of 70/30.

6.4.3 Backing- of formeergassen

Om te voorkomen dat het smeltbad aan de achterzijde oxideert door contact met de lucht (zuurstof), moet aan die zijde bij het lassen van roestvast staal altijd een gasbescherming (backinggas) worden aangebracht. Tengevolge van deze oxidatie van de las of het basismateriaal neemt de corrosiebestendigheid van de verbinding af. Backinggas is de algemene naam voor gassen die gebruikt worden om de doorlaszijde van de las te beschermen. De naam formeergas wordt gebruikt voor specifieke gasmengsels bestaande uit stikstof met waterstof. Formeergas is oorspronkelijk een handelsnaam maar is in de loop der jaren zo ingeburgerd in de lastechniek, dat deze naam voor de meeste lassers synoniem is aan backinggas of omgekeerd. Oxidatie van de doorlassing is zichtbaar als een verkleuring variërend van lichtbruin tot blauw. Al bij zeer kleine hoeveelheden zuurstof treedt deze verkleuring op zoals te zien is in figuur 6.12.



figuur 6.12 Verkleuring van de doorlaszijde afhankelijk van het zuurstofgehalte in argon (1 ppm = 1 deeltje op een miljoen deeltjes en 0,1% = 1000 ppm)

Het gebruik van een backinggas aan de doorlaszijde zorgt ook voor gladde doorlassingen. De volgende gassen of gasmengsels worden als backinggas voor roestvast staal gebruikt:

- ▶ stikstof-waterstof mengsels;
- ▶ argon-waterstof mengsels;
- ▶ argon.

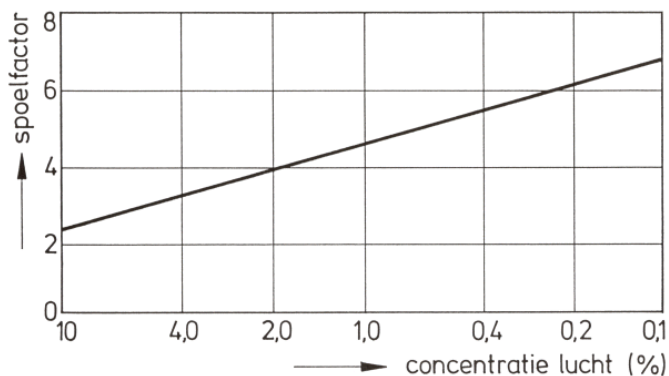
Stikstof/waterstof gasmengsels (formeergas) worden veel gebruikt voor roestvast staal, omdat ze relatief goedkoop zijn. Het waterstofgehalte kan variëren van 5 tot 20%. Bij het lassen van voor waterstof gevoelige roestvaste staaltypen (duplex, martensitisch roestvast staal), moet van het gebruik van waterstofhoudende backinggasmengsels worden afgezien. Wanneer het H₂-gehalte groter is dan 10%, is het, uit veiligheidsoverwegingen in verband met het explosiegevaar, noodzakelijk het uitstromende gas "af te fakkelen" = te verbranden.

Bij het gebruik van argon en argon/waterstof als backinggas moet er rekening mee worden gehouden, dat dit zwaarder is dan lucht. Bij het lassen van een horizontale pijp bestaat de kans dat op de "12 uur positie" het backinggas de aanwezige lucht niet voldoende heeft verdrongen. Stikstof/waterstofmengsels zijn lichter dan lucht, waardoor het omgekeerde kan plaatsvinden. Daarom wordt om een zo goed mogelijke verdeling van het backinggas te verkrijgen vaak gebruik gemaakt van gesinterd koper, waar het backinggas doorheen stroomt. Op deze manier wordt een alzijdige verdeling van het backinggas verkregen en ontstaat er een zodanige stroming, dat "dode" gebieden waar de lucht aanwezig blijft, kunnen worden voorkomen (zie figuur 6.13).



figuur 6.13 Backinggassysteem met een gesinterde uitstroomopening

Het verdringen van alle lucht uit een systeem is niet eenvoudig. Bij 4 à 5 × doorspoelen van het te spoelen volume resteert altijd nog een luchtconcentratie van ca. 1%. In figuur 6.14 is de relatie van het aantal malen spoelen (de spoelfactor) en de luchtconcentratie weergegeven.



figuur 6.14 Spoelfactor in relatie tot de concentratie lucht

Voorspoelen

Om een voldoende lage concentratie van zuurstof en vocht (waterdamp) te bereiken, moet worden voorgespoeld. Daarbij moet de las, als er sprake is van een vooropening, worden afgeplakt, wat meestal door middel van aluminium tape plaatsvindt. Bij het lassen met een vooropening moet de afdichtingstape zorgvuldig en in kleine stapjes worden verwijderd. De uitstroomopening(en) moet(en) kleiner zijn dan de instroomopening om weglekken van backinggas door de naadopening te compenseren. Bij het voorspoelen moet worden gekozen voor een bepaald gasdebiet (l/min) en een bepaalde spoeltijd (min). De duur van het voorspoelen wordt bepaald door twee factoren, namelijk de grootte van de te spoelen ruimte en de stroomsnelheid (flow) van het backinggas.

Om turbulentie in een pijp te voorkomen moet het gasdebiet (in l/min) kleiner zijn dan tweemaal de diameter van de pijp (in mm). Een te laag gasdebiet leidt echter tot zeer lange spoeltijden. Gebruikelijke waarden voor het gasdebiet zijn 5 - 25 l/min. Na keuze van het gasdebiet kan de (minimale) spoeltijd voor een pijp worden berekend [17] uit:

$$t = \frac{4 \cdot 10^{-6} \cdot D^2 \cdot L}{F}$$

waarin:

- t = spoeltijd (min)
- D = diameter (mm)
- L = lengte backingkamer (mm)
- F = gasdebiet (l/min)

Deze berekening is gebaseerd op de vuistregel dat het volume van de backingkamer minimaal 5 × doorspoeld moet worden. Enkele getallenvoorbeelden van de voorspoeltijd (in min) zijn in tabel 6.9 weergegeven.

tabel 6.9 De minimale voorspoeltijd in minuten bij verschillende waarden van het gasdebiet, diameter van de pijp en de lengte van de backingkamer [17]

gas-debiet	L1 = 500 mm			L2 = 1000 mm		
	D1	D2	D3	D1	D2	D3
l/min	50 mm	150 mm	250 mm	50 mm	150 mm	250 mm
5	1 min	9 min	25 min	2 min	18 min	50 min
10	0,5 min	4,5 min	13 min	1 min	9 min	25 min
15	0,3 min	3 min	8,3 min	0,7 min	6 min	17 min
20	0,3 min	2,3 min	6,3 min	0,5 min	4,5 min	13 min
25	0,2 min	1,8 min	5 min	0,4 min	3,6 min	10 min

De waarden in deze tabel moeten als minimale waarden worden beschouwd en gelden niet daar waar hoge eisen worden gesteld aan de kwaliteit van de doorlassing. Wellicht ten overvloede zij vermeldt dat het voorspoelen kan worden uitgevoerd met alle eerder genoemde gastypen. Om praktische redenen zal men veelal hetzelfde gas gebruiken bij het voorspoelen als tijdens het lassen. Tijdens het lassen moet het spoelen doorgaan. De gasstroom wordt in het algemeen verminderd om de druk op de doorlassing en het lasbad laag te houden. Het gevaar bestaat anders dat de doorlassing naar buiten wordt gedrukt en er een holle doorlassing ontstaat. De overdruk mag niet meer dan $5 \cdot 10^{-3}$ bar bedragen. Een praktische regel is dat het uitstromen van het gas dan nog juist voelbaar is. Het gasdebiet wordt hiertoe gereduceerd tot 2 - 10 l/min. Voor een kwalitatief hoogwaardige doorlassing moet het spoelen worden voortgezet tijdens het lassen van de vullagen.

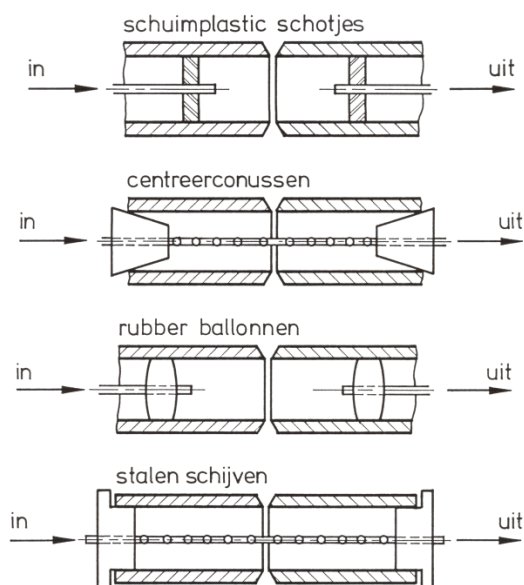
De backing kan pas worden gestopt als de gelaste dikte meer dan 10 mm bedraagt. Bij een "minimale backing" kan worden overwogen om de backing al te stoppen na het leggen van de grondnaad.

Doordat de meeste backinggassystemen zijn voorzien van uitstroomopeningen, heeft men bij het sluiten van de lasnaad geen drukopbouw.

Naspoelen

De doorlassingszijde kan nog oxideren, zolang de temperatuur boven de 250 °C is. Dit betekent dat het spoelen moet worden voortgezet tot de temperatuur van de sluitlaag is gedaald tot onder 250 °C. Meestal is dat kort nadat de las gereed is.

In figuur 6.15 is een aantal mogelijkheden weergegeven om in pijpen een gasbescherming aan te brengen.



figuur 6.15 Voorbeelden van hulpgereedschap voor het aanbrengen van backinggas

6.4.4 Elektroden

Bij het TIG-lassen wordt een niet-afsmeltende wolframelektrode gebruikt. Wolfram heeft van alle metalen het hoogste smeltpunt namelijk 3407 °C. Voor het gelijkstroom-lassen is deze elektrode altijd voorzien van een "dope". Deze "dope" zorgt ervoor dat de weerstand van de elektrode afneemt. Er zijn verschillende "dopes" die in verschillende hoeveelheden in de elektroden kunnen voorkomen. Tot begin 2006 was de thoriumhoudende elektrode de meest voorkomende. Omdat thoriumoxide echter licht radioactief is, vallen deze elektroden onder de atoomwet. Dit betekent geen verbod voor de elektrode, maar er is wel een vergunning nodig voor opslag en gebruik. Er zijn echter een aantal goede alternatieven die zelfs beter zijn dan de thoriumelektrode.

De belangrijkste "dopes", steeds in de vorm van oxiden, die aan een wolframelektrode worden toegevoegd worden zijn: ceriumoxide (CeO₂), lanthaanoxide (La₂O₃), yttriumoxide (Y₂O₃) en zirkoniumoxide (ZrO₃). Meestal hebben oxiden een hoger smeltpunt dan het zuivere materiaal en dat is bij wolframelektroden wel nodig. In tabel 6.10 is een overzicht van de courante wolframelektroden weergegeven. De turkooisgekleurde elektrode wordt het meest toegepast, omdat deze bij gelijk- en wisselstroom zeer goede eigenschappen heeft.

Voor het TIG-gelijkstroomlassen moet een punt aan de elektrode worden geslepen. Hierbij zijn twee zaken erg belangrijk, namelijk de tophoek en het slijppoppervlak.

De tophoek

Het beste resultaat geeft een tophoek van 60°. De elektrodenstroom is dan optimaal naar het werkstuk gericht. Het smeltbad zal de juiste grootte hebben en de lasboog zal strak en stabiel zijn. Bij een spitsere punt zal de grootte van het smeltbad toenemen en de standtijd van de punt afnemen. De stroomdichtheid zal bij een te spitse punt fors toenemen, waardoor de punt sneller slijt en er dus vaker moet worden geslepen. Een spitsere punt mag men enkel toepassen wanneer met extreem lage stroom wordt gelast. Vaak is het beter om in deze gevallen voor een dunnere elektrode te kiezen en deze aan te slijpen met een punt van 60°. Wanneer binnen het stroomgebied van de elektrode met een te stompe punt wordt gelast, zal de stroomdichtheid aan de punt afnemen en zal de boog instabiel worden.

Het slijppoppervlak

Om een rustige en strakke boog te krijgen moet het slijppoppervlak zo glad mogelijk zijn. Grove slijpgroeven zorgen voor een onrustige boog en energieverlies. Bij het lassen met hogere stromen kan de punt van de elektrode iets afgevlakt worden, maximaal Ø 1,0 mm. Een bijkomend voordeel hiervan is, dat de standtijd van de elektrodepunt toeneemt. De slijpgroeven moeten altijd in de lengterichting van de elektrode lopen. Om bij het slijpen van wolframelektroden een goede reproduceerbaarheid van de tophoek en een zo glad mogelijk oppervlak te verkrijgen, is het beter

om gebruik te maken van speciaal daarvoor ontwikkelde slijppapparaten. De meeste van deze slijppapparaten zijn voorzien van een diamantschijf die een optimaal slijpresultaat garanderen.

6.4.5 Lasnaadvormen en lasparameters

In tabel 6.11 zijn stompe naadvormen gegeven voor het TIG-lassen. Lasnaadvorm nr. 6 is specifiek bedoeld voor het (eenzijdig) pijplassen, het TIG-lassen wordt dan vaak alleen voor de grondlaag gebruikt. Hoewel de grondlaag zonder toevoegmateriaal kan worden gelegd, is het aan te bevelen toch beperkt toevoegmateriaal toe te voeren. Dat voorkomt het ontstaan van warm-scheurtjes in de grondlaag. Bij het lassen van duplex staal moet altijd toevoegmateriaal worden gebruikt.

In tabel 6.12 zijn enkele richtlijnen gegeven voor het TIG-lassen van roestvast staal.

tabel 6.12 Gegevens voor het TIG-lassen van roestvast staal

stroomsoort: gelijkstroom (elektrode aan minpool) naadvorm: stompe lasverbinding					
materiaaldikte	gelijkstroom	elektrode Ø	dikte toevoegmateriaal	argonverbruik	lassnelheid
[mm]	[A]	[mm]	[mm]	[l/min]	[cm/min]
1	40...60	1,6	1,5	5 - 6	20 - 25
2	80...100	1,6	2,5	5 - 6	15 - 20
3	100...140	2,4	2,5	6 - 8	10 - 15
4	130...180	2,4	2,5	6 - 8	10 - 15

6.4.6 Voordelen en beperkingen van het TIG-lassen

De volgende voordelen van het TIG-lassen kunnen worden genoemd:

- Gescheiden toevoer van warmte en lasmateriaal;
- geen slak dus goed zicht op het smeltbad en geen slak-insluiters;
- geen spatten;
- goede bescherming van het smeltbad tegen oxidatie;
- er kan in alle posities worden gelast;
- uitstekend geschikt voor het lassen van grondlagen;
- uitstekend geschikt voor het lassen van dun materiaal;
- kan zowel handmatig als gemechaniseerd worden toegepast;
- vrijwel alle metalen te lassen.

tabel 6.10 Overzicht van courante wolframelektroden

type elektrode	kopkleur	legeringselementen in %	gelijkstroom		wisselstroom	boogstabiliteit	herontsteking	standtijd	te lassen materialen
			-pool	+pool					
WL-10	zwart	1,0% lanthaniumoxide	++	--	±	+	+	++	Fe-RVS
WL-15	goud	1,5% lanthaniumoxide	++	--	±	+	+	++	Fe-RVS
WL-20	blauw	2,0% lanthaniumoxide	++	--	±	+	+	++	Fe-RVS
WT-10 ¹⁾	geel	1,0% thoriumoxide	++	--	±	+	+	+	Fe-RVS
WT-20 ¹⁾	rood	2,0% thoriumoxide	++	--	±	+	+	+	Fe-RVS
WT-30 ¹⁾	lila	3,0% thoriumoxide	++	--	±	+	+	+	Fe-RVS
WT-40 ¹⁾	oranje	4,0% thoriumoxide	++	--	±	+	+	+	Fe-RVS
WP	groen	100% wolfram (puur)			+	-	-	-	Aluminium
WR-2	turquoise	2,0% zeldzame elementen	++	--	++	+	++	++	Fe-RVS-aluminium
WC-20	grijs	2,0% ceriumoxide	++	--	±	+	+	+	Fe-RVS
WZ-8	wit	0,8% zirconiumoxide	++		+	+	+	+	Fe-RVS-aluminium

1) Opslag en gebruik is vergunningsplichtig volgens de richtlijnen van het Ministerie van VROM!

tabel 6.11 Lasnaadvormen voor het TIG-lassen

no.	materiaaldikte [mm]	benaming	schets naadvorm	opmerkingen
1	< 1	randnaad (éénzijdig)		Lassen zonder toevoegmateriaal, met backinggas. Voor pijp of plaat en plaat in alle posities.
2	< 2 ¹⁾	T-naad (éénzijdig)		Lassen zowel met als zonder toevoegmateriaal met backinggas. Voor pijp en plaat in alle posities.
3	< 10 ^{1), 2)}	V-naad (één- en tweezijdig)		Zo nodig de keerzijde voor het tegenlassen uitslijpen.
4	< 3	I-naad (tweezijdig)		Bij eenzijdig lassen gebruik van backinggas noodzakelijk. Aflassen met beklede elektrode of met MAG-lassen.
5	< 5	kelknaad (éénzijdig)		Grondlaag kan met de hand of met de automaat worden gelast. Backinggas vereist.
6	> 13	U-naad (éénzijdig)		Bij voorkeur grondlaag lassen met toevoegmateriaal; backinggas vereist. Maat 31 is afhankelijk van cup-Ø. Eventueel aflassen met beklede elektroden of MAG-lassen.

1) Gemechaniseerd TIG-lassen met of zonder toevoegdraad, laat een grotere materiaaldikte toe.
2) Het gelijktijdig tweezijdig lassen (dubbelzijdig TIG) tot een materiaaldikte van ca. 6 mm is mogelijk in de posities PF en PC. Hierbij moet echter rekening worden gehouden met het feit, dat de corrosiebestendigheid kan verminderen tengevolge van een grotere warmtetoevoer.

Beperkingen:

- ▶ Economisch niet aantrekkelijk door lage neersmeltsnelheid (max. 1 kg/uur) en lage lassnelheden;
- ▶ grote warmte-inbreng, waardoor veel vervorming en beïnvloeding van de materiaaleigenschappen;
- ▶ beperkte correctie van de chemische samenstelling van het lasbad mogelijk;
- ▶ wind en tochtgevoelig;
- ▶ backinggas aan de achterzijde van de las noodzakelijk.

Het TIG-lassen wordt op ruime schaal ingezet voor het lassen van roestvast staal. Het TIG-lassen heeft hierbij vooral voordelen voor het lassen materialen met een relatief geringe dikte (< 3 mm) en voor het maken van doorlassingen in pijpen. De gescheiden energiebron en toevoegmateriaal maken het TIG-lassen bij uitstek geschikt voor korte laslengten.

6.5 Plasmalassen**6.5.1 Inleiding**

Het plasmalassen is voortgekomen uit een verdere ontwikkeling van het TIG-lassen in de behoefte grotere materiaaldikten zonder afschuining te kunnen lassen. Bij het TIG-lassen is sprake van een vrij uittredende boog. Deze waaiert vanaf de elektrode steeds breder uit. Bij het plasmalassen wordt de boog ingesnoerd door deze door een watergekoeld koperen mondstuk met een nauwe opening te leiden. Dit heeft een aantal voordelen:

- ▶ De boog wordt ingesnoerd, waardoor een hogere energiedichtheid wordt verkregen en de warmte meer geconcentreerd kan worden toegevoerd;
- ▶ de boog is smal en stabiel, waardoor deze goed kan worden gericht op de te lassen plaats;
- ▶ de grotere stroomdichtheid zorgt samen met de hogere gas-snelheden en boogtemperatuur voor een diepe inbranding;
- ▶ de afstand tot het werkstuk is veel minder kritisch dan bij het TIG-lassen.

Rond de nauwe opening, waardoor het plasmagas wordt gevoerd, bevindt zich bij het plasmalassen een tweede concentrisch gaskanaal voor het beschermgas. Het principe van het plasmalassen is weergegeven in figuur 6.16. Er wordt bij het plasmalassen gebruik gemaakt van een hulp- of pilotboog en een hoofd- of overgedragen boog. De functie van de hulpboog is om de hoofdboog makkelijker te laten ontsteken. De hoofd- of overgedragen boog is de boog waarmee wordt gelast.

6.5.2 Plasma- en beschermgassen

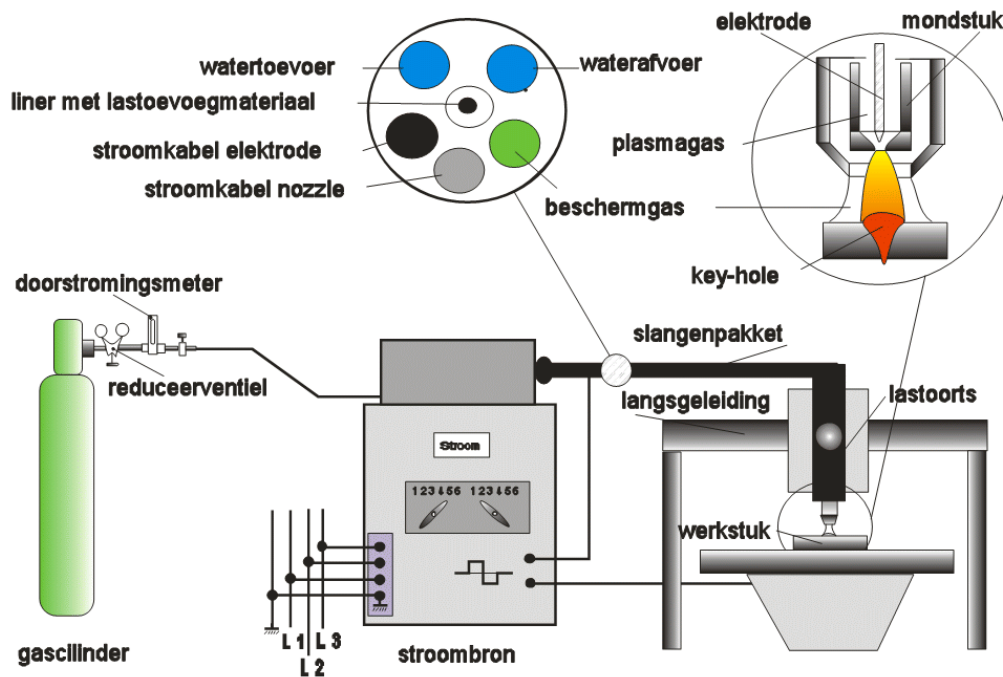
Als plasmagas wordt argon of een gasmengsel van argon met ca. 2 tot 5 % H₂ toegepast. Als beschermgas wordt meestal een gasmengsel van argon met 5 % H₂ gebruikt. Een uitzondering hierop vormen de roestvaste staalsoorten die gevoelig zijn voor waterstof, zoals de duplex en martensitische roestvaste staaltypen, deze worden zonder waterstofftoevoegingen plasma gelast.

De hoeveelheid plasmagas is meestal een factor 8 tot 10 lager dan de hoeveelheid beschermgas en dient alleen voor het in stand houden van de plasmaboog en het beschermen van de elektrode.

6.5.3 Indeling van het plasmalassen

Het plasmalassen is in te delen in drie typen:

1. Het micro-plasmalassen (een 'melt-in' techniek bij lage stroomsterkte). 'Melt-in' wil zeggen dat het werkstukmateriaal wordt gesmolten op een manier die vergelijkbaar is met het TIG-lassen.
2. De 'melt-in' techniek bij hoge stroomsterkten.
3. Het 'key-hole' lassen. Hierbij wordt het materiaal gesmolten en wordt er direct onder de lasboog tijdens het lassen een gaatje gevormd, de zogenaamde 'key-hole'.



figuur 6.16 Schematische weergave van het plasmalassen

Het micro-plasmalassen maakt gebruik van de 'melt-in' techniek, waarbij de lasstroom lager is dan 20 A. Hierdoor is de te lassen materiaaldikte beperkt en varieert van ca. 0,05 tot 0,8 mm. Hoewel meestal niet noodzakelijk of zelfs ongewenst, kan bij het micro-plasmalassen toevoegmateriaal worden gebruikt.

In de periode dat TIG-stroombronnen nog niet stabiel op lage stroomsterkten konden werken, was het micro-plasmalassen om die reden een uitkomst voor het lassen van zeer dun roestvast staal. De huidige TIG-stroombronnen zijn echter ook stabiel bij lage stroomsterkten (vanaf circa 1 A), waardoor eveneens geringe materiaaldikten (vanaf 0,5 mm) kunnen worden gelast.

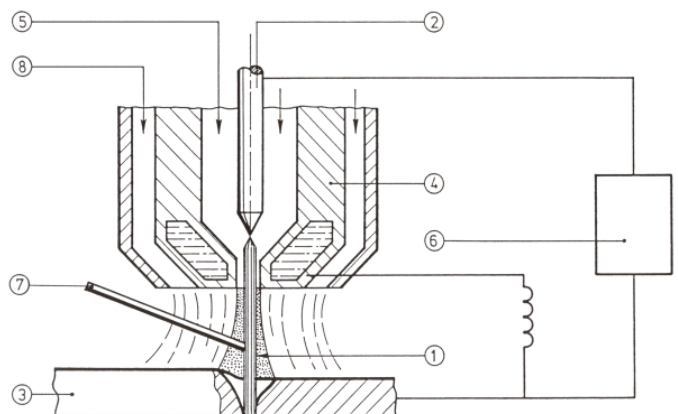
Het micro-plasmalassen heeft bij het lassen met de hand echter het voordeel dat het proces ten aanzien van booglengthte variaties niet kritisch is en dat lassers met een korte training al goede resultaten kunnen bereiken.

Bij het plasmalassen van materiaaldikten vanaf 0,8 tot ca. 3 mm wordt het materiaal omgesmolten eveneens door middel van de 'melt-in' techniek, zoals bij het bovengenoemde micro-plasmalassen. Het verschil zit in de toortsuitvoering die zwaarder uitgevoerd is tengevolge van de hogere stroomsterkte (15 tot 100 A.) In principe biedt het plasmalassen ten opzichte van het TIG-lassen bij het 'melt-in' lassen alleen het voordeel van een meer geconcentreerde lasboog.

Bij het lassen van ongelijke materiaaldikten kan dit echter een niet te onderschatten voordeel zijn (beter kunnen richten van de lasboog).

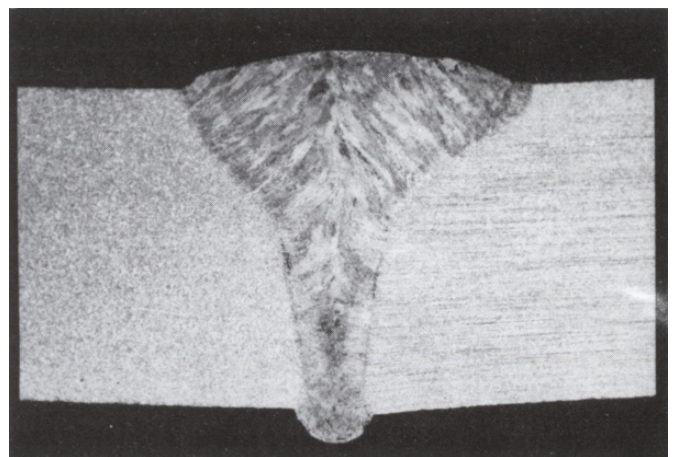
Het plasmalassen is bekend om de mogelijkheid van het toepassen van de 'key-hole' techniek. Hierbij wordt door de ingesnoerde lasboog een gaatje (1 - 2 mm afhankelijk van het type lastoorts en de grootte van de stroomsterkte) gemaakt in het materiaal. Dit gaatje blijft gedurende de voorwaartse beweging van de lastoorts in stand. Achter dit gaatje stroomt het vloeibare lasmateriaal weer samen en ontstaat de las. In figuur 6.17 is de vorming van de 'key-hole' weergegeven. Ook nu is het weer mogelijk, maar dikwijls niet noodzakelijk, toevoegmateriaal te gebruiken, echter wel weer bij duplex staal.

Figuur 6.18 laat een in één laag gelegde las zien in 8 mm dik roestvast staal. Dit is ongeveer de maximale dikte waarbij deze techniek kan worden gebruikt bij het lassen in de PA posities. De maximale dikte die in de PC gelast



figuur 6.17 Het principe van het 'key-hole' lassen

1 = Plasmaboom; 2 = Wolframelektrode; 3 = Werkstuk;
4 = Mondstuk; 5 = Plasmagas; 6 = Stroombron;
7 = Toevoegmateriaal; 8 = Beschermgas



figuur 6.18 Plasmalas ('key-hole') in één laag in 8 mm dik 1.4401 (AISI 304)

kan worden zonder afschuiven van de lasnaadkanten bedraagt ongeveer 10 mm. Het creëren van de 'key-hole' is mogelijk vanaf circa 3 mm. De key-hole techniek kan alleen

worden toegepast bij het gemechaniseerd lassen. De stroomsterkten kunnen maximaal 400 A bedragen. Voor het in stand houden van de 'key-hole' moeten een aantal factoren op elkaar afgestemd worden namelijk:

- De stroomsterkte;
- de hoeveelheid plasmagas;
- de booglengte.

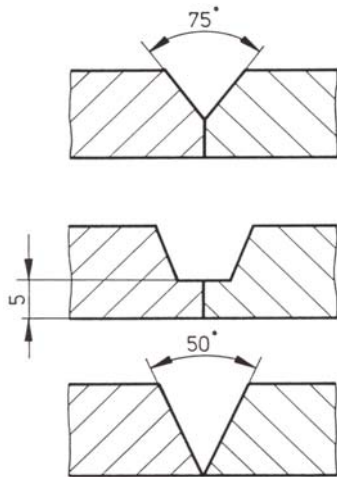
Hierbij is het van essentieel belang dat deze parameters gedurende het lassen zoveel mogelijk constant blijven om de key-hole in stand te kunnen houden. Omdat bij het lassen met de hand de booglengte altijd zal variëren kan het 'key-hole' lassen niet met de hand worden uitgevoerd.

6.5.4 Lasnaadvoorbewerking en lasparameters

Lasnaadvoorbewerking

Het is een duidelijk voordeel dat bij het toepassen van het plasmalassen met de 'key-hole' techniek tot een plaatdikte van ca. 8 mm een lasnaadafschuining niet nodig is. De plaatkanten worden in dergelijke gevallen als een I-naad uitgevoerd. Wel mag de aan te houden spleet tussen de platen niet groter zijn dan enkele tiende millimeters. Dit maakt dat er om deze reden soms wel een lasnaadvoorbewerking noodzakelijk is. De nauwkeurige toleranties van de lasnaad en het feit dat er altijd gemechaniseerd moet worden gelast, maakt dat voor een succesvolle uitvoering van het plasma key-hole lassen meestal gebruik moet worden gemaakt van bijvoorbeeld een klembank, waar de te verbinden delen in opgespannen kunnen worden.

Wanneer materiaaldikten groter dan 8-10 mm moeten worden gelast, is een lasnaadvoorbewerking noodzakelijk. Volstaan kan worden met een verhoudingsgewijs grote staande kant en eenvoudige naadvorm (Y-naad). Figuur 6.19 geeft dit schematisch weer. Deze naadvorm geldt van 8-10 tot ca. 18 mm. Het vullen van de naad wordt over het algemeen met een ander lasproces uitgevoerd (MAG of Bmbe).



figuur 6.19 Lasnaadvoorbewerking bij het 'key-hole' lassen groter dan 8 mm materiaaldikte

Lasparameters

Voor het micro-plasmalassen van een austenitisch roest-vaste staalsoort zijn in tabel 6.13 enige richtwaarden gegeven. In tabel 6.14 zijn enkele richtwaarden gegeven voor het 'melt-in' plasmalassen en in tabel 6.15 voor het 'key-hole' plasmalassen van deze staalsoort.

6.5.5 Voordelen en beperkingen van het plasma-lassen

Voordelen van het plasmalassen ten opzichte van het TIG-lassen zijn:

- Door de insnoering van de boog ontstaat een hogere temperatuur en een grotere energiedichtheid, zodat met een lagere stroomsterkte kan worden gelast of (bij een gelijke materiaaldikte) met hogere snelheid kan worden gelast;

tabel 6.13 Richtwaarden voor het toepassen van het micro-plasmalassen

techniek	plaatdikte	mondstuk Ø	plasmagas ¹⁾	lasstroom	lasspanning	toevoegdraad Ø	lassnelheid
	[mm]	[mm]	[l/min]	[A]	[V]	[mm]	[cm/min]
micro-plasma-lassen	0,1	0,9	0,2	2...4	24	0,6	12...24
	0,3	0,9	0,2	4...8	24	0,6	10...20
	0,5	0,9	0,3	8...16	26	0,9	10...20
	0,8	0,9	0,3	10...20	26	0,9	7,5...15
1) plasmagas: argon; beschermend gas: argon + 4% waterstof (8 l/min)							

tabel 6.14 Richtwaarden voor het toepassen van het 'melt-in' plasmalassen

techniek	plaatdikte	mondstuk Ø	plasmagas ¹⁾	lasstroom	lasspanning	toevoegdraad Ø	lassnelheid
	[mm]	[mm]	[l/min]	[A]	[V]	[mm]	[cm/min]
melt-in plasma-lassen	1,5	0,9	0,4	15	27	0,9	7...8
	2,5	0,9	0,4	25	26	1,2	7...13
	2,5	1,7	0,65	50	25	1,2	11...17
	3,0	1,7	0,65	70	27	1,6	15...20
	3,0	2,3	0,9	75	29	2,4	13...18
	5,0	2,3	1,0	100	32	2,4	9...11
1) plasmagas: argon; beschermend gas: argon + 4% waterstof (8 l/min)							

tabel 6.15 Instelparameters voor het 'key-hole' plasmalassen

techniek	materiaaldikte	stroomsterkte	boogspanning	lassnelheid	hoeveelheid		boring mondstuk
					plasmagas	beschermgas	
	[mm]	[A]	[V]	[cm/min]	[l/min]	[l/min]	[mm]
key-hole plasma-lassen	3	130-140	25-28	45-50	3-4	15-20	2,5
	4	150-160	25-28	35-38	4-5	15-20	2,5
	5	150-160	25-28	28-32	5-6	20-25	2,5
	6	250-270	24-26	26-30	8-9	20-25	3,0
	8	250-280	24-26	18-20	8-10	15-18	3,0

- er kan een grotere afstand tussen toorts en werkstuk worden aangehouden;
- lastoevoegmateriaal kan gemakkelijker worden toegevoegd, zonder gevaar voor verontreiniging (aanraken) van de wolframelektrode;
- de standtijd van de elektrode is langer dan bij het TIG-lassen omdat de elektrode zich in de lastoorts bevindt;
- door de hogere lassnelheid is de warmte beïnvloede zone smaller en wordt een kleiner lasnaadvolume verkregen;
- betere controle op de inbranding bij toepassing van de 'key-hole' techniek;
- groot plaatdiktebereik: van zeer dun tot 8-10 mm in één keer te lassen.

Als beperkingen van het plasmalassen ten opzichte van het TIG-lassen kunnen worden genoemd:

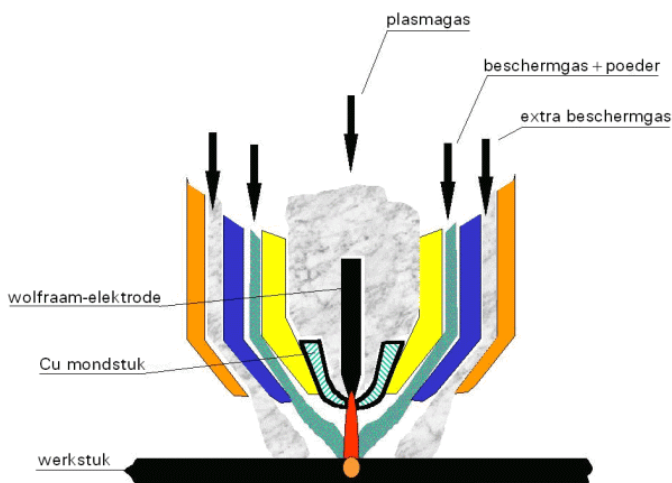
- Het inspannen van de platen moet nauwkeurig gebeuren;
- de plaatkanten moeten aangesloten liggen;
- de lasnaadkanten moeten nauwkeurig zijn voorbereid;
- het instellen van de juiste lasparameters is kritischer;
- het 'key-hole' lassen moet gemechaniseerd plaatsvinden.

Automatisering

Het plasma melt-in lassen wordt meestal met de hand uitgevoerd. Hierbij zijn de voordelen beperkt ten opzichte van het TIG-lassen. Het zogenaamde key-hole plasmalassen (volledige penetratie) wordt altijd volledig gemechaniseerd uitgevoerd. Het key-hole plasmalassen heeft als voordeel dat de lasboog door het volledige plaatmateriaal heen brandt, wat eenvoudig met behulp van sensoren kan worden gedetecteerd. Bij geavanceerde plasma-lasapparatuur maakt men gebruik van deze informatie en koppelt deze terug naar de lasparameters, zodat een constante doorlassing wordt verkregen. Bekende toepassingen van automatisering en mechanisering zijn het orbitaal plasmalassen, het gemechaniseerd lassen van langsnaden in roestvaststalen precisiebuizen en het uit de zij lassen van roestvaststalen ketels of opslagtanks. Apparatuur voor het plasmalassen wordt slechts sporadisch gekoppeld aan lasrobots in tegenstelling tot het TIG-lassen.

Poeder plasmalassen

Een verdere ontwikkeling of variant van het plasmalassen met koude draadtoevoer is het poeder plasmalassen (PPAW - Powder Plasma Arc Welding). Het poeder plasmalassen kan zowel als concurrent van het TIG-lassen als van het plasmalassen met koude draadtoevoer worden gezien. Bij het poeder plasmalassen bestaat de mogelijkheid om een metaalpoeder als toevoegmateriaal in de lasboog in te brengen. Dit metaalpoeder wordt meestal via het beschermgas meegevoerd naar het speciale plasmamondstuk en op deze manier in de lasboog gebracht. Een schematische weergave van het principe van het poeder plasmalassen is weergegeven in figuur 6.20.



figuur 6.20 Schematische weergave van het poeder plasmalassen

Figuur 6.20 toont dat het belangrijkste verschil met het traditionele plasmalassen met koude draadtoevoer het gebruik van een poeder als toevoegmateriaal is. Bij het poeder plasmalassen wordt gelast met een traditionele, ingesnoerde (overgedragen) plasmaboog die ontstoken wordt door middel van een hulpboog (pilotboog). Het metaalpoeder wordt via het beschermgas meegevoerd naar het speciale plasmamondstuk en op deze wijze in de lasboog gebracht. Het metaalpoeder smelt in de lasboog en komt vervolgens in het smeltbad terecht. Het poeder heeft dus dezelfde functie als een koude draadtoevoer bij het conventionele plasmalassen. Een belangrijk voordeel van het gebruik van metaalpoeders ten opzichte van een koude draadtoevoer is echter dat een veel nauwkeuriger dosering mogelijk is. Ten opzichte van een plasma-lastoorts met koude draadtoevoer is de poeder plasmatoorts compacter en is er bij het gemechaniseerd lassen geen extra as nodig om de lasdraad op de juiste manier in het smeltbad in te voeren.

Het te gebruiken poeder moet wel aan strenge eisen voldoen ten aanzien van vorm en grootte van de korrels, zodat

het probleemloos met het beschermgas kan worden meegevoerd. Poeder is wel aanzienlijk duurder dan lasdraad. De procesuitvoering is verder gelijk aan het traditionele plasmalassen wat inhoudt dat, om het proces optimaal te benutten (key-hole techniek), mechanisatie noodzakelijk is. Als er geen metaalpoeder wordt toegevoegd kan de apparatuur worden gebruikt als normale plasma-apparatuur met de voor- en nadelen hiervan. Vooralsnog is het vermogen dat kan worden geleverd door de apparatuur beperkt (250 A) maar voor veel (dunne plaat of buis) toepassingen is dit ruim voldoende. In principe zijn alle smeltlasbare legeringen met het proces te lassen, mits er poeder voor verkrijgbaar is. Voor vele roestvaste staalsoorten zijn tegenwoordig poeders op de markt beschikbaar. De belangrijkste kenmerken van het poeder plasmaboog lassen zijn:

- Het beschermgas is drager voor het metaalpoeder;
- het metaalpoeder moet worden afgestemd op het te lassen materiaal;
- poederdosering van 0 tot 32 gram/min;
- maximale stroomsterkte is 250 A (= maximaal 6 mm materiaaldikte in roestvast staal);
- ook als gewone plasma-apparatuur te gebruiken;
- mooi aangevloeide lassen met een minimum overdikte;
- soms nabewerking van de lassen nodig (iets ruwig uiterlijk);
- 2-4 maal zo snel als het TIG-lassen (ook bij het handlassen);
- zeer geschikt voor het lassen van dunne metalen;
- apparatuur 2-4 maal zo duur als conventionele TIG-lasapparatuur.

Als beperkingen van het poeder plasmalassen kunnen worden genoemd:

- Het oppervlak van de las bij het poeder plasmalassen is altijd wat ruw;
- het rendement (70-80%) is lager dan bij het lassen met koude draad, omdat er altijd wat poeder verloren gaat.

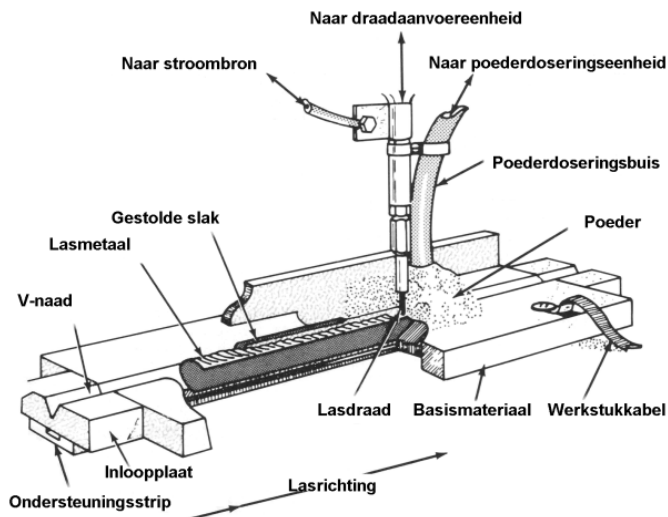
Het ruwere oppervlak is vooral ongewenst in sommige sectoren van de industrie zoals de food-industrie. Mede hierdoor is de toepassing van het poeder plasmalassen nog steeds beperkt in Nederland. Tegen het licht van steeds stringenter wordende kwaliteitseisen en een verdergaande automatisering spreken de voordelen van het proces echter steeds meer aan. Dit is de reden dat het poeder plasmalassen wel steeds vaker wordt meegenomen als mogelijk alternatief voor het conventionele TIG- of plasmalassen, zeker als er gemechaniseerd moet worden gelast met toevoegmateriaal. Het poeder plasmalassen kan in vrijwel alle posities worden gebruikt. Het rendement van het proces neemt echter wel af bij het lassen in positie, omdat er meer poeder verloren gaat. Het poeder plasmalassen wordt wel ingezet voor het lassen van rechthoekige roestvaststalen buizen voor het maken van diverse frameconstructies.

6.6 Onder poeder lassen (OP-lassen)

6.6.1 Kenmerken van het onder poeder lassen

Het onder poeder lassen is een booglasproces waarbij een boog wordt getrokken tussen een blanke, afsmeltende lasdraad en het werkstuk. De bij het lassen gevormde boog is omgeven door een laag poeder en wordt hierdoor aan het oog onttrokken. Het gesmolten laspoeder vormt een afdekende slaklaag op het lasmetaal. Doordat de boog is afgedekt, is het thermisch rendement van het onder poeder lassen zeer hoog, namelijk >90%. Het principe van het onder poeder lassen is weergegeven in figuur 6.21.

Het onder poeder lassen kenmerkt zich door een grote neersmeltsnelheid in combinatie met een diepe inbranding en een glad lasoppervlak. Doordat de boog onder een laag poeder brandt, is het weinig belastend voor de lasser en zijn omgeving. Het vrijkomen van schadelijke stoffen zoals ozon en zeswaardig chroom is bij het onder poeder lassen zeer beperkt en er wordt dan ook wel gesproken van een "milieu vriendelijk" lasproces.



figuur 6.21 Schematisch overzicht van het onder poeder lassen

De Vereniging van producenten van lastoevoegmaterialen, Velatec, geeft een informatiekaart uit waar restproducten van lasmaterialen zijn ingedeeld als bedrijfsafval. Voorheen werden enkele restproducten, zoals de slak van het onder poeder lassen van roestvast staal en de reststukken, als chemisch afvalstof bestempeld, maar in de huidige milieuwetgeving (oktober 2007) vallen alle restproducten tengevolge van lassen onder bedrijfsafval.

Het onder poeder lassen van roestvast staal kan zowel worden uitgevoerd met gelijk- als wisselstroom. Aan gelijkstroom wordt echter meestal de voorkeur gegeven. Voor een eerste benadering bij het onder poeder lassen van roestvast staal zijn instelwaarden en naadvormen, zoals die bij ongelegeerd staal worden gebruikt, als richtlijn te gebruiken, met als uitzondering dat de benodigde lasstroom ca. 20% lager moet worden genomen. De hogere elektrische weerstand en het iets lagere smeltpunt van roestvast staal maken dat de neersmeltsnelheid ca. 20 à 30% hoger ligt dan bij het lassen van ongelegeerd staal.

Het onder poeder lassen kan met massieve en gevulde lasdraden worden uitgevoerd, afhankelijk van de toepassing en de te stellen kwaliteitseisen. Oplassen is ook mogelijk met het onder poeder lassen, waarbij meestal band (bandoplassen) wordt gebruikt in dikten van 0,5 mm en breedten van 60 tot 180 mm. Over het algemeen wordt op deze manier ongelegeerd en/of laaggelegeerd staal voorzien van een corrosievaste of hittevlaveste deklaag.

Hoewel het onder poeder lassen typisch een lasproces is voor het lassen van grotere materiaaldikten, is het toepassen ervan voor dunnere plaat, met enige voorzorg, vanaf 4 mm goed mogelijk. Een beperking van het onder poeder lassen is dat het alleen in de PA en voornamelijk gemechaniseerd kan worden uitgevoerd. Er bestaan uitvoeringen waarin de lastoorts als handlaspijstool is uitgevoerd en door middel van een aandrijfwiel over de plaat wordt voortbewogen. Deze uitvoering wordt echter zeer beperkt toegepast. Wel wordt compact opgebouwde apparatuur gebruikt die op een loopwagen wordt gemonteerd en waarmee I-naden en staande hoeklassen kunnen worden gelegd.

6.6.2 Invloed van het onder poeder lassen op de structuur

Naast de al eerder genoemde kenmerken is het bewaken van de opmenging het meest in het oog springende punt bij het onder poeder lassen. De opmenging kan variëren van 10% voor het bandoplassen tot 70% voor het verbindingslassen met draad.

Om warscheuren bij het lassen van roestvast staal te vermijden is de aanwezigheid van enkele procenten ferriet in het lasmetaal gewenst. Hoge ferrietpercentages moeten

vooral bij de Mo-houdende typen worden vermeden. Bij een hoog opmengpercentage kan de samenstelling van het basismateriaal een ongewenste invloed hebben op het ferrietgehalte van de las. Het is bij het lassen in meerdere lagen wenselijk het opmengpercentage onder 40% te houden. In combinatie met een mogelijk hoog opmengpercentage is het daarom noodzakelijk de keuze van het type en de diameter van de lasdraad af te stemmen op de eisen.

De laspoeders voor het lassen van roestvast staal zijn neutraal, zuur (Cr-afbrandcompenserend) of basisch van karakter. Er moet bij het onder poeder lassen altijd een afstemming zijn tussen de lasdraad, waarmee wordt gelast en het poeder dat wordt gebruikt. Voor de keuze hiervan kan men zich het beste tot de leverancier van het lastoevoegmateriaal wenden. Er moet voor gezorgd worden dat het laspoeder droog wordt opgeslagen, aangezien vocht onder andere poreusheid in de las kan veroorzaken. Vochtig laspoeder moet op een hoge temperatuur volgens voorschrift van de leverancier worden gedroogd.

Door het herhaald gebruik van het laspoeder kan een ongewenste korrelverfijning hiervan ontstaan. Nieuw poeder moet op tijd worden bijgemengd. Door het gebruik van grof- en fijnmazige zeven in de installatie kan dit probleem worden voorkomen.

6.6.3 Lasnaadvormen en lasparameters

Het onder poeder lassen kan vanaf 4 mm materiaaldikte worden toegepast. Vanaf deze dikte tot ca. 8-10 mm kan worden gelast zonder lasnaadvoorbewerking. Aanbevolen wordt om een geringe afschuining aan de bovenkant van de platen aan te brengen (breken van de kanten) in verband met overdikte en het volgen van de lasnaad. Daarnaast worden V-, Y-, X- en dubbele Y-naden gebruikt.

Bij V- of X-naden moet, in verband met de geringe staande kant, eerst een grondlaag worden aangebracht met bijvoorbeeld het lassen met beklede elektrode of het MAG-lassen. Hiervoor moeten dan bij het Bmbe geen rutiel (veel slak), maar basische elektroden worden toegepast of kan er MAG met een massieve draad worden gelast. Zowel een basische elektrode als het MAG-lassen met massieve lasdraad geven weinig slak, zodat als er daarna met het onder poeder lassen wordt afgelast, de slakresten geen poreusheid en/of slakinsluitingen kunnen veroorzaken. De voorkeur gaat daarom uit naar Y- of dubbele Y-naden, waarbij de staande kant 4 à 6 mm moet bedragen. Een overzicht hiervan is gegeven in tabel 6.16. Als alternatief kan eventueel op keramische steentjes worden doorgelast en ook wordt wel koperen backingmateriaal gebruikt. In het laatste geval moet men er wel op bedacht zijn, dat er geen koper in het lasbad terecht komt, daar dit vrijwel altijd aanleiding geeft tot warscheuren.

6.6.4 Voordelen en beperkingen van het onder poeder lassen

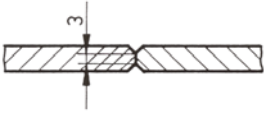
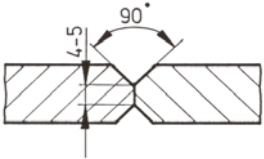
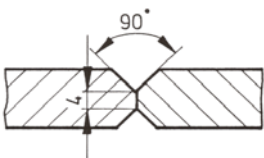
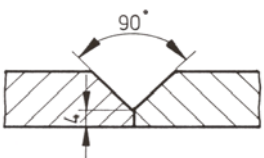
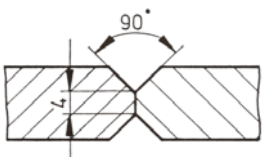
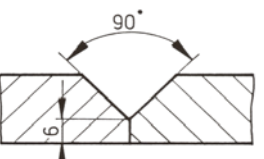
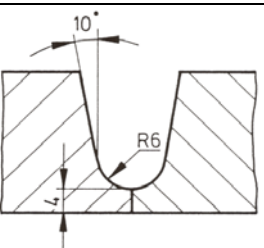
Voordelen van het onder poeder lassen betreffen:

- ▶ Hoge lassnelheden;
- ▶ goede aanvloeiing;
- ▶ weinig aanloopkleuren;
- ▶ geen spatten;
- ▶ laspoeder kan correcties in de chemische samenstelling bewerkstelligen;
- ▶ diepe inbranding (weinig lagen);
- ▶ milieuvriendelijk (gassen, boogstraling).

Als beperkingen van het onder poeder lassen kunnen worden genoemd:

- ▶ Het onder poeder lassen verlangt een relatief grote investering;
- ▶ alleen geschikt voor het lassen in de PA en PB positie (PC beperkt mogelijk met speciale apparatuur);
- ▶ veel insteltijd noodzakelijk;
- ▶ alleen voor grote laslengten geschikt en meer economisch bij grotere plaatdikten;
- ▶ diepe inbranding en grote opmenging, dus grote afhankelijkheid van de plaatsamenstelling;
- ▶ alleen gemechaniseerd toe te passen.

tabel 6.16 Richtwaarden voor het onder poeder lassen van roestvast staal

plaatdikte	naadvorm	draad- dia- meter	lasgegevens						warmtetoevoer per cm plaatdikte [kJ/cm (lengte)]	
			1° laag			2° laag			1° laag	2° en volgende laag
			lasstroom	spanning	snelheid	lasstroom	spanning	snelheid		
[mm]		[mm]	[A]	[V]	[cm/min]	[A]	[V]	[cm/min]		
6		3,0	400	30	100	450	32	110	12	13
10		3,0	400	32	60	500	32	70	12,8	13,7
10		3,0	400	30	60	500	32	70	12	13,7
10		3,0	400	32	35	400	32	80	22	9,6
13		3,0	450	30	60	500	30	70	10,4	12,9
13		3,0	400	33	25	600	33	80	24,4	11,4
> 30		3,0	500	26	55	500	28	50	< 4,8	< 5,6

6.7 Weerstandlassen

Onder weerstandlassen worden een aantal lasprocessen verstaan, waarbij een las tot stand komt met behulp van een kortdurende hoge elektrische stroom onder gelijktijdige uitoefening van druk. Alle weerstandlasprocessen vallen dus onder de groep druklasprocessen. Aangezien er een voorlichtingspublicatie [19], geheel aan het weerstandlassen is gewijd, zal op de techniek van het weerstandlassen

zelf niet worden ingegaan. Slechts aanwijzingen zullen hier worden gegeven over de typische kenmerken die betrekking hebben op het weerstandlassen van roestvast staal.

Voor het weerstandlassen van roestvast staal komen voor namelijk het punt-, rolnaad- en het projectielassen in aanmerking. Hiervan wordt het puntlassen het meest toegepast en daarom alleen maar besproken.

6.7.1 *Geschiktheid van roestvast staal voor het weerstandlassen*

Roestvast staal is geschikt voor het weerstandlassen. Verbindingen kunnen tot stand worden gebracht zonder de kwaliteit van het oppervlak noemenswaardig te beïnvloeden. In verhouding tot het booglassen wordt slechts een geringe hoeveelheid warmte in het materiaal gebracht, waardoor een negatieve beïnvloeding van de corrosie-eigenschappen minimaal is.

Neigingen tot uitscheidingen, zoals die van chroomcarbiden en sigma-fase worden in belangrijke mate onderdrukt, doordat de lastijden kort zijn.

Bij het puntlassen is echter een nadeel dat er spleten ontstaan (er worden immers altijd overlappenden gebruikt) waardoor, afhankelijk van het milieu en het gekozen type roestvast staal, spleetcorrosie kan optreden. Een ander aspect is dat de passiveringslaag kan worden verstoord. Dit is kenbaar aan het ontstaan van aanloopkleuren. Hierdoor kan in chloridenhoudende milieus het oppervlak worden aangetast. Een mechanische of chemische nabehandeling is in dergelijke gevallen noodzakelijk. Het ontstaan van aanloopkleuren kan worden tegengegaan door een voldoende lange voor- en nadruktijd aan te houden. Wanneer de lasplaats door middel van gas wordt beschermd, zullen aanloopkleuren praktisch geheel kunnen worden voorkomen.

Roestvast staal heeft enkele fysische eigenschappen, die zich bij het weerstandlassen onderscheiden van die van ongelegeerd staal. Dat geldt vooral voor de warmte- en elektrische geleiding. Beide zijn lager dan die van ongelegeerd staal. Hierdoor kan een laslens (het gesmolten deel tussen twee platen) makkelijk ontstaan. De verschillen zijn het grootst bij austenitisch roestvast staal. De warmtegeleidingcoëfficiënt hiervan is ca. $3 \times$ en de elektrische geleiding ca. $7 \times$ lager dan die van ongelegeerd staal. Een nadeel van austenitisch roestvast staal kan de grotere uitzetting zijn, waardoor vervorming van de plaatdelen sneller kan optreden. De verschillende typen roestvast staal vertonen bij het weerstandlassen kenmerkende verschillen ten opzichte van elkaar.

► Austenitisch roestvast staal

Warmte- en uitzetting is bij deze typen praktisch uitgesloten. Dat geldt ook voor de gestabiliseerde austenitische typen. Door de snelle afkoeling en het onder druk staan van de las, is de warmte- en uitzetting geringer dan bij het booglassen.

Verschuiven als verbrossing door sigma-fasevorming en interkristallijne corrosie door carbiduitscheiding zullen in het algemeen niet voorkomen.

Een voordeel ten opzichte van ongelegeerd staal is de geringe magnetische permeabiliteit. Wanneer grote vlakken in de lasmachine worden gebracht, behoeft de lasstroom daarom veelal niet te worden aangepast.

► Ferritisch roestvast staal

De ferritische roestvaste staalsoorten hebben als gevolg van de hoge afkoelingsnelheid een geringe neiging tot verbrossing. De warmte- en elektrische geleiding zijn wat groter dan bij de austenitische typen. De uitzettingscoëfficiënt is nagenoeg gelijk aan die van ongelegeerd staal.

► Martensitisch roestvast staal

Voor de typen met 13 tot 18% Cr en meer dan 0,15% C moet rekening worden gehouden met de vorming van harde martensiet. De puntlasverbindingen kunnen dan weinig vervorming opnemen. Bij typen met meer dan 0,4% C bestaat er zelfs gevaar voor scheuren door de optredende inwendige spanningen. Een aangepast lasprogramma en/of een gloeibehandeling bij 650 tot 750 °C kan noodzakelijk zijn.

6.7.2 *Instelparameters voor het puntlassen*

In tabel 6.17 zijn richtwaarden gegeven voor het puntlassen van de austenitische roestvast staal typen. Dit zijn uitgangswaarden om bijvoorbeeld werkgebieden vast te

stellen waarbinnen een acceptabele las kwaliteit kan worden verkregen. Een werkgebied kan worden weergegeven in een zogenaamd 'las-lob' diagram. Hierin wordt de relatie tussen in te stellen lasstroom en de lastijd bij een bepaalde aandrukkraft vastgesteld.

Het beste elektrode materiaal (combinatie van lage resistiviteit (= soortelijke weerstand) en hoge mechanische sterkte) voor het lassen van roestvast staal wordt gevormd door koper - kobalt - beryllium legeringen. De elektrodetip heeft meestal een kegelvorm met een tophoek van 120°. De vorming van de laslens is afhankelijk van de lasstroom, de lastijd en de aandrukkraft. De aanbevolen lasparameters voor het lassen van 18% Cr - 9% Ni austenitische roestvaste staalsoorten en gestabiliseerde 17% Cr ferritische typen zijn weergegeven in tabel 6.17.

tabel 6.17 Aanbevolen lasparameters voor het lassen van 18% Cr - 9% Ni austenitische roestvaste staalsoorten en gestabiliseerde 17% Cr ferritische typen [9]

plaatdikte	elektrodetip diameter	elektrode aandrukkraft	lasstroom	lastijd
[mm]	[mm]	[daN]	[A]	aantal periodes
18% Cr - 9% Ni austenitische typen				
0,5	3,0	170	3500	3
0,8	4,5	300	6000	4
2,0	6,0	650	11000	8
gestabiliseerde 17% Cr ferritische typen				
0,5	3,0	150	4000	3
0,8	4,5	250	7550	4

De parameters gegeven in de bovenstaande tabel moeten worden geoptimaliseerd afhankelijk van de oppervlakte-toestand (2B, 2D, 2R) die een belangrijke invloed heeft op de interface weerstand, die op zijn beurt een beslissende rol speelt in de vorming van de laslens.

In tegenstelling tot andere smeltprocessen, kan bij puntlassen de las niet visueel worden gecontroleerd. De enige fouten die met het oog kunnen worden waargenomen zijn scheuren, een overmatige elektrode-indrukking en spatvorming.

Puntlassen in ferro-magnetische roestvaste staalsoorten kunnen uiteraard wel op scheuren worden gecontroleerd. Een eenvoudige destructieve inspectiemethode is de zogeheten apfeltest, die een snelle indicatie geeft van de kwaliteit van de puntlas. Bij deze test wordt één plaatdeel van de andere afgetrokken, waarbij de las uit het plaatmateriaal moet worden getrokken en niet door midden mag breken.

Toepassingen van het puntlassen worden gevonden in de busindustrie (rvs bussen) voor het bevestigen van plaatdelen, in de witgoed industrie (wasmachines) en in de meubelindustrie.

6.7.3 *Praktische aanwijzingen voor het puntlassen*

Voor het met succes uitvoeren van het puntlassen in roestvast staal zijn enige regels aan te houden:

- Het werkstukmateriaal moet vrij zijn van vuil, verf, vet en olie;
- rekening moet worden gehouden met een voldoende overlap;
- bij een puntlasafstand tot aan de rand van het werkstuk gelijk of groter dan de minimale afstand tussen de puntlassen behoeft geen rekening te worden gehouden met het zogenaamde shunteffect;
- de kwaliteit van puntlasverbindingen kan alleen worden vastgesteld door de lassen destructief te beproeven. Als richtgetal wordt aanbevolen dat de middellijn van de puntlas een waarde heeft van $d = 5 \times \sqrt{\text{(kleinste) plaatdikte}}$.

6.8 Elektronenbundel (EB)- en laserlassen

Het elektronenbundel- en het laserlassen zijn de lasprocessen met de hoogste energiedichtheid en aanzienlijk groter dan bij andere lasprocessen zoals het lassen met beklede elektrode en TIG- of MIG/MAG-lassen. In tabel 6.18 zijn voor de verschillende processen deze energiedichtheden aangegeven.

tabel 6.18 Energiedichtheid van enkele lasprocessen

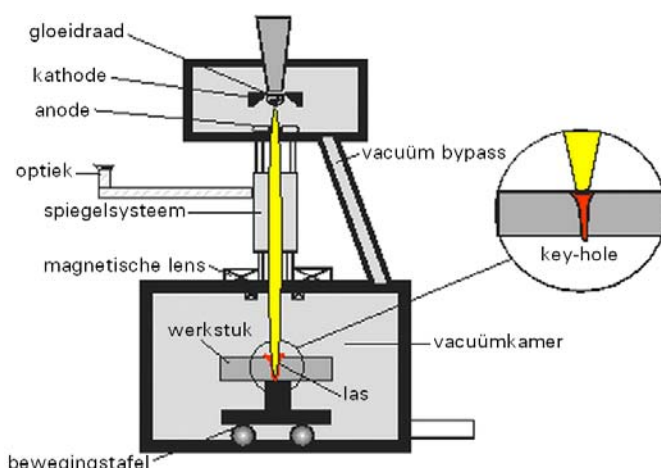
lasproces	energiedichtheid in W/cm ²
beklede elektroden	$5 \cdot 10^3$
TIG, MIG/MAG-lassen	10^4
plasmalassen	10^5
laserlassen	10^{7-8}
elektronenbundellassen	10^9

Als gevolg van de grote energiedichtheid is het mogelijk met het EB-lassen (zonder toevoegmateriaal) smalle lassen te maken met een diepe inbranding, waar breedte:diepte-verhoudingen gerealiseerd kunnen worden van 1:20 mm. Als gevolg van de betrekkelijk geringe warmtetoevoer per cm naadlengte treedt er zowel bij het EB-lassen als het laserlassen weinig krimp en dus vervorming op.

Ter vergelijking: een handlas in een V-naad in een plaatdikte van 20 mm met 50° openingshoek en een elektrode met 180% rendement verlast met 30 V boogspanning, veroorzaakt een warmtetoevoer van circa 90 kJ/cm. Voor een EB-las is dat circa 5 kJ/cm, dat wil zeggen 18 × minder. Hierdoor is het verklaarbaar dat een EB-las een dwarskrimp vertoont van ongeveer 0,1 mm tegenover 2 mm bij het Bmbe lassen bij dezelfde materiaaldikte.

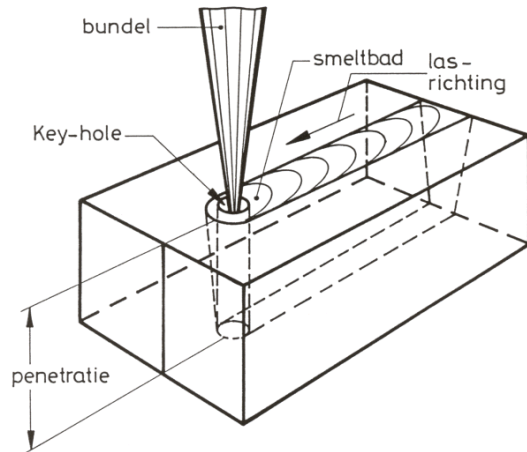
6.8.1 Principe van het elektronenbundellassen

Het EB-lassen is uitstekend geschikt voor het lassen van alle soorten roestvast staal. Bij het EB-lassen wordt de energie voor het lassen verkregen door het versnellen van de uittredende elektronen door een tussen de kathode en anode aangelegde hoge spanning (30 tot 150 kV), zie figuur 6.22.



figuur 6.22 Principe van het EB-lassen

Elektronen hebben een geringe indringdiepte. Het dieplas-effekt wordt dan ook verkregen doordat de elektronenbundel steeds een klein deeltje van het oppervlak smelt en doet verdampen en op die manier een capillair vormt. Deze beweegt zich met de lassoort door het materiaal. Het gesmolten materiaal vult achter de capillair het kanaal weer op. Er wordt gelast met een 'key-hole', net als bij het plasmalassen (zie figuur 6.23).



figuur 6.23 Vorming van de 'key-hole'

Elektronen werden afgeremd door lucht en ondervinden de minste hinder in een hoogvacuüm.

Het elektronenbundellassen kan onder drie verschillende atmosferische omstandigheden worden uitgevoerd:

- 1) In een hoogvacuüm van $< 10^{-3}$ Pa. Daarvoor zijn vacuümkamers gebouwd met een inhoud van kubieke decimeters tot enkele tientallen kubieke meters. Er is sprake van optimale voorwaarden om een smalle en diepe las te krijgen.
- 2) In een laagvacuüm, waarbij het werkstuk continu door de kamer wordt gevoerd. Bijvoorbeeld voor het lassen van langsnaden in pijp. Deze manier van EB-lassen wordt vaak bij seriematige productie gebruikt.
- 3) Aan de atmosfeer (non-vacuüm). Hierbij wordt het elektronenkanon wel onder hoogvacuüm gehouden, maar treedt de bundel uit in de lucht. De afstand tot het werkstuk moet gering zijn, aangezien elektronen door botsen met de luchtdeeltjes worden afgeremd en daarbij hun energie verliezen. De indringdiepte is bij dit proces dan ook geringer en de breedte van de las groter dan bij het gebruik van laag- en hoogvacuüm.

6.8.2 Voordelen, beperkingen en toepassingen van het EB-lassen

Het voordeel van EB-lassen in hoogvacuüm is, dat lassen worden verkregen van grote zuiverheid en dat het werkstukmateriaal in vele gevallen nauwelijks nadelig wordt beïnvloed door de laswarmte. Het lasproces biedt de mogelijkheden om lasuitvoeringen te realiseren, die onmogelijk te realiseren zijn met andere lasprocessen, onder andere het lassen van een pakket met lichtspleten en diepliggende lassen (figuur 6.24). Echter ook het lassen van ongelijksoortige materialen is met het EB-lassen mogelijk zoals in figuur 6.25 is weergegeven.

Het EB-lassen is vooral rendabel bij de (massa)fabricage en bij het lassen van bijzondere producten, waarbij de producten aan hoge kwaliteitseisen moeten voldoen. In veel gevallen komen we dit soort hoogwaardige producten tegen in de lucht- en ruimtevaart.

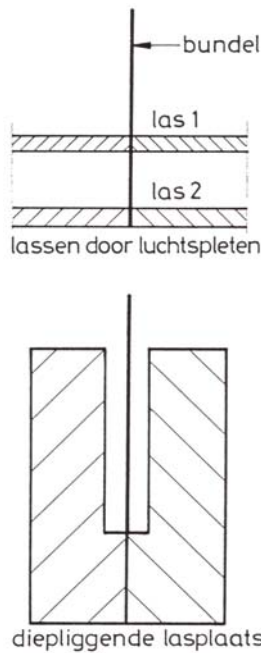
Een beperking van het EB-lassen in hoogvacuüm is dat het proces alleen uitvoerbaar is wanneer de voorbereiding van de productdelen aan hoge eisen voldoet.

Andere beperkingen zijn de hoge investeringskosten (enkele honderdduizenden tot enkele miljoenen euro's) van een EB-lasinstallatie en de meestal beperkte afmetingen van de vacuümkamer.

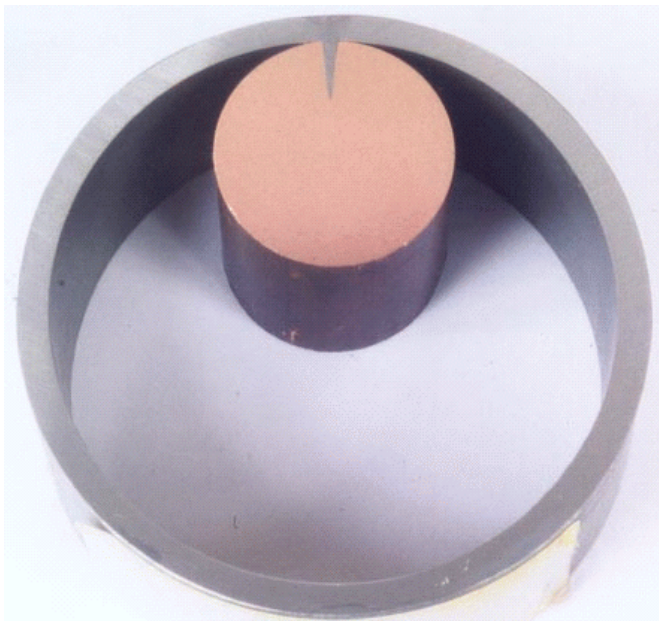
Het is vooral de hoge investering die maakt dat het EB-lassen slechts op enkele plaatsen in Nederland wordt uitgevoerd.

6.8.3 Het laserlassen

Er is de laatste jaren veel informatie en informatiemateriaal beschikbaar gekomen ten aanzien van het laserlassen. Het



figuur 6.24 Mogelijkheden van het EB-lassen



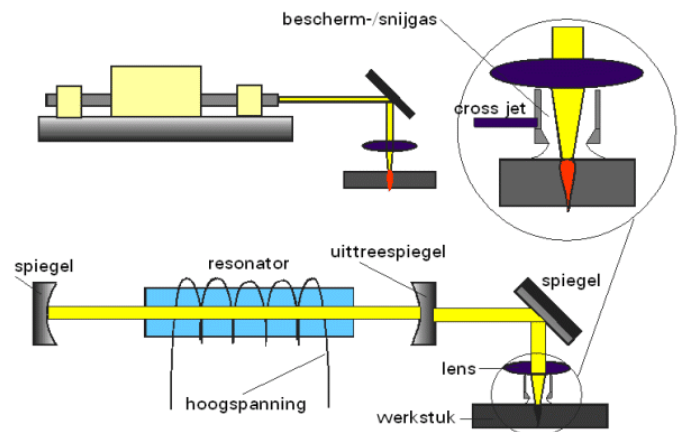
figuur 6.25 Voorbeeld van het EB-lassen van een austenitisch roestvaststalen ring aan koper

meeste informatiemateriaal is terug te vinden op de websites www.dunneplaat-online.nl en www.verbinden-online.nl.

6.8.4 Principe van het laserlassen

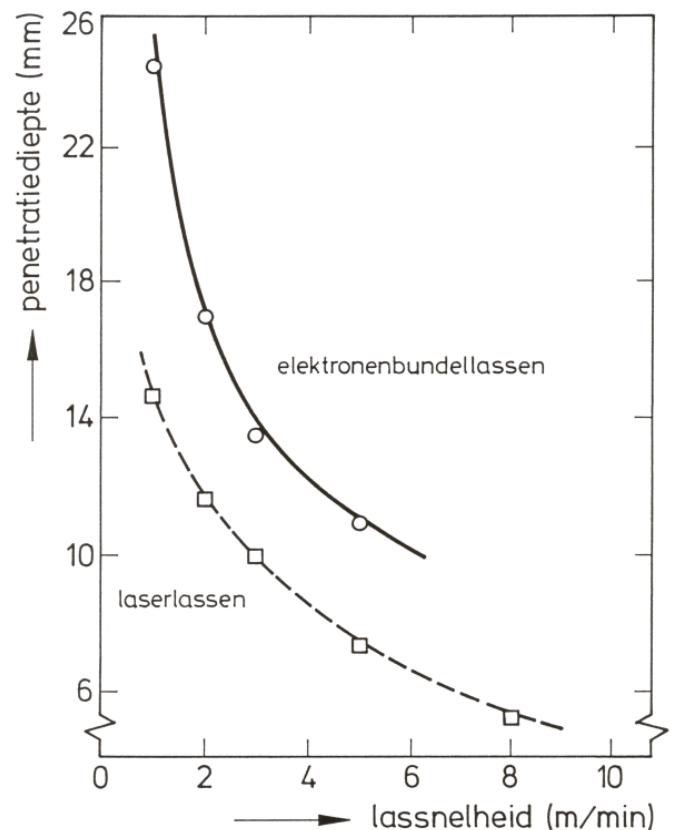
Het laserlassen is een lasmethode om metalen delen tot smelten te brengen door middel van elektromagnetische straling (lichtbundel) en valt onder de groep smeltlasprocessen. Een laser produceert een geconcentreerde lichtbundel met een hoge tot zeer hoge energiedichtheid. Doordat de laser met een specifieke golflengte werkt, kan de laserbundel tot hoge energiedichtheden worden gefocusseerd. De laserstraal treedt uit het laserapparaat, wordt door spiegels of glasvezelkabels naar de gewenste plaats getransporteerd en daar met behulp van een lens gefocusseerd (zie figuur 6.26).

Een belangrijk voordeel van het laserlassen ten opzichte van het EB-lassen is, dat de lichtdeeltjes niet door botsing met lucht hun energie verliezen. Het laserlassen kan dan ook in



figuur 6.26 Principe van het laserlassen

"lucht" plaatsvinden. Hierbij vormt zich op dezelfde wijze als bij het EB-lassen een smal kanaal, dat zich gedurende het lassen voortbeweegt. Wel moeten de normale maatregelen voor het beschermen van het lasbad en het werkstuk worden getroffen door middel van een beschermgas. Toch is de indringdiepte bij gelijk vermogen minder dan bij het EB-lassen (zie figuur 6.27). Dat komt doordat de laserbundel een deel van zijn energie kwijt raakt door reflectie en door absorptie in een plasmawolk, die ontstaat door verdamping van het te lassen materiaal. Er moet een vermogensdichtheid van 4 à 5 kW/cm² worden toegepast om een dieplaseffect te kunnen bereiken. Bij lagere vermogens is de breedte-hoogte verhouding van een (continu)laserlas ongeveer gelijk (1:1). Het laserlassen heeft dan niet veel voordelen ten opzichte van het plasmalassen, omdat bij dit laatste proces met een aanzienlijk lagere investering ongeveer hetzelfde lasresultaat kan worden verkregen.



figuur 6.27 Vergelijking EB- en laserlassen (AISI 304 - vermogen 10 kW)

6.8.5 Voorbewerking en -behandeling

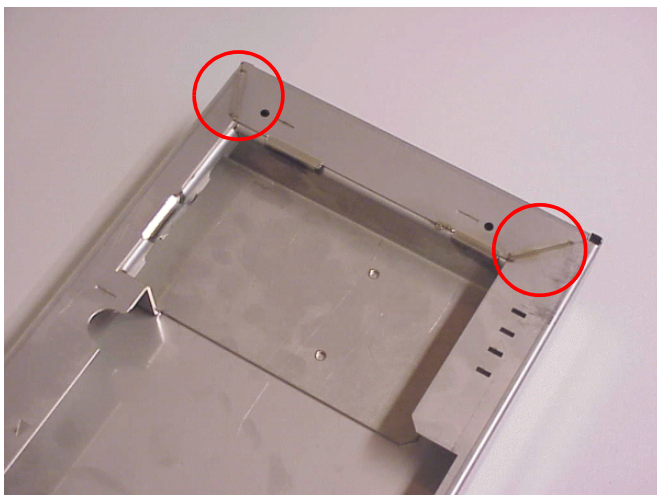
Laserlassen kan alleen met succes plaatsvinden indien de te lassen delen goed worden voorbehandeld. De voorbehandeling van het oppervlak houdt in ieder geval in het schoonmaken (ontvetten, verwijderen van vuil, verf, enz.) van het oppervlak. De te verbinden oppervlakken moeten voldoende glad en vlak zijn. Het laserlassen stelt hoge eisen aan de voorbewerking van de lasnaadkanten en vooral de afwezigheid van spleten (lieftst geen of zo klein mogelijk) is een aspect waar bijzondere aandacht aan moet worden geschonken. Ook speelt bij het lassen het reflectievermogen van de te verbinden metalen een belangrijke rol (de gevoeligheid verschilt per lasertype). In specifieke gevallen worden, om de inkoppeling van de laserbundel te bevorderen, deklagen aangebracht op de te verbinden metalen.

6.8.6 Typen lasers geschikt voor het lassen van roestvast staal

- a) de **CO₂-laser** is een gaslaser die continue of gepulst werkt bij een golflengte van 10,6 μm . Beschikbare continue vermogens: 1 tot 25 kW. Op de lasermarkt hebben de CO₂-lasers hun plaats gevonden voor het snijden, lassen, harden en boren. De laserbundels worden door spiegels getransporteerd.
- b) de **Nd:YAG-laser**, een vaste stof laser die vanaf het begin vooral gepulst, maar tegenwoordig steeds meer als continu laser wordt gebruikt. De golflengte van dit type lasers is een factor 10 korter (1,06 μm) dan de CO₂-lasers, hetgeen voor een specifiek toepassingsgebied zorgt ten aanzien van de te bewerken metalen en nauwkeurigheden. Continu Nd:YAG-lasers met vermogens tot ca. 6 kW zijn tegenwoordig industrieel verkrijgbaar. De laserbundel kan door middel van fibers worden getransporteerd.
- c) de **diodelaser**, een vaste stof laser die werkt met een golflengte van circa 0,9 μm en is voor de metaalbewerking interessant vanwege de simpele, compacte opbouw. De huidige generatie diodelasers zijn inmiddels verkrijgbaar tot 6 kW. De laserbundel kan door middel van fibers worden getransporteerd. De diodelaser kan alleen worden gebruikt voor zogenaamde smeltlassen en niet voor dieptelassen. Hierdoor wordt het toepassingsgebied beperkt tot het dunne plaatgebied (2-3 mm).

Een voorbeeld van een product dat met een diodelaser is gelast wordt weergegeven in figuur 6.28.

Het betreft hier een product, waarbij gekozen is voor de diodelaser vanwege de relatief grootte spot, zodat het zetten als lasnaadvoorbewerking voldoende was.



figuur 6.28 Lassen met een diodelaser gemaakt in 1.4301 (AISI 304)

De ontwikkelingen op het gebied van de lasertechnologie gaan echter door. Zonder in detail te treden zijn de volgende lasertypen commercieel verkrijgbaar voor het lassen van roestvast staal als aanvulling op de bovengenoemde typen:

Disclaser

De disclaser is een diodegepompte Yb:YAG-laser, die onder de familie van vaste stof lasers valt (Yb = Ytterbium). De golflengte van de disclaser is 1030 nm, hetgeen voor een specifiek toepassingsgebied zorgt ten aanzien van te bewerken metalen en nauwkeurigheden. Disclasers met vermogens tot ca. 8 kW zijn tegenwoordig industrieel verkrijgbaar.

Fiberlaser

De fiberlaser is een diodegepompte laser, die eveneens onder de familie van vaste stof lasers valt.

De golflengte van de fiberlaser is 1070-1080 nm. Fiberlasers met vermogens tot ca. 10 kW zijn tegenwoordig industrieel verkrijgbaar.

Voor alle genoemde lasers geldt dat ze uitstekend in staat zijn roestvast staal te lassen. Lasers kunnen echter meer dan alleen maar lassen. Vaak kunnen, zij het soms met enige aanpassingen, met hetzelfde apparaat de volgende bewerkingen worden uitgevoerd:

- Snijden;
- lassen;
- boren/perforeren;
- markeren;
- textureren;
- oppervlakteveredelen;
- oppervlakteharden;
- solderen;
- aanbrengen van deklagen.

Een uitzondering hierop vormt de diodelaser die niet geschikt is voor het snijden, boren, textureren en markeren. Hier staat tegenover dat de te lassen productdelen iets minder nauwkeurig voorbereid hoeven te worden ten opzichte van de andere lasertypen.

Momenteel worden ook reeds "hybride" laserlastechnieken toegepast. Dit omhelst een combinatie van laserlassen met een booglasproces zoals MIG of TIG. Het voordeel hiervan is vooral dat een veel minder strikte lasnaadvoorbereiding nodig is dan bij laserlassen, mogelijkheid tot aanzienlijke productiviteitswinst ten opzichte van laserlassen (en al helemaal ten opzichte van booglassen) en een grotere flexibiliteit inzake lasgeometrie en inklemming ten opzichte van laserlassen.

6.8.7 Voordelen en beperkingen laserlassen

In verband met de grote energiedichtheid van de bundel heeft het laserlassen een aantal typische voordelen boven andere lasprocessen. Vergeleken met de booglasprocessen zijn dit de hoge lassnelheden, de geringe vervorming en het feit dat er geen toevoegmateriaal hoeft te worden gebruikt (het is echter wel mogelijk).

Ten opzichte van het weerstandlassen zijn de voordelen vooral dat er geen contact met de te verbinden delen nodig is, dat op moeilijk bereikbare plaatsen kan worden gelast en dat een goede, reproduceerbare laskwaliteit wordt verkregen. Het laserlassen wordt wel met het elektronenbundelassen vergeleken. De maximale energiedichtheid is bij beide processen namelijk zeer hoog. Een groot voordeel van het laserlassen is echter dat niet in vacuüm hoeft te worden gewerkt. Afscherming van het lasbad met een inert gas, zoals argon, is in de meeste gevallen toereikend. De energiedichtheid in het focuspunt moet bij het laserlassen echter nauwkeurig worden bewaakt, omdat het materiaal wel tot smelten moet worden gebracht, maar niet mag verdampen. Een nadeel ten opzichte van elektronenbundelassen zou kunnen zijn, de maximale materiaaldikte die kan worden gelast (25 mm). In combinatie met de grote precisie waarmee de bundel op het werkstuk kan worden gefocuseerd, en de 'doseerbaarheid' van de energie in de bundel, is het laserlassen vooral geschikt voor het maken van verbindingen in relatief dunne materialen. Dat wil echter niet

zeggen dat grotere materiaaldikten niet met behulp van lasers kunnen worden gelast, de grens ligt momenteel, zoals gezegd, bij roestvast staal en ongelegeerd staal op een maximaal te lassen materiaaldikte van ongeveer 25 mm (25 kW laser). Bij gepulst laserlassen worden de lassen over elkaar gelegd en vormen op die manier een continue las. Hierbij kunnen zeer smalle lassen (enkele tienden van millimeters breed) worden gemaakt.

Belangrijke voordelen van het laserlassen zijn onder andere:

- ▶ Groot bereik in materiaaldikte (0,05 - 25 mm); afhankelijk van het lasertype en het vermogen van de laser;
- ▶ het laserlassen kan, doordat met een zeer smalle bundel wordt gewerkt, met zeer hoge precisie worden uitgevoerd;
- ▶ bij het laserlassen wordt gewerkt met een geconcentreerde warmte-inbreng, waardoor een smalle las en een kleine warmte beïnvloede zone ontstaat en de vervorming van het materiaal klein is;
- ▶ het laserlassen is een contactloze bewerking, waardoor er geen slijtage van het gereedschap optreedt en het werkstuk niet beschadigt;
- ▶ het laserlassen kan (afhankelijk van de materiaaldikte) met hoge snelheid worden uitgevoerd;
- ▶ complexe vormen kunnen eenvoudig met een laser worden gelast, waarbij wijzigingen in de productvorm snel en goedkoop zijn door te voeren;
- ▶ het laserlassen geeft een zeer goede reproduceerbaarheid van de lassen;
- ▶ ten opzichte van het elektronenbundellassen heeft het laserlassen het voordeel dat er geen vacuüm noodzakelijk is voor het lassen;
- ▶ ongelijksoortige metalen kunnen soms worden gelast met een laser;
- ▶ met dezelfde opstelling kan ook worden gesneden of kunnen andere bewerkingen worden uitgevoerd met een laser.

Daarnaast kent het laserlassen uiteraard ook zijn beperkingen waaronder:

- ▶ Het laserlassen vereist een zeer nauwkeurige lasnaadvoorbewerking;
- ▶ bij het laserlassen is nauwkeurige opspan- en inklemparaatuur noodzakelijk;
- ▶ bij het laserlassen is een goed lasnaadvolgsysteem meestal noodzakelijk;
- ▶ voor veel toepassingen is bij het laserlassen een 'autofocus' systeem noodzakelijk (het automatisch op dezelfde plaats houden van het focuspunt);
- ▶ bij het laserlassen moeten de te verbinden oppervlakken goed zijn gereinigd, omdat een zo groot mogelijke absorptie van de bundel is gewenst en reflectie zoveel mogelijk moet worden vermeden;
- ▶ niet alle materialen zijn met hetzelfde lasertype te lassen. Met een CO₂-laser kunnen bijvoorbeeld koper, platina, goud en glanzend gepolijst roestvast staal moeilijk of helemaal niet worden gelast. Met een Nd:YAG-laser kunnen bijvoorbeeld optisch transparante materialen zoals plexiglas en glas maar ook bijvoorbeeld hout en PVC niet worden bewerkt/gelast;
- ▶ hoge investering, niet alleen voor de laser zelf, maar ook ten aanzien van de randapparatuur.

6.8.8 Veiligheid

Zowel bij het EB- als bij het laserlassen zijn speciale veiligheidsmaatregelen noodzakelijk. Bij het EB-lassen met systemen die op een hoge versnellingsspanning werken (150 kV) moet een (lood)afscherming tegen röntgenstraling aanwezig zijn. Bij lagere versnellingsspanning biedt de stalen kamervand voldoende afscherming.

Wanneer een complete laserinstallatie wordt aangeschaft, zal in de meeste veiligheidsvoorzieningen al zijn voorzien. De gebruiker moet echter aandacht besteden aan de volgende risico's:

- ▶ Blootstelling aan laserstraling;
- ▶ blootstelling aan procesemissies (dampen, deeltjes).

Laserstraling

Lasers worden in vier risicoklassen ingedeeld. De indeling

van een laser in een klasse is gebaseerd op de mogelijke stralingschade die de laser kan veroorzaken (hoe hoger de klasse des te groter de schade). De betreffende laserklasse wordt door de fabrikant op het systeem aangegeven.

Klasse 1: Omvat veilige laserbronnen, die zelfs onder het meest ongunstige gebruik geen stralingsschade kunnen veroorzaken.

Klasse 2: Omvat niet geheel veilige stralingsbronnen. Hieronder vallen lasers die zichtbaar licht met een vermogen lager dan 1 mW uitzenden, zodat bescherming van het oog bij blootstelling volgt uit de natuurlijke sluitreflex van het oog. Oogletsel kan alleen dan optreden wanneer men, tegen de natuurlijke reactie in, in de laserbundel blijft kijken.

Klasse 3: Omvat gevaarlijke stralingsbronnen, die kunnen worden onderscheiden in een klasse 3A en 3B:

Klasse 3A: Omvat lasers met een golflengte in het zichtbare gebied én een vermogen minder dan 0,5 W, maar met een voldoende grote bundeldiameter, zodat de lage intensiteit van de bundel geen oogletsel zal veroorzaken, als deze toevallig het oog treft.

Klasse 3B: Omvat laserbronnen waarvan de directe laserbundel (of diens reflectie op een spiegeld oppervlak, bijvoorbeeld het product) wel gevaar opleveren, maar diffuse reflectie van de bundel niet.

Klasse 4: Omvat alle laserbronnen met een vermogen van meer dan 0,5 W, die bij kijken in de directe en (zowel spiegeld als diffuus) gereflecteerde laserbundel oogletsel kunnen veroorzaken. Bovendien kunnen deze lasers verbrandingen van de huid en het ontstaan van brand tot gevolg hebben.

Hoogvermogen lasers voor het bewerken van metalen vallen altijd in klasse 4. Het licht van de Nd:YAG-laser wordt door de ooglenzen op het netvlies gefocusseerd, zonder dat er een oogsluitreflex optreedt. Hierdoor kan onherstelbare schade optreden. Straling van excimeer- en CO₂-lasers wordt geabsorbeerd door de hoorn- en bindvliezen van het oog en kan lasogen veroorzaken of zelfs verbranding. Gevaar bestaat niet alleen bij het direct kijken in de laserbundel, maar ook nadat de bundel gereflecteerd is op het product of op een opspangereedschap.

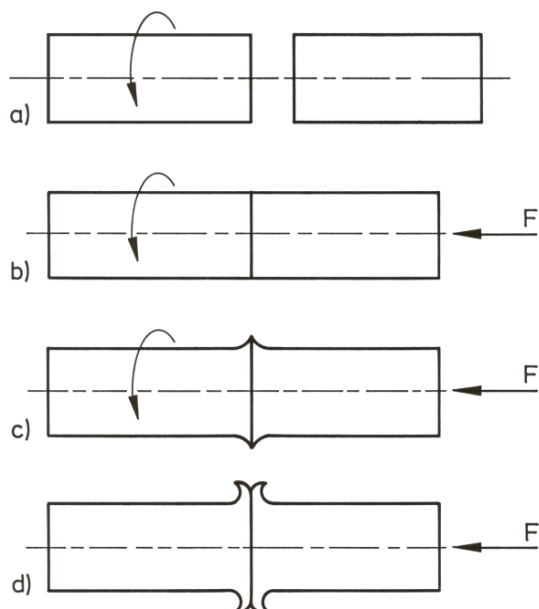
De gehanteerde gevarenklasse betreft het gevaar van een ongefocuseerde laserbundel. Bij laserbewerkingen worden altijd optische componenten gebruikt die de laserbundel focuseren. In het focus is de vermogensdichtheid beduidend hoger. Daarom is hier ook het stralingsrisico het hoogst. Na het focus divergeert de bundel en neemt de vermogensdichtheid en het risico weer af. Voor de maximaal toelaatbare stralingsbelasting, de zogenaamde Maximal Permissible Exposure (MPE), wordt verwezen naar onderstaande normen. Als voorbeeld geldt bij een 5 kW CO₂-laser, waarbij diffuse reflectie op een metaaloppervlak optreedt, een veilige werkafstand van 5 meter. Bij een 100 W Nd:YAG-laser bedroeg een gemeten veilige werkafstand voor diffuse reflectie circa 1 meter en voor spiegeld reflectie meer dan 2 meter. Gezien de grote diversiteit in de geometrie van producten, dienen deze getallen met de nodige voorzichtigheid te worden gehanteerd. In de praktijk gaat men daarom, indien mogelijk, over tot volledige afscherming van de laserinstallatie, waarbinnen zich geen gebruiker bevindt tijdens de bewerking. Voor de afscherming van CO₂-laserstraling is een afscherming van glas of acrylaat (perspex of PMMA) afdoende. Voor de afscherming van straling van Nd:YAG- en diodelasers wordt meestal metaalplaat toegepast, met daarin een speciaal glas als 'kijkvenster'. Het een en ander is vastgelegd in de normen: NEN-EN-IEC 60825, NEN-EN 11553, en NEN-EN 12254. Als de laserinstallatie niet volledig is afgeschermd, moet duidelijk worden aangegeven dat er in de ruimte met lasers wordt gewerkt en moeten een beschermende bril dragen. Het een en ander is vastgelegd in de normen: NEN-EN 207 en NEN-EN 208.

Procesemissies (dampen en deeltjes)

Bij de bewerkingen met lasers kunnen schadelijke dampen en stofdeeltjes vrijkomen. Bij kunststoffen bestaat het risico van vrijkomende toxische en carcinogene stoffen. Ook schadelijke procesgassen en eventueel overtollige beschermgassen moeten worden afgezogen. Bij het laserbewerken van onder andere chroomnikkelstaal blijkt uit metingen dat de MAC-waarden³⁾ over het algemeen niet worden overschreden. Een goede afzuiging is echter altijd vereist. In § 15.4 wordt verder ingegaan op de aspecten die te maken hebben met lasrook.

6.9 Wrijvingslassen

Wrijvingslassen is te onderscheiden in het "conventionele wrijvingslassen" en het "inertie wrijvingslassen". Het proces is gebaseerd op de omzetting van arbeid in warmte. Wrijvingswarmte wordt verkregen door rotatie van een werkstukdeel, waarbij de beweging van de één wordt afgeremd tegen de ander (figuur 6.29). Het wrijvingslasproces dient hoofdzakelijk om producten te lassen met een cirkel- of ringvormige doorsnede ter plaatse van de lasnaad.



figuur 6.29 Wrijvingslassen

- linker deel wordt in rotatie gebracht tot een bepaald toerental.
- rechterdeel wordt er met een bepaalde kracht tegenaan gedrukt, kan echter niet mee gaan draaien.
- door het heet worden van de twee oppervlakken ontstaat een plastische zone en stuikt het materiaal.
- rotatie is gestopt en met dezelfde of nog verhoogde druk wordt verder gestuikt

6.9.1 Conventioneel wrijvingslassen

Bij dit lasproces wordt het roterende deel met een constant toerental en constante kracht tegen het stilstaande deel gedrukt. Indien op deze wijze voldoende warmte (een voldoende brede plastische zone) is ontwikkeld, wordt het draaiende deel snel afgeremd en gestopt, waarna met een toenemende kracht een stuiklas wordt gemaakt. Conventionele wrijvingslasapparaten hebben een constante rotatiesnelheid van 1500 omw./min. De wrijvingsdruk bedraagt ongeveer 100 en de stuikdruk ongeveer 320 N/mm².

6.9.2 Inertie wrijvingslassen

Bij het inertie wrijvingslassen is het roterende werkstukdeel met een vliegwiel verbonden. Door het massastraagheidsmoment en het bereiken van een gewenst toerental wordt energie opgeslagen, die benut wordt voor het tot-

standkomen van de las. Dit geschiedt door het bewegende deel met een zodanige drukkracht tegen het ingespannen stilstaande deel te drukken, dat het bewegende deel binnen twee seconden tot stilstand wordt gebracht. De benodigde wrijvingsdruk bedraagt 45...450 N/mm² en het aanvangstoerental ligt tussen 1500 en 5400 omw./min.

6.9.3 Toepassingen, voordelen en beperkingen

Het wrijvingslassen wordt hoofdzakelijk toegepast bij massafabricage en bezit als voordeel dat zonder toevoegmateriaal en zonder beschermend gas kan worden gelast. Eveneens is het mogelijk om ongelijksoortige materialen met elkaar te verbinden. Als gevolg van de effectieve omzetting van arbeid in warmte is de warmtetoevoer per cm² materiaald doorsnede gering. Het wrijvingslasproces kan eveneens worden toegepast voor het lassen van stiften op een plaatoppervlak. Als beperkingen van het proces zijn te noemen de veelal hoge investering van de apparatuur en het feit, dat de las in verband met de braamvorming een nabewerking vergt.

6.10 Explosiessen

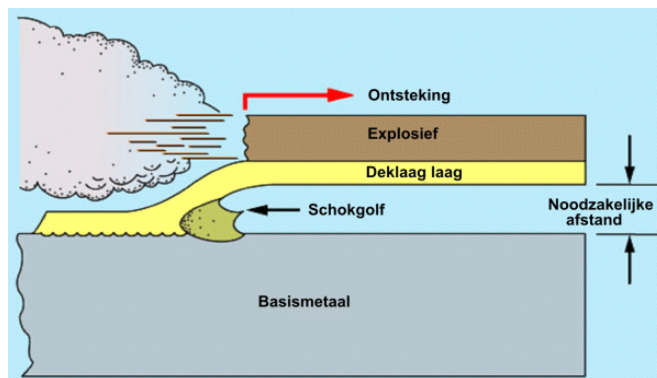
Het explosiessen is geschikt voor het lassen van vrijwel alle metalen. Wel moet het metaal waar het explosief op aan wordt gebracht een zekere vervormingscapaciteit hebben. In de praktijk wordt het explosiessen meestal toegepast voor het maken van verbindingen, die niet of moeilijk met andere lasprocessen kunnen worden gemaakt. Het explosiessen kan uitsluitend worden toegepast bij overlapverbindingen.

Als specifieke toepassingsgebieden van het explosiessen zijn te noemen het vervaardigen van:

- ▶ Geplateerd staal;
- ▶ overgangstukken ten behoeve van het verbinden van ongelijksoortige metalen;
- ▶ pijp/pijpplaat- en pijp/pijpverbindingen.

Voor het verkrijgen van een explosie staan diverse springstoffen ter beschikking. De explosie is een chemische reactie die in zeer korte tijd verloopt, waarbij een hoge temperatuur en een grote hoeveelheid gas ontstaan. De snelle volumetoename van het gas produceert een schokgolf in het onderliggende metaal. Het effect van de bij een explosie vrijkomende energie is afhankelijk van het type en van de gebruikte hoeveelheid springstof. De verschillende springstoffen worden onderscheiden naar hun detonatiesnelheid die meestal ligt tussen 1.500 en 8.000 m/s.

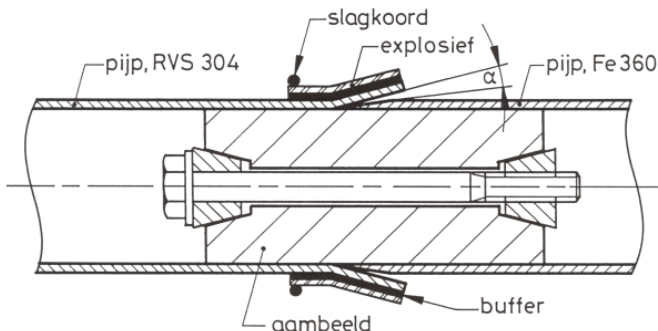
Voor het verkrijgen van een goede verbinding moeten de plaatoppervlakken schoon zijn. Dat wil zeggen vooraf slijpen, schuren, straalreinigen of ontvetten. Meestal worden de platen parallel aan elkaar geplaatst. Voor sommige speciale toepassingen worden de te verbinden delen met een schuine of evenwijdige spleet ten opzichte van elkaar opgesteld. Het verloop van de detonatie moet zo geschieden, dat er een schokgolf ontstaat (zie figuur 6.30), waardoor lucht en oxiden worden verdreven.



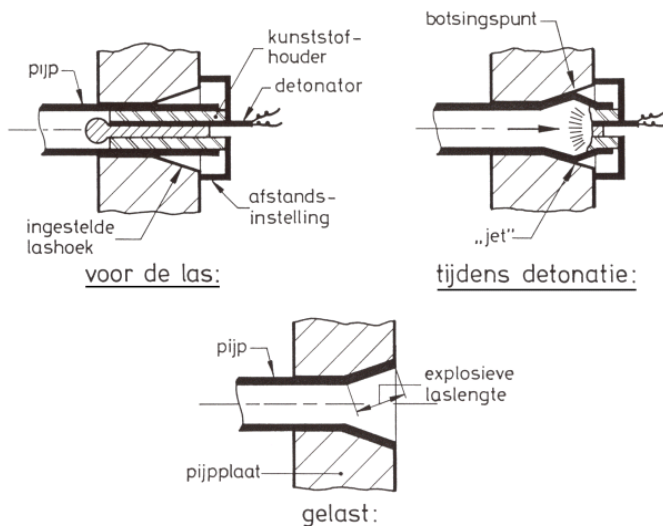
figuur 6.30 Vorming van de schokgolf bij het explosiessen

3) MAC = Maximaal Aanvaardbare Concentratie. Sinds 2008 spreekt de overheid niet meer van MAC-waarden, maar van "grenswaarden".

Om te voorkomen dat het metaaloppervlak door de explosie wordt beschadigd, brengt men tussen het explosief en de bovenplaat een bufferlaag aan van rubber of een laag van ongeveer 5 mm dompelpastic. Afhankelijk van het type verbinding is een "aambeeld-ondersteuning" nodig om de reactiekracht te leveren (figuur 6.31). Voor een pijp-pijpplaat-verbinding (figuur 6.32) hoeft dit niet. Voor het maken van een platering kan met een goed ondersteunde staalplaat worden volstaan.



figuur 6.31 Pijp-pijpverbinding met "aambeeld"



figuur 6.32 Explosielassen van pijp en pijpplaat

Het explosielassen is bij uitstek geschikt voor het verbinden van ongelijksoortige materialen, hiervan zijn vele voorbeelden (bijvoorbeeld TriClad⁴⁾ uit de scheepsbouw voor het verbinden van stalen delen aan aluminium delen). Ook het verbinden van roestvast staal met andere materialen kan uitstekend met het explosielassen zoals figuur 6.33 laat zien.



figuur 6.33 AISI 304 verbonden aan koper door middel van explosielassen

Voordelen van het explosielassen zijn:

- ▶ Met het explosielassen kunnen nagenoeg alle metalen worden verbonden (mits ze voldoende kunnen worden gedeformeerd);

- ▶ met het explosielassen vormt het verbinden van ongelijksoortige metalen (in dikte en chemische samenstelling) geen enkel probleem;
- ▶ met het explosielassen worden kwalitatief goede verbindingen verkregen;
- ▶ er is geen nabewerking nodig na het explosielassen;
- ▶ het explosielassen is een snel lasproces, waarbij grote vlakken in één keer kunnen worden gelast;
- ▶ bij het explosielassen is geen gasbescherming nodig;
- ▶ bij het explosielassen kan in meerdere lagen worden gelast;
- ▶ bij het explosielassen is geen toevoegmateriaal nodig;
- ▶ voor het explosielassen is geen speciale apparatuur noodzakelijk (buiten de explosieven en bijbehorende ontstekers).

Hiertegenover staan een aantal beperkingen waaronder:

- ▶ Het explosielassen vergt een specialistische vakkennis;
- ▶ speciale voorzieningen zijn noodzakelijk (bunker, vergunningen).

Het explosielassen wordt bijna alleen maar toegepast voor enkelstuksfabricage en kleine series.

Veiligheidsoverwegingen

Als gevolg van het grote risico, dat aan het werken met springstoffen is verbonden, moeten pogingen en experimenten door niet-specialisten ernstig worden ontraden. Dit is niet een lasproces voor goedwillende amateurs, doch een verbindingstechniek, die uitsluitend door deskundigen, onder zorgvuldig gecreëerde omstandigheden, kan worden uitgevoerd.

6.11 Richtlijnen voor het hechten en de lasvolgorde

Bij vele van de hiervoor genoemde lasprocessen (o.a. TIG/MAG/Bmbe) zal bij de opbouw van een product de afweging moeten worden gemaakt of het zinvol is producten te hechten of bijvoorbeeld gebruik te maken van een lasmal. Hechten kan zowel bij producten met een geringe materiaaldikte worden uitgevoerd als bij producten met een grote materiaaldikte. In alle gevallen is het doel duidelijk, namelijk ervoor te zorgen dat de productdelen ten opzichte van elkaar gefixeerd zijn tijdens het lassen. Hierna volgen enkele richtlijnen voor het hechten van productdelen.

Het hechten van roestvast staal moet leiden tot het handhaven van een goede vooropening en moet voorkomen dat er vervorming en schaarwerking optreedt. Dat wil zeggen, dat de vooropening tussen de plaatdelen dicht krimpt (zie voorbeeld 1).

voorbeeld 1:

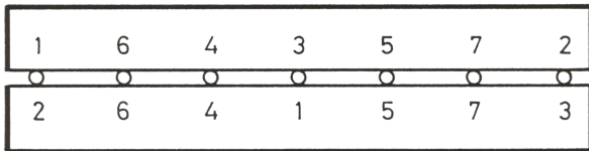
Bij het lassen van een V-naad in 12 mm dik materiaal zal een naadvoorbewerking van 70 in plaats van 60° minder krimpen geven. Dit komt omdat een dikkere elektrode kan worden gebruikt en met dikkere lagen kan worden gelast. Het streven moet zijn om in zo kort mogelijke tijd zo min mogelijk warmte in het werkstuk te brengen.

Hechtlassen worden bij voorkeur aan de aan het medium blootgestelde zijde gelegd. Teneinde een goede warmteverdeling en een zo gering mogelijke vervorming te krijgen, past men de volgorde van hechten toe zoals in figuur 6.34 weergegeven (zie voorbeeld 2).

voorbeeld 2:

Het lassen van een plaat van 3 × 1 m² en 4 mm dikte met een I-naad en een vooropening van 1 mm. De hechtlassen worden gelegd met een lengte van 20 à 40 mm en een hecht afstand van 80 mm. De hechtvolgorde is als in figuur 6.34 aangegeven en het hechten wordt interpolerend uitgevoerd. Na het hechten wordt de plaat gekeerd en de naad aan deze zijde gelast en wordt de interpolerende lasvolgorde aangehouden (zie figuur 6.34). Na het lassen van die zijde, wordt de plaat gekeerd en worden slak en hechtlassen goed verwijderd. Hierna de plaat aflassen.

4) TriClad is een plaat/stripmateriaal dat is opgebouwd uit drie lagen, te weten staal, Al en (Al+Mg). Dit materiaal is door middel van explosielassen vervaardigd en wordt gebruikt voor het monteren van aluminium dekhuzen op stalen schepen.



figuur 6.34 Volgorde bij hechten van plaat

De volgorde van het hechten kan worden uitgevoerd volgens de nummering zoals aangegeven op de eerste of op de tweede rij. De lengte van de te maken hechten bedraagt $5 \text{ à } 10 \times$ de plaatdikte. De onderlinge afstand van de hechten is afhankelijk van de plaatdikte, zoals in tabel 6.19 is weergegeven. Voor het aanhouden van de juiste vooropening bij het hechten kunnen hechtstrippen worden aangebracht. Deze moeten aan de niet-medium zijde worden aangebracht.

Beter is het om afgepaste stukjes materiaal tussen de platen te zetten. Daarvoor kunnen ronde staafjes met een diameter van ca. 3 mm worden gebruikt of haaks omgezette plaatjes.

tabel 6.19 Richtlijn voor de relatie plaatdikte en hechttafstand

plaatdikte in mm	1-2	2-4	4-6	8 en dikker
hechttafstand in mm	50	80	140	200

6.11.1 Aanbevelingen voor het hechten

- ▶ Hecht met een aan de materiaalsamenstelling aangepast lastoevoegmateriaal;
- ▶ maak hechtlassen die dunner zijn dan de uiteindelijke lasuitvoering;
- ▶ hecht aan de medium-zijde. Na slijpen kan de laatste laag aan die zijde worden gelegd;
- ▶ hecht, indien geen ferriet in het lasmetaal is toegestaan, met een basisch lastoevoegmateriaal. Dit lastoevoegmateriaal is minder warmtegevoelig en kan grotere spanningen opnemen;
- ▶ ook als onder poeder wordt gelast, moet met een basisch lastoevoegmateriaal worden gehecht;
- ▶ de hechtlas moet goed zijn aangevloeid en doorgelast;
- ▶ bij pijpen moeten de kop en krater worden uitgeslepen.

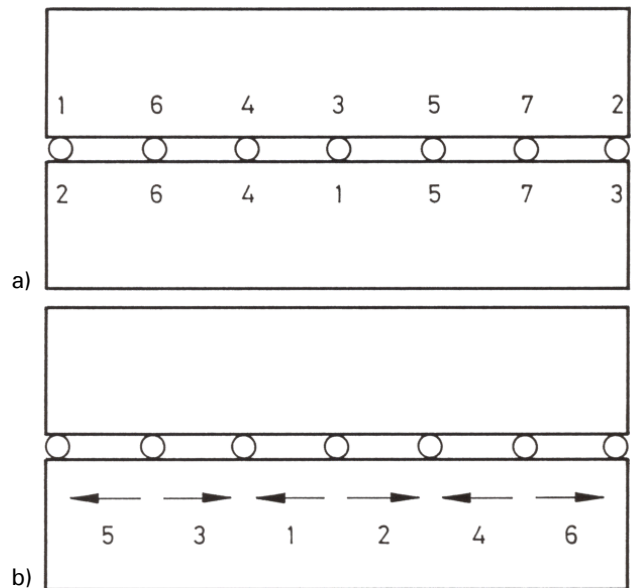
6.11.2 Aanbevelingen in verband met vervorming bij het lassen van roestvast staal

- ▶ Maak het ontwerp zo, dat de lasuitvoering geen problemen oplevert;
- ▶ beperk het aantal lasnaden;
- ▶ lasnaden moeten een zo gering mogelijke inhoud hebben;
- ▶ er moet met een zo gering mogelijke totale hoeveelheid warmte worden gelast. Weinig dikke snoeren zijn gunstiger dan vele dunne;
- ▶ de warmte moet goed over het werkstuk worden verdeeld (zie figuur 6.35);
- ▶ een klemrichting is bij dunne plaat gewenst;
- ▶ de toegepaste lasmethode, lasnaadvorm, lasvolgorde en de uitvoering zijn bepalend voor de mate waarin er vervorming optreedt;
- ▶ door bij grotere producten meerdere lassers verspreid over het product in te zetten, kan de vervorming worden beperkt;
- ▶ X-naden geven minder vervorming dan V-naden.

6.11.3 Aanbevelingen in verband met het lassen en hechten van roestvast staal

"De 10 geboden voor het lassen en hechten van roestvast staal":

- ▶ Zorg ervoor dat roestvast staal tijdens opslag en transport schoon blijft en gescheiden van ongelegeerd staal;
- ▶ bewaar roestvaste lastoevoegmaterialen droog en vuilvrij;
- ▶ gebruik het juiste toevoegmateriaal;



figuur 6.35 Volgorde van hechten en lassen ter vermijding van overmatige krimp:

- a) interpolerend hechten;
b) interpolerend lassen met steeds één elektrode-lengte

- ▶ zorg ervoor dat de werkstukklep van de laskabel goed wordt bevestigd;
- ▶ stel de juiste lasparameters in;
- ▶ zorg er voor dat de lasnaad schoon is;
- ▶ maak de hechtlassen van voldoende lengte en dikte en op de vereiste afstand;
- ▶ las niet op materiaal dat bedekt is met antispattmiddelen of andere vervuulende lagen (bijv. verflagen);
- ▶ gebruik alleen roestvaststalen gereedschap voor het bewerken van het materiaal, het bikken en verwijderen van de slak, enz;
- ▶ gebruik alleen slijpschijven welke voor roestvast staal bestemd zijn.

6.12 Solderen van roestvast staal

Het solderen van roestvast staal vindt dagelijks in ruime mate plaats. Hierbij kan men denken aan toepassingen in de automobiel-, (petro)chemische, voedingsmiddelen - en zuivelindustrie, koeltechniek, energie-opwekkingssystemen, rijwiel- en kantoormeubelindustrie, enz.

Solderen is het verbinden van (al dan niet onderling verschillende) metalen met behulp van een gesmolten toevoegmetaal met een lager smeltpunt of smelttraject dan de te verbinden metalen. Roestvast staal laat zich betrekkelijk eenvoudig door het gesmolten soldeer bevochtigen, hetgeen wil zeggen dat het soldeer goed over het metaaloppervlak uitvloeit. Door capillairwerking kan het soldeer dan in een nauwe spleet gevormd tussen de te verbinden delen (0,05-0,2 mm) vloeien en deze vullen. Tijdens het afkoelen hecht het stollende soldeer zich aan de te verbinden delen en komt zodoende de verbinding tot stand.

Belangrijke voorwaarde voor bevochtiging is, dat het te verbinden metaaloppervlak vrij is van vet, vuil en oxiden. Een geschikt vloeimiddel is in staat deze oxiden te reduceren aan het metaaloppervlak, terwijl vet en vuil met een ontvettingsmiddelen zijn op te lossen. Vloeimiddelresten zijn hygroscopisch en kunnen corrosie veroorzaken; grondig verwijderen van deze agressieve resten is dan ook noodzakelijk. De kans op achterblijven van vloeimiddelresten is met het zacht- en hardsolderen in de praktijk groot.

Er wordt gesproken over zachtsolderen als de smelttemperatuur van het soldeer lager is dan 450°C , terwijl hierboven gesproken wordt van hardsolderen. Over het algemeen zal roestvast staal door middel van het hardsolderen worden verbonden.

Solderen kan voor sommige metalen ook zonder vloeimiddelen worden uitgevoerd. Het solderen vindt dan plaats bij hoge temperatuur en in een beheerste atmosfeer: het z.g. hoogtemperatuursolderen. De beheerste atmosfeer gevormd door een reducerend of inert gas of vacuüm vervangt bij hoge temperatuur ($>800\text{ }^{\circ}\text{C}$) de werking van het vloeimiddel. De kwaliteit van dergelijke gesoldeerde producten is vergelijkbaar met die van gelaste producten.

De warmte-inbreng speelt een belangrijke rol bij het lassen en solderen van dunwandige materialen. Vervorming tengevolge van deze warmte-inbreng kan dan optreden in het materiaal. Wat dat betreft is solderen gunstiger dan lassen, vanwege de lagere warmte-inbreng. Om die reden is het zachtsolderen gunstiger dan het hard- of hoogtemperatuursolderen; een beperking is de lagere toelaatbare bedrijfstemperatuur van de verbinding.

De soldeerprocessen die in meer of mindere mate geschikt worden geacht voor het verbinden van dunne materialen zijn het bout-, vlam-, inductief-, weerstand-, laserstraal-, elektronenstraal-, infrarood-, soldeerbad-, zoutbad-, ultrasoon- en ovensolderen. Het bout-, vlam-, inductief- en weerstandssolderen laten zich handmatig toepassen, terwijl laser- en elektronenstraal-, infrarood-, soldeerbad-, zoutbad- en ovensolderen vaak gemechaniseerd worden uitgevoerd.

Roestvast staal is niet moeilijker te solderen dan ongelegeerd en laag gelegeerd staal. De relatief grote hoeveelheid chroom die aanwezig is in roestvast staal levert een beschermende oxidelaag. Deze oxiden hechten zeer goed aan de ondergrond en daarom moeten deze eerst worden verwijderd, anders verhinderen ze dat het basismetaal wordt bevochtigd door het soldeermetaal. Als het basismateriaal onvoldoende wordt bevochtigd, ontstaat niet de capillaire werking waardoor het soldeer in de soldeerspleet wordt gezogen. De vorming van chroomoxide wordt versneld als roestvast staal wordt verhit aan de lucht. Hoewel het oxide door middel van chemisch reinigen bij kamertemperatuur is verwijderd, kan er bij de hardsoldeertemperatuur ($>450\text{ }^{\circ}\text{C}$) weer snel een nieuw chroomoxidelaag worden gevormd die een nadelige invloed heeft op de bevochtiging van de ondergrond door het gesmolten soldeer. Deze nadelige invloed kan worden verholpen door middel van:

- Chemisch reinigen van het oppervlakteoxide bij kamertemperatuur en vervolgens zeer snel verhitten tot de hardsoldeertemperatuur in een chemische inerte atmosfeer zoals argon;
- het roestvast staal rechtstreeks verhitten tot de hardsoldeertemperatuur in een sterk reducerende atmosfeer zoals waterstof na een minder intensieve reiniging. Hierdoor wordt de oxidelaag gereduceerd en wordt de bevochtiging bevorderd;
- het oppervlak waar de verbinding moet komen bekleden met een chemisch actieve flux die het oxide tijdens het verhitten tot de hardsoldeertemperatuur oplost;
- verhitten onder vacuüm (na reinigen) wat tal van oxiden reduceert, waaronder ook chroomoxide, en dat de vorming van andere oxiden verhindert;
- alleen ontvetten indien vervolgens de juiste flux of atmosfeer wordt gebruikt in geval van roestvast staal met een schoon oppervlak;
- het kiezen van een hardsoldeer met een lagere smelttemperatuur om de oxidatiepotentiaal te verlagen.

Hardsolderen wordt vaak gebruikt om roestvast staal te verbinden met uiteenlopende andere metalen zoals ongelegeerd staal, laag gelegeerd staal en koperlegeringen. Met name combinaties van roestvast staal met non-ferro metalen kunnen met de gangbare lasprocessen (TIG/MIG/MAG/Bmbe) niet worden gelast.

6.12.1 *Uitvoering soldeercyclus*

De verwarmingsmethode moet zo worden gekozen dat het werkstuk gelijkmatig en daarbij zo snel mogelijk op soldeertemperatuur wordt gebracht. Hierbij moet men rekening houden met het relatief geringe warmtegeleidingsvermogen

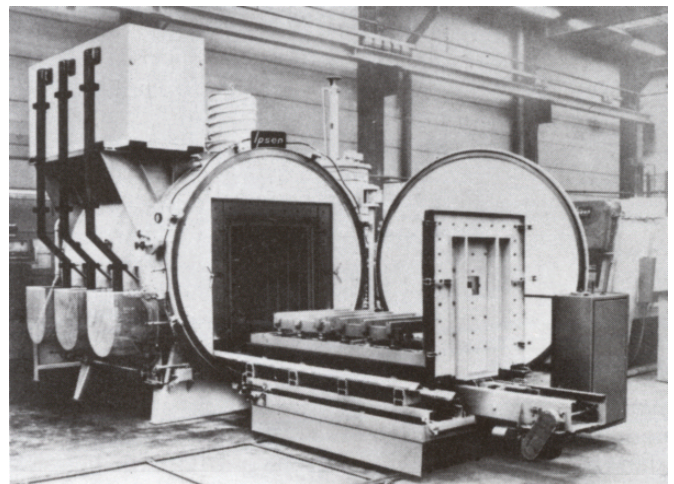
van roestvast staal en bij het inductief verhitten met het feit dat zowel ferro-magnetische ferritische en martensitische roestvaste staalsoorten tot ongeveer $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ sneller doorwarmen dan de niet-magnetische austenitische kwaliteiten. De gehele soldeercyclus moet zo worden uitgevoerd dat ongunstige beïnvloeding van de materialen zoveel mogelijk wordt voorkomen en aan de per soort afhankelijke warmtebehandeling wordt voldaan.

6.12.2 *Het solderen in ovens*

Hierbij wordt het gehele werkstuk op de soldeertemperatuur gebracht. Het soldeer wordt vooraf geplaatst. Het solderen kan bijvoorbeeld plaatsvinden in een oven, die door verhittingsspiralen (weerstand) wordt verhit. De lucht kan vrij toetreden. De normale maatregelen, die bij het vlam-solderen worden genomen, zijn ook nu van toepassing. Het werkstuk wordt echter in zijn geheel verhit, zodat het werkstuk op de plaatsen, waar zich geen vloeimiddel bevindt, kan oxideren. Deze wijze van ovensolderen wordt nog weinig toegepast.

Interessant is het als de gehele atmosfeer in de oven zodanig is, dat deze het vloeimiddel kan vervangen. Tegelijkertijd zal dan namelijk het gehele werkstuk blank blijven of zelfs blank worden gegloeid gedurende het soldeerproces. Als (beschermende) atmosfeer komen in aanmerking:

- gasen;
- vacuüm (zie figuur 6.36).



figuur 6.36 Vacuümoven

Bij het gebruik van ovens met een gasbescherming kunnen deze open of gesloten zijn. De open of doorstootovens worden veel gebruikt voor het solderen van massa-artikelen. De gehele soldeercyclus moet namelijk, in relatie tot de bandtransportsnelheid, afgestemd zijn op het product.

6.12.3 *Inductief solderen*

Principe van het inductief solderen

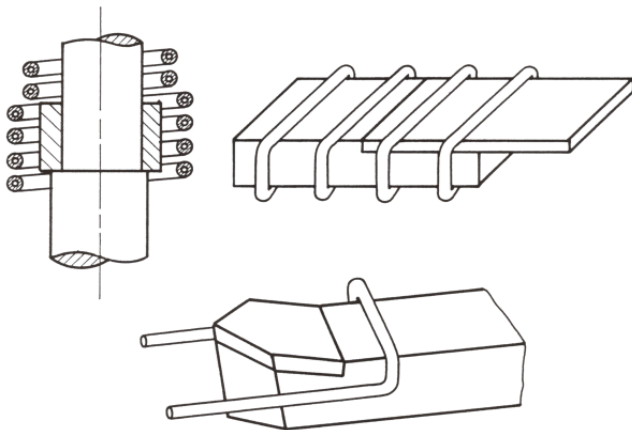
Het werkstuk wordt in het magneetveld van een ringvormige stroomgeleider gebracht. Door deze geleider, die inductor of werkspoel wordt genoemd, gaat een wisselstroom met een frequentie van $1.000\ldots 10.000\text{ Hz}$ (middelfrequent) of hoger dan 50.000 Hz (hoogfrequent). Hierdoor ontstaat rond de spoel een eveneens wisselend magneetveld. Dit veld veroorzaakt in het metaal dat daarin wordt gebracht, een inductiestroom die door het Joule-effect het materiaal verhit. De indringdiepte van dit effect is afhankelijk van de frequentie en is geringer naarmate de frequentie hoger is. Om op deze wijze te kunnen solderen, moet men beschikken over een generator met voldoende capaciteit (3 kW en hoger). De werkspoel moet een aan het product aangepaste vorm hebben (figuur 6.37), waardoor dit proces hoofdzakelijk geschikt is voor seriewerk.

Het solderen met behulp van inductieverwarming kan een aantrekkelijke wijze van werken zijn. Er zijn enkele duidelijke voordelen te noemen:

- De verwarming is plaatselijk, waardoor juist daar de verwarming plaatsvindt waar het noodzakelijk is, namelijk in een smal gebied om de soldeernaad;
- een minimale beïnvloeding van het werkstuk door de ingebrachte warmte;
- een snelle en reproduceerbare werkwijze, waardoor dit type solderen economisch kan zijn, ondanks de hoge investeringskosten;
- het inductief solderen leent zich goed voor automatisering.

Er zijn ook beperkingen te noemen, zoals:

- De grootte van de investering, ten opzichte van bijvoorbeeld die bij het vlassolderen;
- door de snelle verwarming moet per product een aangepaste soldeercyclus worden aangehouden, die niet met behulp van een thermokoppel kan worden geregeld.



figuur 6.37 Plaatsing van de werkspoel bij het inductief solderen

6.12.4 Voorbehandeling van de oppervlakken

- De te solderen oppervlakken moeten geheel vrij te zijn van olie, vet of vuil en van oxidelagen. De oxidehuid moet door middel van beitsen of mechanisch (bijvoorbeeld staalgritten) worden verwijderd;
- oppervlakken met bewerkingsgroeven laten zich beter bevochtigen dan glad gewalste oppervlakken; ook beitsen is hiervoor bevorderlijk. De ruwheid van de oppervlakken in de soldeerspleet moet bij voorkeur $Ra = 0,8 \dots 6,4 \mu m$ zijn;
- indien (in het staal aanwezige) inwendige spanningen tijdens het solderen de vereiste maatvoering ongunstig kunnen beïnvloeden of spanningscorrosie kunnen veroorzaken, moet men voor het solderen spanningsarm gloeien, zo nodig gevolgd door verwijdering van een daarbij gevormde oxidehuid;
- de moeilijke reduceerbaarheid van de oxidehuid bij roestvaste staalsoorten vereist het gebruik van vloeimiddelen. Men kan dit vermijden door:
 - te solderen in een reducerende atmosfeer;
 - bij het hardsolderen de soldeerplaatsen van tevoren te verkopen of te vernikkelen (laagdikte ongeveer $10 \mu m$).

6.12.5 Soldeer, vloeimiddel en beschermende atmosfeer

Soldeer

Voor het hardsolderen zijn soldeertypen op basis van koper-, zilver- en nikkelhoudende legeringen en edelmetalen (goud en palladium) bruikbaar. De koper-zinksolderen zijn echter af te raden wegens de slechte corrosievastheid.

Met kopersolderen laten zich alle roestvaste staalsoorten goed solderen, waarbij voornamelijk ovensolderen onder reducerend gas of in vacuüm wordt toegepast naast inductief- en weerstandssolderen, al of niet onder reducerend gas of in vacuüm. Door de dunvloeibaarheid van de koper-

solderen is een zeer geringe spleetbreedte noodzakelijk ($0,02 - 0,05 \text{ mm}$). De koper-fosforsolderen zijn niet bruikbaar, daar het aanwezige fosfor de vorming van brosse fosfideverbindingen in de naad tot gevolg heeft.

De zilversolderen zijn zeer bruikbaar voor soldeerverbindingen tussen corrosievaste staalsoorten onderling of met andere materialen. Ze kunnen worden gebruikt voor verschillende verhittingsmethoden. Het verschil in smelttemperatuur tussen de diverse soldeerlegeringen maakt het met zilversolderen mogelijk constructies in etappes te solderen, gebruikmakend van een steeds lager smeltend soldeer. Ook bredere spleten ($0,10 - 0,15 \text{ mm}$) kunnen met bepaalde zilversolderen goed worden overbrugd.

Bij zilversolderen is meestal het gebruik van een vloeimiddel vereist, zelfs bij verhitting in een atmosfeer die voldoende reducerend is. De soldeertemperaturen liggen voor bijna alle zilversoldeersoorten in het gebied van de korrelgrens-carbidevorming bij de austenitische staalsoorten. Afhankelijk van de soldeercyclus en toepassing (milieu) moet men een keuze maken voor een geschikt type roestvast staal (mogelijk zijn: typen met laag koolstofgehalte en gestabiliseerde typen). Bij voorkeur gebruikt men de nikkelhoudende zilversolderen, wat bij de chroomstaalsoorten zelfs noodzakelijk is ter voorkoming van grensvlakaantasting in vochtige milieus. Door vooraf te vernikkelen kan men dit eveneens voorkomen. Het optreden van spanningscorrosie door soldeerbestanddelen kan worden voorkomen door gebruik te maken van een laagsmeltend type soldeer.

De nikfelsolderen geven corrosie- en hittevaste verbindingen. Zij vereisen een hoge soldeertemperatuur, waardoor meestal ovensolderen en dan veelal in een goed vacuüm moet worden toegepast. Voor meer informatie over soldeertypen, zie de voorlichtingspublicatie VM 126 (Zachten hardsolderen [39]).

Vloeimiddel

De stabiele oxidehuid bij de roestvaste staalsoorten vereist het gebruik van agressieve vloeimiddelen. Bij het gebruik ervan moet dan ook de nodige zorg aan de uitvoering (na-behandeling) worden besteed.

Beschermende atmosfeer

Om oxidatie zoveel mogelijk tegen te gaan en om het gebruik van vloeimiddelen te vermijden, waardoor de kwaliteit van de verbinding kan worden verbeterd, maakt men gebruik van reducerende atmosferen bij het solderen. Bij het gebruik van zeer droge waterstof (dauwpunt -80°C of lager) of in een vacuüm kan men in de meeste gevallen solderen zonder gebruik van vloeimiddelen. Dit geldt voor alle gevallen waarbij de soldeertemperatuur $> 900^\circ \text{C}$ is, aangezien dan de chroomoxiden kunnen worden gereduceerd.

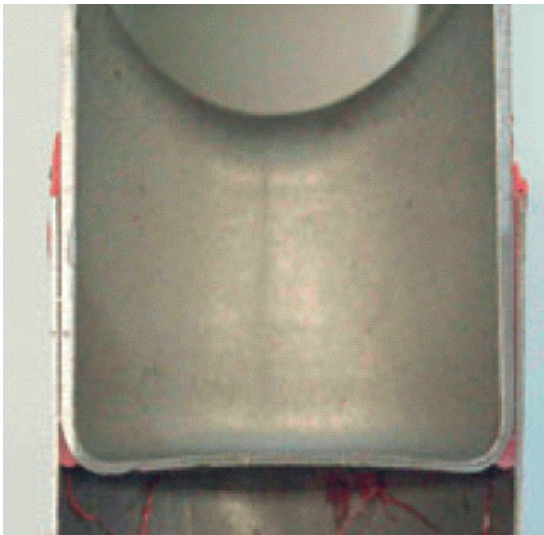
6.13 Lijmen van roestvast staal

Lijmen is een uitstekende constructiewijze om roestvast staal te verbinden en is als verbindingstechniek niet weg te denken uit ons dagelijks bestaan. Lijmen kan - mits de juiste lijm en bevestigingsmethode wordt toegepast - een zeer fraaie, duurzame en economisch bijzonder interessante methode zijn om metalen en/of kunststofdelen blijvend te verbinden. Lijmverbindingen bezitten een groot aantal voordelen ten opzichte van andere verbindingstechnieken zoals lassen, solderen of mechanisch verbinden. Lijmverbindingen isoleren de verschillende materialen van elkaar en hierdoor zullen corrosieprocessen minder snel optreden. Daarnaast is er vaak geen, of slechts beperkte, warmte-inbreng benodigd voor het verlijmen. Dit voorkomt mechanische vervormingen als gevolg van thermische spanningen. Lijmen wordt daarom vaak als alternatieve verbindingstechniek ingezet voor lassen of solderen, waarbij een hoge maatnauwkeurigheid een belangrijke rol speelt (bijvoorbeeld bij kleine onderdelen). Dit geldt zeker voor het verbinden van ongelijksortige metalen, maar tevens voor metalen met (kunststof)deklagen, waar andere verbindingstechnieken niet of moeilijk toepasbaar zijn.

Een gelijmde verbinding kent andere karakteristieken en mogelijkheden dan bijvoorbeeld een gelaste verbinding. Vanaf de ontwerpfase moet hiermee rekening worden gehouden. Lijmverbindingen lijken qua ontwerp veel op soldeerverbindingen, er wordt bij voorkeur gebruik gemaakt van overlapverbindingen teneinde voldoende krachten over te kunnen brengen (zie figuur 6.38 en 6.39).



figuur 6.38 Kenmerkende lijmvormingen



figuur 6.39 Constante lijmnaddikte en een zogenaamde 'fillet' of lijmkraal [36]

Een nadeel van lijmvormingen is, dat als een verbinding eenmaal gemaakt is, deze vaak alleen nog kan worden losgenomen na een sterke temperatuurverhoging of -verlaging van het product. De algemene losneembaarheid van lijmvormingen is dus gering. Echter, er is inmiddels een aantal producten op de markt verschenen die onder specifieke omstandigheden (bijvoorbeeld bij verhoogde temperatuur) losneembaar zijn. Lijmen is een complex proces, waarbij vele fysisch-chemische processen met nog meer variabelen een rol spelen. Er is een grote mate van vakmanschap vereist om een goede lijmvorming te construeren. Hierbij spelen voornamelijk de reiniging van de producten, de lijmsselectie en de vorm van de lijmspleet (in relatie met het overbrengen van de krachten) een zeer belangrijke rol. Wat dat betreft is er weinig verschil met lassen, solderen, of mechanisch verbinden.

Lijmprocessen zijn op verschillende wijzen in te delen. De wijze van indeling heeft eigenlijk alleen invloed op de rangschikking van de lijmen of lijmsystemen. Hierbij valt te denken aan een onderscheid in fysisch of chemisch uithardende lijmsystemen. Dat wil zeggen uitharding op basis van bijvoorbeeld verdamping van een oplosmiddel (fysische uitharding) respectievelijk het optreden van een reactie tussen verschillende stoffen (chemische uitharding). Maar het is natuurlijk net zo goed mogelijk om een lijm te selecteren op basis van de meest gewenste wijze van aanbrengen

(kwasten, borstelen, kitspuit, drukspuit, gieten, walsen, enz.) en/of de beoogde wijze van lijmuitharding (lijmklemen bij kamertemperatuur, lijmpers verwarmd, UV-licht, enz.). Na deze praktische hoofdkieze, waarbij de lijm ondergeschikt is geworden aan de wijze van aanbrengen of uitharding, komt vaak nog maar een beperkt assortiment aan lijmen in aanmerking voor de gewenste toepassing. Verdere praktische keuzen, zoals het aantal te verlijmen componenten (één of twee componenten) en bijvoorbeeld de gewenste duurzaamheid, laten uiteindelijk een nog verder beperkt aantal toepasbare lijmsystemen over.

Eén- of tweecomponent systemen

Veel vochtuithardende lijmsystemen (dit zijn lijmsystemen die vocht uit de omgevingslucht gebruiken om uit te harden) zijn zowel verkrijgbaar als één- of tweecomponent lijmsysteem. Wanneer zij worden gebruikt als tweecomponent systeem, dan zijn zij in het gebruik vaak nog bijna even handelbaar als de ééncomponent lijmsystemen. Vrijwel alle tweecomponent lijmsystemen zijn tegenwoordig verkrijgbaar met bijpassende lijmpistolen, boosters (die direct vocht inbrengen in de lijm tijdens het aanbrengen) en statische mixers, zodat zij zich in de praktijk bijna net zo eenvoudig laten gebruiken als het ééncomponent lijmsysteem.

Voorbehandeling en voorbereiding

Voor een hoge sterkte en duurzaamheid is een voorbehandeling wenselijk, in ieder geval moet het oppervlak minimaal goed ontvet zijn. Over het algemeen is het oppervlak van het roestvast staal van dien aard, dat een extra oppervlaktebehandeling vooraf niet noodzakelijk is.

Alvorens het lijmp proces kan worden uitgevoerd, moeten alle onderdelen goed op elkaar passen, zodat tijdens het lijmp proces een gelijkmatige lijmnaddikte kan worden gerealiseerd. Indien ten behoeve van de positionering van de onderdelen tijdens uitharding lijmfixeerpennen of boutjes worden gebruikt, moeten de hiervoor benodigde gaatjes vooraf worden geboord.

Bij moeilijk hechtende materialen of sterk vervuilde oppervlakken is een voorbehandeling noodzakelijk. Pas dan kan de hoge sterkte van een lijm volledig worden benut. De functie van het voorbehandelen is het bereiken van de maximale hechting van de te lijmen oppervlakken aan de lijm. Een hoge reinheid (geen organisch restmateriaal) is de minimale eis voor een goede hechting. Hierdoor wordt een goede spreiding van de lijm verkregen en daarmee de hechting en duurzaamheid van de verbinding verbeterd. Ook het bereiken van een bepaalde oppervlakteruwheid kan een doel van de voorbereiding zijn, maar een hoge ruwheid is nog geen garantie voor een goede hechting. Voorbehandelingen kunnen worden verdeeld in mechanische en chemische processen.

Een minimale, maar veel gebruikte, voorbehandeling is: ontvetten, schuren en aansluitend nogmaals ontvetten. Andere mechanische reinigingsmethoden zoals slijpen, schuren en stralen worden ook toegepast. Onder chemische reinigingsmethoden worden ontvetten, etsen, beitsen en anodiseren gerekend. Voor aluminiumlegeringen wordt vaak beitsen en/of anodiseren aanbevolen, voor staalsoorten vaak stralen of schuren.

Om het oppervlak zo snel mogelijk na de voorbehandeling te consolideren (zodat er geen ongewenste vervuiling meer op neer kan slaan), kan een lijmprimer worden toegepast. Ook voor lijmt toepassingen, die in de praktijk aan een hoge vochtbelasting worden onderworpen, wordt vaak een primer aanbevolen. Veel van deze lijmprimers of hechtverbetersaars moeten wel bij verhoogde temperatuur worden gedroogd of uitgehard.

Er zijn daarnaast tevens lijmen (epoxies, acrylaten) verkrijgbaar, die zonder voorbehandeling op vervuild plaatmateriaal kunnen worden gebruikt (voor de automobiellndustrie). De maximale sterkte van de verbinding is dan wel lager. Hierbij moet worden opgemerkt, dat de vervuiling dan wel in zekere mate gedefinieerd is.

Het lijmen van roestvast staal kan - mits de juiste lijm en bevestigingsmethode wordt toegepast - een zeer fraaie, duurzame en economisch bijzonder interessante methode zijn om roestvast staal blijvend te verbinden.

Lijmenverbindingen bezitten een aantal voordelen ten opzichte van andere verbindingstechnieken:

- Ongelijksoortige materialen zijn eenvoudig te verbinden;
- lijmverbindingen isoleren de verschillende materialen van elkaar (er zijn echter ook electrisch geleidende lijmen beschikbaar);
- de warmte-inbreng is nihil of zeer beperkt (weinig vervorming, hoge maatnauwkeurigheid).

Er zijn echter ook beperkingen zoals:

- Het temperatuursgebied is beperkt tot $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, tenzij speciale lijmen worden gekozen;
- de verbinding kan vaak alleen nog worden losgenomen na een sterke temperatuurschok.

Alle roestvaste staalkwaliteiten zijn uitstekend te lijmen. Voor een hoge sterkte en duurzaamheid is een voorbehandeling wenselijk, in ieder geval moet het oppervlak minimaal goed ontvet zijn. Over het algemeen is het oppervlak van het roestvast staal van dien aard, dat een extra oppervlaktebehandeling vooraf niet noodzakelijk is.

Ook bij het lijmen wordt uit het oogpunt van sterkte de voorkeur gegeven aan overlappen.

Over het algemeen heeft een lijmmaad bij het lijmen van roestvast staal geen nabewerking. Indien er sprake is van een vochtige agressieve omgeving en/of verhoogde temperatuur, kan de duurzaamheid van de verbinding worden verlengd door het gebruik van primers die de oppervlakte-degradatie en/of het indringen van vocht op het lijmvlak tegengaan.

Meer informatie betreffende het lijmen kan worden gevonden in het Tech-Info-blad TI.03.15 - "Lijmprocessen voor dunne plaat en buis", dat te vinden is op de website www.dunneplaat-online.nl

6.14 Mechanisch verbinden van roestvast staal

Mechanische verbindingstechnieken worden veel toegepast op dunne plaat. Alle roestvaste staalkwaliteiten zijn door middel van bijna alle mechanische technieken te verbinden. Wel is een zekere mate van vervormbaarheid van de basismaterialen noodzakelijk om een goede mechanische verbinding te kunnen maken. Martensitisch roestvast staal of sterk koud vervormd roestvast staal kan daarom met een aantal mechanische verbindingstechnieken niet worden verbonden waaronder drukvoegen, ponsklinken, klinken, blindklinken, klinkbouten, lasmoeren, inpersschroefdraad, vloeiboren, (lipomzetten en felsen). Het scala aan mechanische verbindingsmethoden is zeer uitgebreid zoals uit tabel 6.20 blijkt.

De voorbehandeling van de roestvaststalen onderdelen is meestal beperkt en kan bestaan uit ontvetten en soms licht opschuren. Onder een voorbewerking valt ook het aanbrengen van een gat in het plaatmateriaal. Dit kan bij roestvast staal gebeuren door middel van ponsen, boren of lasersnijden. Bij de eerste twee technieken is het van belang de ontstane bramen of kleine spanen te verwijderen, omdat deze een negatieve invloed hebben op de corrosieweerstand van het roestvast staal.

De selectie voor een bepaald type mechanische verbinding wordt meestal uitgevoerd op basis van kosten, tijd, sterkte en uiterlijk. Als men kiest voor een mechanische verbinding, is het van belang het productontwerp hierop af te stemmen. Daarbij moet worden bedacht dat mechanische verbindingen alleen geschikt zijn voor relatief droge toepassingen. Bij natte toepassingen kunnen de spleten spleetcorrosie veroorzaken. Als verschillende metalen worden gebruikt voor het vervaardigen van een mechanische verbinding, moet men ook rekening houden met contactcorrosie.

tabel 6.20 Overzicht van de diverse mechanische verbindingstechnieken

verbindingstechniek	losneembaar (1 ×)	losneembaar (herhaaldelijk)
drukvoegen	nee	nee
ponsklinken	nee	nee
klinken	nee	nee
blindklinken	nee	nee
klinkbouten	nee	nee
tappen	ja	ja
zelftappende schroeven	ja	ja
zelfborende en -tappende schroeven	ja	ja
lasmoeren	ja	ja
felsmoeren	ja	ja
inpersschroefdraad	ja	ja
inpers-felsschroefdraad	ja	ja
zelfponsende moeren	ja	ja
blindklinkschroefdraad	ja	ja
plaatmoeren/clips	ja	ja
kooimoeren	ja	ja
vloeiboren	ja	nee
bout-moer	ja	ja
klikken	ja	ja
lip omzetten	ja	nee
felsen	nee	nee

Belangrijke voordelen van mechanisch verbinden zijn onder andere:

- In veel gevallen is de verbinding eenvoudig tot stand te brengen;
- met mechanische verbindingen kunnen alle metalen worden verbonden; vaak kunnen andere materialen, zoals kunststoffen of keramieken, aan metalen worden bevestigd;
- het gereedschap dat nodig is voor het tot stand brengen van de verbinding is vaak eenvoudig en vergeleken met de benodigheden voor andere verbindingstechnieken relatief goedkoop;
- de diversiteit aan mechanische verbindingen is groot, zodat er voor veel situaties een juiste techniek beschikbaar is;
- de kwaliteit van de verbinding is in veel gevallen visueel te beoordelen;
- de reproduceerbaarheid van de meeste verbindingstechnieken is zowel handmatig als gemechaniseerd hoog;
- de meeste mechanische verbindingstechnieken zijn ARBO- en milieuvriendelijk;
- bij het aanbrengen van mechanische verbindingen is vaak geen sprake van warmte-inbreng in het materiaal;
- veel verbindingen die behoren tot de groep mechanische verbindingen zijn losneembaar (bouten, schroeven);
- veel verbindingstechnieken zijn gemechaniseerd toe te passen (drukvoegen).

Als beperkingen van mechanische verbindingen kunnen genoemd worden:

- De verbinding is altijd zichtbaar;
- de meeste mechanische verbindingstechnieken zijn niet geschikt voor het maken van stompe verbindingen, of voor het onderling verbinden van buismateriaal, of van buismateriaal aan plaatmateriaal;
- niet alle verbindingstypen zijn losneembaar (drukvoegverbindingen);
- niet alle verbindingstechnieken zijn automatiseerbaar (bouten, schroeven);
- de kwaliteit van de verbinding is niet altijd visueel te beoordelen;
- in veel gevallen is een voorbewerking noodzakelijk. Deze voorbewerking bestaat normaliter uit het aanbrengen van een gat in het plaatmateriaal;
- bij een onjuiste constructie bestaat er gevaar voor corrosie (spleetcorrosie, contactcorrosie).

Hoofdstuk 7

Naadvoorbewerking

7.1 Inleiding

Net als bij ongelegeerd en laaggelegeerd staal moeten de naadkanten van roestvast staal vrijwel altijd worden voorbereid, voordat een lasverbinding kan worden gemaakt. Omdat roestvast staal een groter gehalte aan legerings-elementen bevat, zijn er ten opzichte van ongelegeerd staal verschillen in de wijze van naadvoorbewerking. Ook tussen de afzonderlijke typen roestvast staal bestaan verschillen, die terug te voeren zijn tot de structuur en de fysische eigenschappen.

De voorbereidingsmethoden die ons ter beschikking staan zijn:

- mechanisch voorbereiden;
- thermisch voorbereiden.

7.2 Mechanisch (verspanend) voorbereiden

7.2.1 Algemene karakterisering van de verspanbaarheid van roestvast staal

Zoals al is opgemerkt, moet men bij de bewerking rekening houden met het staaltype en de structuur. De hardheids-toename tijdens de verspanende bewerking vindt zijn oorzaak in twee verschijnselen, namelijk:

- Door versteviging van de structuur;
- door martensietvorming.

Austenitische soorten bezitten een warmtegeleiding die slechts 30% is van die van ongelegeerd staal. Door de toenemende deformatie-energie (tengevolge van de hogere gereedschapsdruk) en de slechte warmte-afvoer ontstaat een warmtestuwing bij de snede, die tot hoge temperaturen aanleiding kan geven.

De rekgrenzen zal ter plaatse van de snede sterk dalen, waardoor het roestvast staal gemakkelijk deformeert. Hierdoor maken austenitische staalsoorten tijdens het spaanafnemen een taaie, stroperige indruk. Tevens leidt de hoge temperatuur en een toenemende gereedschapsdruk tot een sneller bot worden van het gereedschap (adhesieve slijtage; vreten). Om dit zoveel mogelijk te voorkomen, zal men snijgereedschap moeten gebruiken dat tegen hoge temperatuur bestand is en dat tevens goed gekoeld wordt met hiervoor geschikte snij-oliën (zie hiervoor § 7.2.2).

De austenitische kwaliteiten zoals 1.4301 en 1.4404 kunnen bij het verspanen problemen opleveren, die terug te voeren zijn op de lage thermische geleidbaarheid en de grotere mate van versteviging. Deze ten opzichte van ongelegeerd staal afwijkende eigenschappen leiden tot hogere verspaningskrachten, een grotere thermische belasting van het gereedschap en mogelijk tot kantenopbouw. Doorgaans hebben deze materialen ook een ongunstige spaanvorm.

Er zijn gemodificeerde roestvaste staalsoorten (1.4305 en 1.4401 + Ca) ontwikkeld, waarvan de laatste is gelegeerd met calcium, waardoor de verspanbaarheid ten opzichte van de standaard kwaliteiten verbeterd is. Vaak kunnen deze gemodificeerde kwaliteiten ook nog worden geleverd met een gegarandeerd minimaal percentage zwavel. Hierdoor wordt de verspanbaarheid nog verder verbeterd.

Ter verbetering van de verspanbaarheid zijn er zowel austenitische als ferritische roestvaste automatenstalen met extra zwavel verkrijgbaar. Door het toevoegen van zwavel neemt de wrijving tussen spaan en gereedschap af, wat een gunstig effect heeft op de warmte-ontwikkeling en de levensduur van het gereedschap verlengt. Het toevoegen van zwavel heeft ook enkele nadelen, zoals de verminderde weerstand tegen vooral putcorrosie, en een minder goede vervormbaarheid. De lasbaarheid van dergelijke roestvaste staalsoorten is vrijwel altijd problematisch.

Om de corrosieweerstand te verbeteren kan aan zwavelhoudende legeringen koper worden toegevoegd. Een andere legering gelegeerd met zwavel en koper is de 1.4570, dit materiaal heeft een verbeterde verspanbaarheid en corrosieweerstand.

In het algemeen zijn ferritische roestvaste staalsoorten onder dezelfde condities te verspanen als ongelegeerd staal met een gelijke treksterkte. Bij een toenemend percentage chroom moet wel rekening worden gehouden met een grotere neiging tot opbouwsnikanten. Bij deze soorten wordt de beste spaanafnemende bewerkbaarheid verkregen bij een hardheid van 200-400 HB, een hardheid, die wordt bereikt door middel van koudvervorming (uit te voeren door de materiaalleverancier of door bijvoorbeeld grof voordraaien). Veel toegepast is het ferritische roestvaste automatenstaal 1.4104. De negatieve invloed van zwavel op de corrosieweerstand wordt in deze kwaliteit door het molybdeen enigszins gecompenseerd. In de groep van roestvaste automatenstalen heeft 1.4104 de beste verspanbaarheid, maar is ook het minst bestand tegen corrosie.

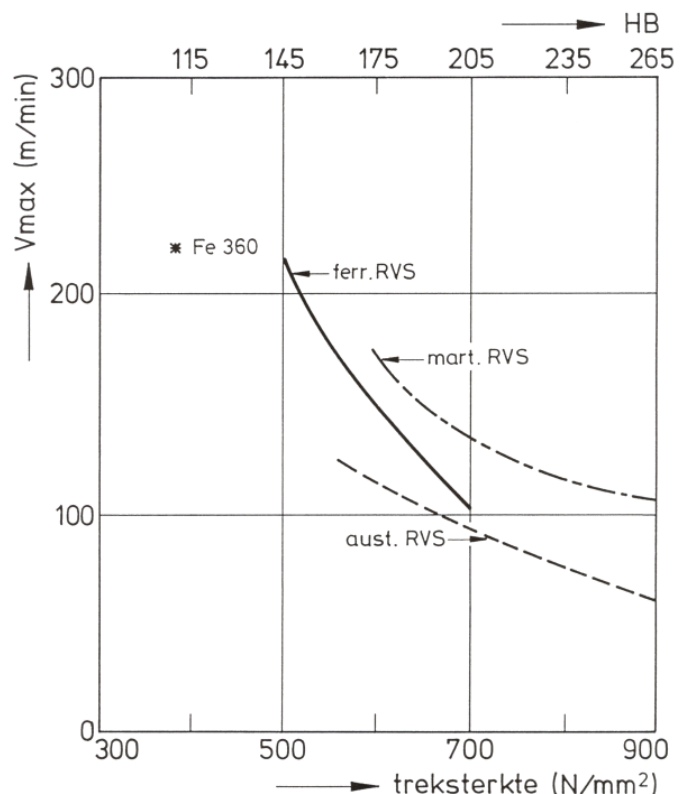
De martensitische chroomstalen vertonen de neiging tot "kleven" in zachtgegloeide toestand. Daarom worden deze staalsoorten niet volledig zachtgegloeid, maar wordt de gloeibehandeling zodanig uitgevoerd, dat een hardheid van 200-260 HB wordt verkregen.

Figuren 7.1 en 7.2 geven een indicatie van de verschillen in verspanbaarheid bij verschillende staalsoorten.

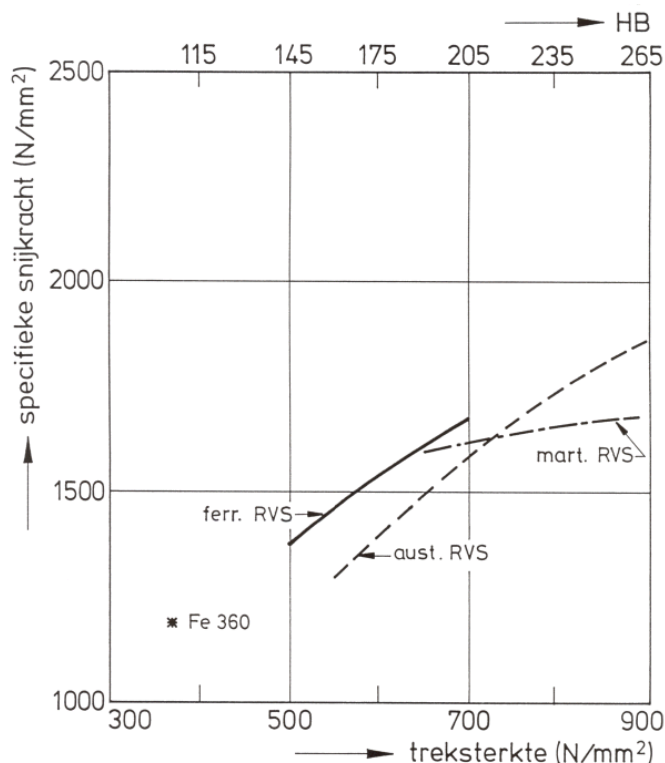
Bij draaiende bewerkingen geven twee grootheden een goede indruk van de verspanbaarheid:

- $V_{\max}$: dit is de maximaal toelaatbare draaisnelheid bij een voeding $s = 1$ mm/omwenteling en een snedediepte $a = 1$ mm;
- K_s -waarde; dit is de specifieke constante waarde voor de snijkracht in de betrekking: $F_h = K_s \cdot s \cdot a$, waarin F_h de hoofdsnijkracht is.

Uit figuur 7.1 blijkt hoe groot $V_{\max}$ is voor diverse materialen, afhankelijk van de treksterkte c.q. hardheid; figuur 7.2 geeft soortgelijke informatie voor de specifieke snijkracht.



figuur 7.1 Maximum toelaatbare snijsnelheid (P10 hardmetaal) bij de verspaning van ongelegeerd staal en roestvast staal



figuur 7.2 Specifieke snijkrachten bij de verspaning van ongelegeerd staal en roestvast staal

7.2.2 Koel- en smeermiddelen

Het doel van koel- en smeermiddelen is, de warmte die bij het verspaningsproces ontstaat zo goed mogelijk af te voeren en een zodanig smerende en lossende werking uit te oefenen, dat vreten wordt voorkomen. Bij het werken met snelstalen gereedschappen, zoals bij het draaien en schaven, maakt men gebruik van minerale oliën van speciale samenstelling. Slechte smering en koeling bij diverse verspaningstechnieken zorgen voor grote frictie en dus snelle en kostbare slijtage van de apparatuur en gereedschap. Problemen ten aanzien van koel- en smeermiddelen spitsen zich vooral toe op:

- Diverse middelen nodig voor verschillende verspaningsbewerkingen;
- slijtage van het gereedschap door onvoldoende werking van het snij/koelmiddel zorgt voor slecht en onnauwkeurig werk en dus voor productie-uitval;
- slechte koelvloeistoffen geven grote problemen: bacteriegroei, stankoverlast, verstoppingen in aanvoerleidingen en filters, kans op huidziekten, corrosievorming op werkstuk en machine;
- veel koelsmeermiddelen bevatten gezondheidsschadelijke stoffen zoals fenol en nitriet en tevens milieu belastende bestanddelen zoals zware metalen, PCB's, dioxinehoudende stoffen, enz.;
- diverse type oliën in het koelbad is niet wenselijk.

Bij zeer grote verspaningssnelheden is een efficiënte koeling vereist of maakt men gebruik van hardmetalen gereedschap (zoals bij frezen). Bij gebruik van hardmetalen gereedschappen mogen geen zwavelhoudende snijoliën worden toegepast. Voor dit doel worden in water oplosbare oliën of emulsies gebruikt, die een goed warmte-absorptievermogen bezitten en het gereedschap niet aantasten.

Verdere informatie betreffende het verspanen en koelmiddelen is te vinden op www.verspaning-online.nl.

7.2.3 Karakterisering van verschillende verspanende voorbewerkingen

Vijlen

Voor roestvast staal zijn speciale vijlen met grote hardheid

in de handel. Wanneer een vijl niet voldoende afneemt, bereiken we slechts dat het werkstukoppervlak wordt gedeformeerd.

Dit bemoeilijkt het verdere vijlen. Bij een teruggaande beweging mag de vijl om dezelfde reden niet te zwaar over het werkstuk glijden. Omdat roestvast staal taai is, moet de vijl grof zijn. Het vijlen van roestvast staal moet nooit worden uitgevoerd met gereedschap dat ook voor gewoon staal wordt gebruikt!

Knippen

Het knippen van roestvast staal vergt ongeveer de helft meer energie dan bij ongelegeerd staal het geval is. De messen van de schaar moeten scherp zijn, weinig speling vertonen en zoveel mogelijk lossend zijn geslepen. De knipranden van het werkstuk kunnen onregelmatigheden vertonen zoals bramen, splinters en zelfs kleine scheurtjes. Een nabewerking in de vorm van slijpen of vijlen is daarom meestal noodzakelijk.

Zagen

Voor het zagen van roestvast staal worden snel draaiende cirkel- of lintzagen gebruikt. Door de hoge omtreksnelheid neemt de temperatuur plaatselijk toe en zal een kouddeformatie niet optreden. Voor het zagen van dun materiaal met de hand gebruikt men scherpe zaagbladen met 32 tanden per inch. Voor dik materiaal kan een grovere vertanding worden toegepast. Men mag hierbij de zaag niet over het werkstuk laten glijden om koudversteving te voorkomen. Een constante aanzet is bovendien noodzakelijk.

Frezen

Het frezen kan het beste geschieden met een betrekkelijk lage snelheid. Het gereedschap moet zeer scherp zijn en er moet goed worden gekoeld. De machines moeten over voldoende capaciteit beschikken en vrij van speling zijn. De snede moet groot genoeg worden genomen om harding te voorkomen. De radiale snijhoek moet groter zijn dan bij ongelegeerd staal. Raadpleeg verder eventueel uw materiaalleverancier voor de juiste keuze van het gereedschap. Dit geldt trouwens ook voor de andere in dit hoofdstuk genoemde bewerkingen.

Draaien en schaven

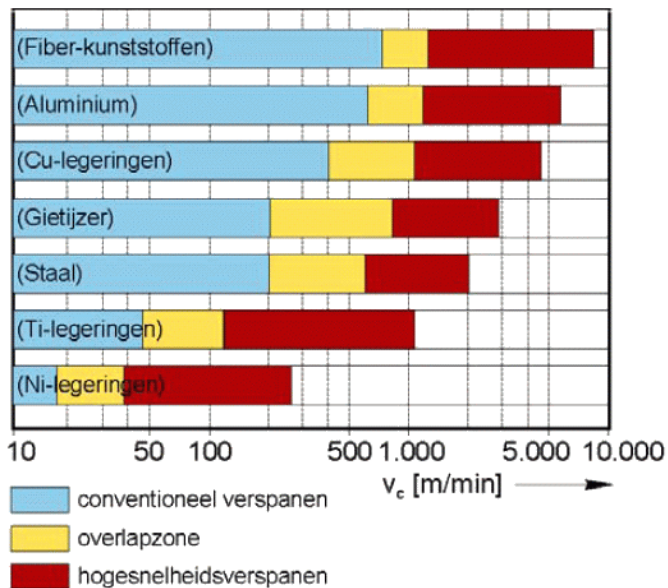
Deze bewerkingen vereisen gereedschapsmachines met voldoende capaciteit. Speling als gevolg van lagerslijtage mag niet voorkomen. Ook moet men met scherp geslepen beitels werken. De verspaningssnelheid moet lager liggen dan bij de verwerking van ongelegeerd staal. In verband met de grote taaiheid en de neiging tot versteving is een grote spaanhoek en een grote vrijloophoek gewenst. Door de grote warmteontwikkeling bij de beitelpunt is het raadzaam een zo groot mogelijke schachtdoorsnede te nemen en een goed koelmiddel te gebruiken. Tevens moet men bij austenitisch staal rekening houden met de grote uitzettingscoëfficiënt, waardoor vervormingen optreden; fijn nabewerken is dan meestal onvermijdelijk.

Hogesnelheidsverspanen (HSM)

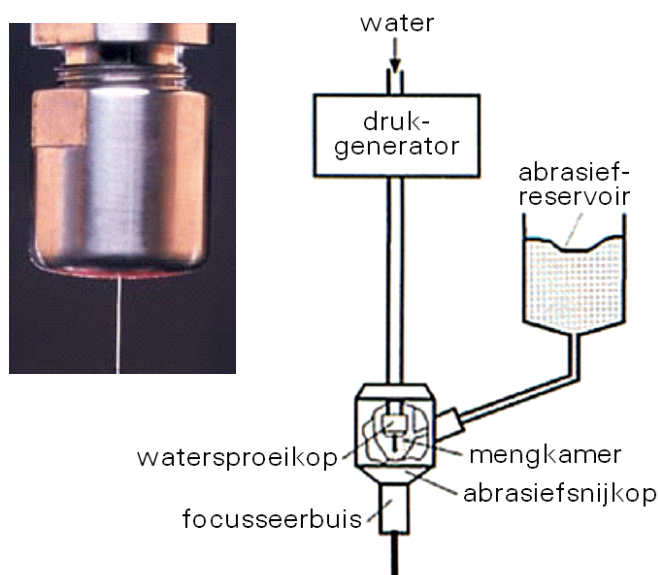
Hoewel niet gebruikelijk, is er in principe niets op tegen om de naadkanten aan te brengen door middel van hogesnelheidsverspanen. Er is geen eenduidige en exacte definitie van hogesnelheidsverspanen. De termen hogesnelheidsverspanen, HSM (High Speed Machining) of HSC (High Speed Cutting) worden vaak als modewoord te pas en te onpas gebruikt. Bij hogesnelheidsverspanen zijn de snij-snelheden dermate hoog, dat het werkstukmateriaal in de snijzone plastisch wordt. Hiervoor zijn zeer hoge snijsnelheden nodig. Figuur 7.3 maakt duidelijk, bij welke materiaal-soorten en bijbehorende snijsnelheden er sprake is van hogesnelheidsverspanen.

Waterstraalsnijden

Waterstraalsnijden kan voor vele materialen worden toegepast en dus ook voor roestvast staal. Bij het snijden van roestvast staal is het nodig om abrasief toe te voegen aan de waterstraal. Hoe kleiner de deeltjesgrootte van de abrasief is, des te beter zal de snedekwaliteit zijn. Figuur 7.4 geeft schematisch het principe van het waterstraalsnijden weer.



figuur 7.3 Snijnelheden voor het hogesnelheidsverspanen (HSM) van verschillende materialen [34]



figuur 7.4 Schematische weergave van het waterstraalsnijden met een voorbeeld van een snijmondstuk

Het abrasief bestaat uit minerale of keramische deeltjes. De hardheid hiervan varieert tussen redelijk hard en zeer hard. De deeltjes, vaak olivin, granaat of korund, zijn scherp en hebben een diameter in het gebied tussen 0,1 en 0,8 mm. De diameter van de gebruikte abrasief deeltjes moet altijd significant kleiner zijn dan de diameter van de focusseerbuis, om ongehinderd doorstromen van het abrasief te garanderen.

Het waterstraalsnijden van roestvast staal heeft enkele belangrijke voordelen:

- ▶ Geen thermische beïnvloeding van het snedevlak;
- ▶ de verkregen snede is bijna altijd braamvrij;
- ▶ waterstraalsnijden maakt het snijden van complexe contouren relatief eenvoudig;
- ▶ een grote range aan plaatdiktes (0,1 tot 100 mm) kan worden gesneden;
- ▶ door de vaste snijkop is er geen omsteltijd nodig;
- ▶ het gelijktijdig gebruiken van meerdere snijkoppen werkt tijd- en kostenbesparend.

Enkele belangrijke beperkingen van het waterstraalsnijden zijn:

- ▶ Het is een relatief traag proces, vooral bij grotere metaaldikten;
- ▶ het is een luidruchtig proces.

Roestvast staal kan tot grote dikten door middel van waterstraalsnijden worden verwerkt, de snijnsnelheid is dan echter weinig economisch (zie tabel 7.1). Het waterstraalsnijden van grotere materiaaldikten wordt om deze reden zelden toegepast voor het aanbrengen van naadkanten in roestvast staal; het plasmasnijden is dan meestal een economischer proces.

tabel 7.1 Indicatie van de snijnsnelheid bij het waterstraalsnijden van roestvast staal

materiaaldikte [mm]	snijnsnelheid [cm/min]
10	23
40	5
100	1,5

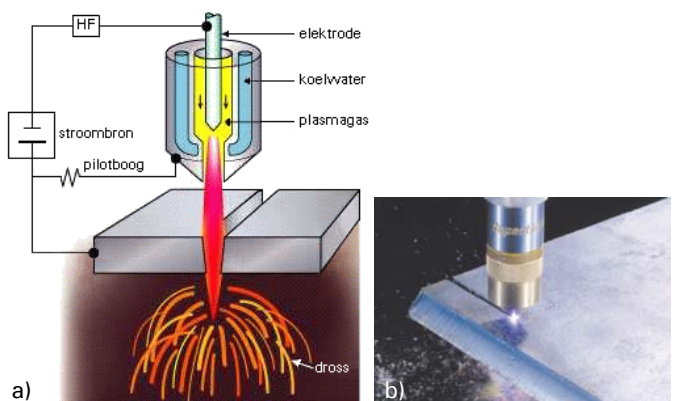
7.3 Thermisch voorbereiden

7.3.1 Algemeen

Het is niet mogelijk om roestvast staal op de gebruikelijke wijze autogeen te snijden. Er vormt zich chroomoxide, een verbinding met een zeer hoog smeltpunt, waardoor de snede verstopt raakt. Door toevoegen van ijzerpoeder is het autogeen snijden van roestvast staal mogelijk. Dit zogeheten poedersnijden wordt echter niet meer toegepast in Nederland. Het gutsen van roestvast staal met een koolboog-elektrode is technisch wel mogelijk, maar is altijd af te raden en moet beperkt blijven tot noodgevallen. Flink naslijpen is namelijk noodzakelijk om opgenomen koper en koolstof weg te slijpen. Aantrekkelijke thermische methoden zijn het plasmasnijden en het lasersnijden.

7.3.2 Plasmasnijden

Het plasmasnijden is een thermisch snijproces, waarbij een boog wordt getrokken tussen een niet-afsmeltende elektrode en het te snijden materiaal. Teneinde de hoofdboog (overgedragen boog) beter te kunnen ontsteken, wordt er gebruik gemaakt van een zogenaamde hulpboog of pilotboog. Het principe van het plasmasnijden is te zien in figuur 7.5.



figuur 7.5 Principe van het plasmasnijden [20] (a) en de werkelijke uitvoering (b)

Kenmerkend voor het plasmasnijden is de zeer hoge temperatuur die in een smal gebied wordt bereikt als gevolg van de hoge energiedichtheid van de boog. Dit heeft niet alleen een hoge snijnsnelheid tot gevolg, maar hierdoor is ook de thermische beïnvloeding relatief klein. Het voordeel

daarvan is een geringe vervorming. Het proces is een bij uitstek geschikte methode om roestvast staal snel en efficiënt te snijden.

De smalle, geconcentreerde plasmabundel komt met hoge snelheid uit het snijmondstuk; de temperatuur bedraagt ruim 20.000 °C. Hierdoor wordt het materiaal in een zeer smalle zone tot smelten gebracht en weg gestuwd. Er ontstaat een smalle snede. Kenmerkend voor het plasmasnijden is dat er één rechte snede en één schuine snede (5 - 10°) wordt verkregen. Het is dus zaak ervoor te zorgen dat de schuine snijkant zich aan de kant bevindt die niet gebruikt wordt. Hoewel ingewikkelde contouren geen problemen opleveren en plasmagesneden naden meestal geen nabewerking vragen, kan een afwijking van enkele graden optreden, die bij kritische I-naden mogelijk extra slijpkosten met zich meebrengt. Aan plasmasnijden zitten ook nogal wat veiligheidsaspecten; zie hiervoor hoofdstuk 15.

De te snijden materiaaldikte is afhankelijk van het plasmagas en het vermogen van de installatie. Voor dunne roestvaste staalplaat kan stikstof als plasmagas worden gebruikt. Door het hoge warmtegeleidingsvermogen van stikstof wordt de booghitte snel overgedragen op het te snijden materiaal, waardoor de snijsnelheid kan worden opgevoerd. Tabel 7.2 geeft een indicatie van de te snijden materiaaldikten bij roestvast staal (uitgaande van een installatie met een stroomsterkte van 200 A). Daarnaast kunnen ook stikstof-argonmengsels worden toegepast. Het mengsel van argon en waterstof in een verhouding van resp. 4 op 1, wordt voor het snijden van roestvast staal het meest gebruikt.

tabel 7.2 Indicatie plasma te snijden materiaaldikten in roestvast staal en te gebruiken snijgassen

materiaaldikte	type plasmagas
[mm]	
2 - 20	N ₂
2 - 30	N ₂ + H ₂
8 - 70	Ar + H ₂

Het plasma-zuurstof snijden en het plasma-(pers)lucht snijden kunnen beter niet gebruikt worden voor het aanbrengen van naadkanten in roestvast staal. Dit komt, omdat bij zowel het plasmasnijden met zuurstof als bij het plasmasnijden met perslucht een sterke oxidatie van de snijkanten optreedt. Als deze varianten worden toegepast voor het aanbrengen van naadkanten, dan moeten de naadkanten altijd mechanisch worden nabewerkt. Zowel het plasma-zuurstof als het plasma-perslucht snijden worden veelal ingezet voor het scheiden van ongelegeerd staal. Er zijn in de loop der jaren vele varianten van het plasmasnijden ontwikkeld met elk hun specifieke voor- en nadelen waaronder:

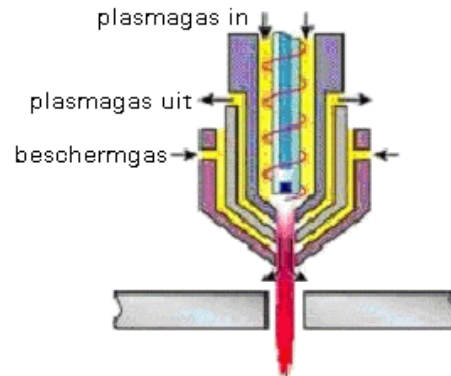
- ▶ Plasmasnijden met een enkele gasstroom;
- ▶ het plasma(pers)luchtsnijden;
- ▶ plasmasnijden met een secundaire gasstroom;
- ▶ plasmasnijden met waterinjectie;
- ▶ plasmasnijden met een waterscherm/-douche;
- ▶ fijnstraal plasmasnijden.

Een aantal van deze varianten kan worden gebruikt voor het onderwatersnijden, waardoor schadelijke gassen direct worden afgevoerd. Een nadeel hiervan is echter dat het vermogen afneemt en er dus met lagere maximum snijsnelheden moet worden gesneden.

Voor een uitgebreide beschrijving van deze varianten wordt verwezen naar het Tech-Info-Blad "TI.04.20 - Scheidings-technieken voor dunne plaat en buis", een interessante variant willen we echter apart noemen: het fijnstraal plasmasnijden.

Het fijnstraal plasmasnijden maakt gebruik van een zeer sterk ingesnoerde plasmaboog. De sterke booginsnoering zorgt voor een energiedichtheid die nog groter is ten opzichte van het conventionele plasmasnijden. Deze sterke

booginsnoering wordt verkregen door het boogplasma geforceerd te laten roteren. Bovendien wordt kort voordat de plasmaboog uittreedt, nog een tweede gasstroom in het mondstuk geïnjecteerd (zie figuur 7.6).



figuur 7.6 Schematische weergave van het fijnstraal plasmasnijden (high definition plasma cutting)

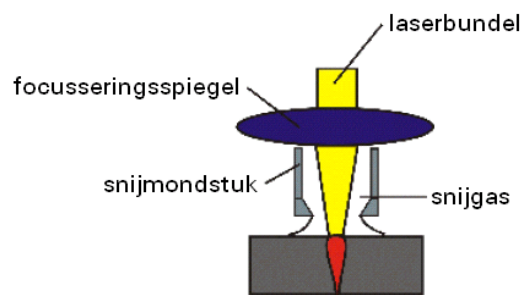
Bij sommige systemen wordt soms nog een magneetveld om de plasmaboog aangebracht, waardoor de boog extra wordt gestabiliseerd en het roteren van de gasstroom beter in stand kan worden gehouden. Het resultaat is een snede van een kwaliteitsniveau die het lasersnijden dicht benadert en waarbij de kosten ongeveer een kwart lager liggen dan die van lasersnijden. Voordelen van het fijnstraal plasmasnijden zijn:

- ▶ De snedekwaliteit ligt tussen die van het conventionele plasmasnijden en het lasersnijden;
- ▶ er ontstaat steeds een zeer smalle snede;
- ▶ minder vervorming van het werkstuk, doordat de warmte beïnvloede zone veel kleiner is;
- ▶ er worden twee rechte snijkanten verkregen.

Een beperking is, dat de apparatuur aanzienlijk duurder is dan traditionele plasmasnijapparatuur.

7.3.3 Lasersnijden

De ontwikkelingen op het gebied van het lasersnijden hebben de achterliggende jaren een enorme vlucht genomen. Door de ontwikkeling van de laser werd de mogelijkheid gecreëerd vooral dunne plaat met een thermisch proces efficiënt en nauwkeurig te snijden. Het principe van het lasersnijden wordt weergegeven in figuur 7.7.



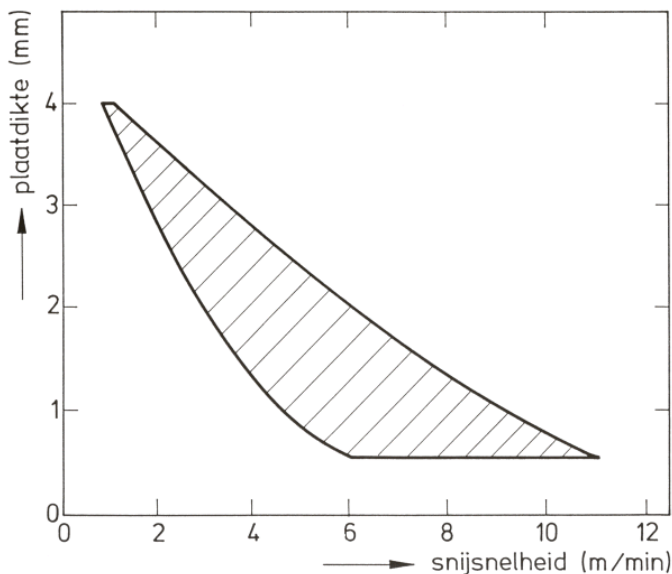
figuur 7.7 Principe van het lasersnijden

Het lasersnijden is een precisieproces dat een zeer goede snedekwaliteit geeft en zich bij uitstek leent voor geautomatiseerde toepassingen. Onderdelen die met een laser zijn gesneden, kunnen doorgaans zonder enige vorm van nabewerking verder worden gebruikt.

De belangrijkste lasers voor het snijden zijn de CO₂-laser en de Nd:YAG-laser; lasers met elk hun eigen kenmerken en toepassingsgebieden. Soms overlappen de toepassingsgebieden elkaar echter gedeeltelijk. De laserbundel kan, afhankelijk van het type laser, worden getransporteerd met behulp van spiegels (CO₂-laser) of een fiber (Nd:YAG-laser).

Lasersnijden kan economisch aantrekkelijk zijn, is milieuvriendelijk en heeft een lage warmte-inbreng. De te snijden plaatdikte is afhankelijk van het ter beschikking staande vermogen. Hoewel bij voldoende vermogen van de laser plaatdikten tot 20 mm in roestvast staal te snijden zijn, is de snij snelheid bij deze grote materiaaldikten laag en zijn de investeringskosten hoog. De economische inzetbaarheid bij het snijden van de laser ligt vooral op het gebied van de relatief dunne materialen (< 6 mm). Naarmate de materiaaldikte kleiner wordt, kan met lagere vermogens (en dus goedkopere lasers) en met hoge snij snelheden worden gewerkt, waardoor het rendement op het geïnvesteerde vermogen (ROI) gunstig is.

Figuur 7.8 toont het werkgebied voor het snijden van verschillende materiaaldikten met een betrekkelijk laag laser vermogen (voor de metaalbewerking) van 1 kW.



figuur 7.6 Lasersnijden van type 1.4401 (AISI 316) roestvast staal bij 1000 W vermogen

Bij het lasersnijden wordt gebruikgemaakt van een coaxiaal aan de laserbundel toe te voeren snijgas, dat het gesmolten materiaal uit de snijvoeg blaast. Het meest effectief is zuurstof, maar dan moet rekening worden gehouden met het oxideren van de snijkant. Voor het snijden van grotere materiaaldikten (> 2 mm) wordt voornamelijk de CO₂-laser toegepast. Voor nauwkeurige bewerkingen in dun roestvast staal (< 1 mm) wordt echter meestal een Nd:YAG-laser gebruikt.

De kwaliteit van de gefocusseerde laserbundel bepaalt, samen met het vermogen, de materiaaldikte die kan worden gesneden in relatie tot de snij snelheid. De betere nauwkeurigheid, haaksheid van de snede en geringere warmte-inbreng maken, dat het plasmasnijden vaak door lasersnijden wordt vervangen.

Lasersnijden kan op drie manieren worden uitgevoerd met elk hun specifieke voor- en nadelen:

- ▶ Sublimatiesnijden;
- ▶ smeltsnijden met een niet-actief gas;
- ▶ brandsnijden met een actief gas (brandsnijden).

Het sublimatiesnijden en smeltsnijden wordt voor het snijden van roestvast staal niet gebruikt.

Het snijden van roestvast staal wordt vrijwel altijd uitgevoerd met een actief gas. Het smeltsnijden in combinatie met het gebruik van een actief gas (meestal zuurstof 99,950% of hoger), wordt het laserbrandsnijden genoemd. Deze techniek wordt zowel bij het laser- als het autogeen (brand)snijden gebruikt.

Het materiaal wordt door de laser tot boven de ontstekings-temperatuur verhit, waarna er een exotherme reactie met zuurstof optreedt (verbranding). De hierbij vrijkomende

energie kan een veelvoud zijn van de door de laserbundel ingebrachte energie, wat resulteert in snij snelheden die een factor 2 à 3 hoger liggen dan bij het snijden met een niet-actief gas. Het gesmolten metaal en de metaaldampen worden meegevoerd met de snijgasstroom. Een deel van de oxidatieproducten zet zich echter vast op de snijkant. Het brandsnijden wordt vrijwel alleen maar toegepast voor het snijden van ongelegeerd en laaggelegeerd staal.

Het smelten en uitdrijven met een niet-reactief gas wordt ook wel lasersmeltsnijden genoemd. Meestal wordt stikstof (N₂, zuiverheid 3.0 tot 5.0) gebruikt om de smelt uit de snede te blazen. Argon wordt gebruikt om een eventueel plasma te onderdrukken. Door het gebruik van niet-reactief gas blijft de snede oxidevrij en, bij hoge gassnelheden, braamvrij. Hierbij worden gasdrukken van 0,8 tot 1 MPa toegepast voor het snijden van metalen tot circa 6 mm. Voor dikkere materialen zijn gasdrukken van circa 1,5 tot 2 MPa nodig. De snij snelheid is afhankelijk van het materiaal, de materiaaldikte en het beschikbare laser vermogen. In vergelijking met sublimatiesnijden is smeltsnijden sneller, maar zijn de ruwheid van de snijkant en de warmte beïnvloede zone groter. Roestvast staal wordt meestal op deze manier gesneden met behulp van stikstof snijgas.

De CO₂-laser voor het snijden van roestvast staal

Het actieve medium bij de CO₂-laser is koolzuurgas wat de naam aan dit type laser geeft. Dit maakt dat de CO₂-laser valt in de categorie van de gaslasers. De CO₂-laser genereert een bundel elektromagnetische straling met een golflengte van 10,6 µm (=infrarood), die via een lens in de snijkop op het werkstuk wordt gefocusseerd. De hoge energiedichtheid van de gefocusseerde straal levert de benodigde warmte op om het te snijden materiaal op de ontstekings-temperatuur, smelttemperatuur of verdampingstemperatuur te brengen. De laserbundel kan door middel van spiegels naar het werkstuk worden getransporteerd. In veel gevallen wordt de CO₂-laser gekoppeld aan CNC gestuurde bewegingsapparatuur. Het is mogelijk met dit soort apparatuur in 2D en soms, beperkt 3 D materialen te snijden. Via een speciale buizenconstructie is het mogelijk de CO₂-laser te koppelen aan een robot. Dit blijft echter een veelal dure en kwetsbare oplossing. Met de CO₂-laser kan uitstekend roestvast staal worden gesneden.

CO₂-laser zijn commercieel verkrijgbaar voor de materiaalbewerking tot vermogens van 20 kW. Hiermee is het mogelijk roestvast staal tot circa 20 mm dikte te snijden. De snedekwaliteit is over het algemeen goed, zoals wordt aangegeven in tabel 7.3.

tabel 7.3 Overzicht van de haalbare ruwheid van de snede bij dunne plaat voor roestvast staal (4 kW CO₂-laser)

plaatdikte	ruwheid (Rz)
[mm]	[µm]
1	6
2	10
3	10

De Nd:YAG-laser voor het snijden van roestvast staal

De Nd:YAG-laser is een zogenaamde 'vaste stof' laser. De Nd:YAG-laser werkt met een golflengte van 1,06 µm (dus 10 keer zo kort als die van de CO₂-laser). Om de laserbundel op te wekken, worden speciale lampen dan wel dioden gebruikt; er wordt dan over diodegepompte of lampengepompte lasers gesproken. De bundelkwaliteit van een diodegepompte Nd:YAG-laser is beter dan van een lampengepompte Nd:YAG-laser. Bovendien hebben diodes een langere standtijd (circa 10.000 uur) dan lampen (circa 1.000 uur). Diodes zijn echter duurder dan lampen. Nd:YAG-lasers kunnen werken met een continu vermogen, of met een pulserend vermogen.

Het snijden met een pulserend vermogen biedt vooral voordelen bij het lasersnijden van scherpe contouren. In plaats

van het vermogen en de snelheid te regelen bij scherpe contourovergangen (hoeken $\leq 90^\circ$), kan men overgaan op het pulsen van het vermogen. De voordelen van Nd:YAG-lasers ten opzichte van CO₂-lasers zijn o.a. dat het Nd:YAG-laserlicht wel door een glasfiber kan worden getransporteerd en dat het beter wordt geabsorbeerd door metalen. Doordat de bundel van de Nd:YAG-laser beter wordt geabsorbeerd door metalen, is de efficiency van de Nd:YAG-laser groter dan die van de CO₂-laser. Dit houdt in, dat een 3 kW Nd:YAG-laser niet rechtstreeks kan worden vergeleken met een 3 kW CO₂-laser. Inmiddels zijn Nd:YAG-lasers beschikbaar in vermogens tot ruim 6 kW. De korte golflengte ten opzichte van de CO₂-laser maken dat de snede bij een Nd:YAG-laser smaller en van een betere kwaliteit is. Roestvast staal kan uitstekend worden gesneden met een Nd:YAG-laser.

Tabel 7.4 geeft een overzicht van de spleetbreedte als functie van de plaatdikte en voor het snijden van roestvast staal.

tabel 7.4 Overzicht van de spleetbreedte als functie van de plaatdikte voor het snijden van roestvast staal

materiaaldikte [mm]	spleetbreedte [mm]		
	plasma-snijden (fijnstraal plasma-snijden)	CO ₂ -laser	Nd:YAG-laser
1-3	0,6 - (0,4)	0,2	0,05
4-6	0,7 - (0,5)	0,3	0,1 - 0,2

Hoofdstuk 8

Kenmerkende gegevens en het lassen van nieuwere typen roest- en hittevast staal

8.1 Inleiding

Hoewel de standaardkwaliteiten roestvast staal misschien wel 90% van het gebruik uitmaken, zijn er toch vaak redenen om te kiezen voor meer bijzondere kwaliteiten. Meestal zijn het extreme of zeer specifieke bedrijfsomstandigheden die de toepassing van hoger of speciaal gelegeerde typen eisen. Het kan ook zijn dat deze bijzondere typen roest- en hittevast staal als een goedkopere vervanger voor bijvoorbeeld koperlegeringen of titaan kunnen fungeren. Er kunnen echter ook fabricagetechnische en economische factoren een rol spelen, zoals bij de toepassing van geplateerd staal, duplex roestvast staal en volaustenitisch roestvast staal.

Er zal in dit hoofdstuk een aantal roestvaste staalsoorten worden besproken die de afgelopen jaren zijn ontwikkeld of die sterk in de belangstelling zijn komen te staan. Door

het speciale karakter van deze materialen vereist de primaire fabricage van de halffabrikaten in de staalfabriek al speciale aandacht. Voor toepassing in constructies is een goed overleg tussen constructeur en materiaalleverancier nodig om tot optimale resultaten te komen. De hogere aanschafprijs van het materiaal en de hogere verwerkingskosten wegen vaak op tegen een langere levensduur van de constructie. Ondeskundige verwerking kan dit voordeel echter weer teniet doen.

Een aantal van de nieuwere roestvaste staalkwaliteiten is opgenomen in tabel 8.1 en wordt hierna besproken. De vernieuwingen op het gebied van roestvast staal betreffen:

- ▶ Leverbare kwaliteiten en meer op de toepassing gerichte samenstellingen;
- ▶ verhoging van de sterkte;
- ▶ plaatmaterialen met specifieke oppervlakte-eigenschappen (decoratie, reinigend vermogen);
- ▶ producten die via de productieroute uitstekende mechanische eigenschappen hebben;
- ▶ ontwerpgerichte leverbaarheid van speciale halfproducten waarmee verregaande integratie van staalkwaliteit, halfproduct (vorm en eigenschappen) en ontwerp mogelijk wordt.

tabel 8.1 Overzicht van nieuwere roestvaste staalkwaliteiten (gemiddelde samenstelling op ijzerbasis in gew.%, zie NEN-EN 10088 voor exacte samenstellingsgrenzen)

NEN-EN 10088	USA	C	Cr	Ni	Mo	N	Overig	PRE ¹⁾
ferritisch								
1.4512	AISI 409	0,03	11,5	–	–	–	Ti	11,5
1.4510	AISI 430Ti	0,04	18,0	–	–	–	Ti	18,0
1.4521	AISI 444	0,02	17,8	–	2,1	0,02	Ti	20,2
martensitisch								
1.4021	AISI 420	0,2	13,0	–	–	0,02	–	13,3
1.4028	AISI 420	0,3	12,5	–	–	0,02	–	12,8
1.4313	UNS S41500	0,04	13,0	4,0	0,5	–	–	14,7
1.4405	–	≤ 0,06	16,0	5,0	1,0	–	–	18,0
1.4568	AISI 631	0,09	17,0	7,0	–	–	–	17,0
1.4422	–	≤ 0,02	11,0-13,0	4,0-5,0	1,3-1,8	≤ 0,02	Cu: 0,2-0,8 N ≤ 0,02	19,2
1.4423	–	≤ 0,02	11,0-13,0	6,0-7,0	2,3-2,8	≤ 0,02	Cu: 0,2-0,8 N ≤ 0,020	19,2
austenitisch								
1.4310	AISI 301	0,1	17,0	7,0	–	0,03	–	17,5
1.4318	AISI 301LN	0,02	17,0	7,0	–	0,15	–	19,4
1.4372	AISI 201	0,05	17,0	5,0	–	0,15	Mn 6,5	19,4
1.4307	AISI 304L	0,02	18,0	8,5	–	0,06	–	19,0
1.4311	AISI 304 LN	0,02	18,0	9,0	–	0,14	–	20,2
1.4303	AISI 305	0,02	18,0	11,0	–	0,02	–	18,3
1.4432	AISI 316L	≤ 0,02	17,0	11,0	3,0	0,05	–	27,7
1.4436	AISI 316L	≤ 0,02	17,0	11,0	3,0	0,05	–	27,7
1.4435	AISI 316L	≤ 0,02	17,0	12,6	3,0	0,06	–	27,9
1.4406	AISI 316LN	≤ 0,03	17,0	12,0	2,2	0,13	–	26,4
1.4439	AISI 317LMN	≤ 0,03	17,5	13,5	4,5	0,17	–	35,1
1.4539	AISI 904L	≤ 0,02	20,0	25,0	4,5	0,07	Cu	36,0
1.4565	UNS S34565	≤ 0,03	24,0	17,0	4,3	0,3-0,6	–	46,2
1.4547	UNS S32154	≤ 0,02	20,0	18,0	6,5	0,21	Cu	44,8
1.4529	UNS N08926	≤ 0,02	20,0	25,0	6,5	0,20	Cu	44,7
1.4652	UNS S32654	≤ 0,02	24,0	22,0	7,3	0,50	Mn, Cu	56,1
1.4948	AISI 304H	0,05	18,1	8,3	–	0,06	–	(19,1)
1.4818	UNS S30415	0,05	18,5	9,5	–	0,15	Si, Ce	(20,9)
1.4833	AISI 309S	0,06	22,3	12,6	–	0,08	–	(23,6)
1.4835	UNS S30815	0,09	21,0	11,0	–	0,17	Si, Ce	(23,7)
1.4841	AISI 314/310	0,2	25,0	20,5	–	–	Si 2,0	(25,0)
1.4845	AISI 310S	≤ 0,05	25,0	20,0	–	0,04	–	(25,6)
1.4854	UNS S35315	0,05	25,0	35,0	–	0,17	Si, Ce	(27,7)
duplex								
1.4162	S32101	≤ 0,04	22,0	1,35-1,70	0,1-0,8	0,20-0,25	Mn 4,0-6,0	28,7
1.4362	UNS S32304	≤ 0,02	23,0	4,0	–	0,10	–	24,6
1.4410	UNS S32750	0,02	25,0	7,0	4,0	0,27	–	42,5

1) PRE tussen haakjes is minder relevant, staal is primair voor hoge temperaturen

8.2 Ferritische roestvaste staalsoorten

Uitgaande van het standaardtype zijn er de laatste jaren diverse nieuwe ferritische roestvaste staalsoorten op de markt gekomen. Een aantal daarvan is, samen met het referentiemateriaal type 1.4016 (AISI 430), opgenomen in tabel 8.2.

- 1.4512 (AISI 409) combineert sterkte met een redelijke weerstand tegen corrosie in atmosferische en waterige omstandigheden. Het staal heeft dank zij het lage koolstofgehalte en de titaantoevoeging ook in gelaste vorm een goede corrosieweerstand.
- 1.4510 (AISI 430Ti) vormt een alternatief met een hogere weerstand tegen corrosie.
- 1.4521 (AISI 444) heeft naast een hogere sterkte ook een hogere weerstand tegen corrosie.

Voor de verschillende soorten geldt dat dunne plaat en strip leverbaar is in diverse oppervlaktecondities, waaronder ook met een speciaal mat of geborsteld oppervlak voor decoratieve toepassingen.

8.3 Superferrieten

Superferrieten zijn ferritische staalsoorten met een zeer laag gehalte aan verontreinigingen, meestal lager dan 0,01%. Men gebruikt daarom ook wel de aanduiding ELI (=extra low interstitial). Twee vertegenwoordigers van de superferrieten zijn de kwaliteiten 1.4521 (18Cr-2Mo-Ti) en 1.4592 (29Cr-4Mo). Te noemen is ook nog het in Duitsland ontwikkelde type: 1.4575 (28Cr-2Mo-4Ni-Nb). Toepassingen worden gevonden in waterkrachtcentrales.

De meeste superferrieten hebben ten opzichte van de conventionele ferritische staalsoorten een betere (kerfslag)taaiheid. Toepassingen liggen op het gebied van warmtewisselaars voor chloridehoudend koelwater en installaties voor de mijnbouw en de chemische apparatenbouw. Kwaliteit 1.4575 is van de hoog chroomhoudende soorten de enige superferriet die in wanddikten tot 15 mm wordt gefabriceerd; andere superferrieten alleen in kleinere dikten.

Voordat men met het lassen van superferrieten begint, moeten alle oppervlakken zorgvuldig worden schoongemaakt. Door het lage gehalte aan interstitiële elementen, zijn deze typen erg gevoelig voor opkoling. Er is echter ook kans op opname van waterstof, die brosheid in de warmte beïnvloede zone kan veroorzaken.

Verder moet men er aan denken dat bij het lassen van superferrieten korrelgroei in de warmte beïnvloede zone kan optreden. Licht voor het basismateriaal de kerfslagwaarde bij 20 °C meestal boven 100 J, voor de WBZ kan vaak nog maar een waarde van 30 J worden gegarandeerd. Als toevoegmaterialen kunnen materialen met dezelfde samenstelling als het basismateriaal of austenitische materialen worden gebruikt; austenitisch toevoegmateriaal wordt het meest toegepast.

Een eis voor het austenitische toevoegmateriaal is, dat het C-gehalte lager dan 0,03% moet zijn. Een toevoegmateriaal zoals 23 12 2 L (AISI 309LMO) geeft tot een bepaalde dikte een ductiel lasmetaal. Voor de hoger gelegeerde superferrieten is uit oogpunt van corrosie de keuze van een

Ni-basis-lastoevoegmateriaal, zoals 1.4539 (904L) gewenst. De meest geschikte lasprocessen zijn degenen die met een lage warmte-inbreng werken en waarbij dunne lasrupen kunnen worden gelegd. Aangezien 475 °C-brosheid in lasverbindingen moet worden vermeden, wordt de bedrijfstemperatuur van gelaste componenten in superferritisch staal beperkt tot 280 °C.

8.4 Martensitische roestvaste staalsoorten

De in tabel 8.1 genoemde martensitische kwaliteiten 1.4021 en 1.4028 (beiden AISI 420) zijn over het algemeen in dikkere plaat of strip leverbaar, en worden gekozen vanwege de uitstekende mechanische eigenschappen. Deze staalsoorten kunnen in zacht gegloeide vorm worden geleverd of gehard, zowel als strip, als op de rol.

We spreken bij deze typen ook wel over precipitatiehardend roestvast staal. Een vertegenwoordiger van dit type is het bekende 17/4 PH staal. Dit type heeft naast 17% chroom en 4% nikkel, toevoegingen van enkele procenten koper (3 tot 5%) en circa 0,35% Nb. Het lage koolstofgehalte zorgt ervoor dat de hardheden beneden de circa 300 HB blijft, zodat het staal goed te bewerken is. Indien het staal vervolgens wordt verhit op 450 - 500 °C, dan treedt uitscheidingsharding op en krijgt het materiaal zijn uiteindelijke sterkte (rekgrens 1400 N/mm²).

Hiernaast kennen we ook semi martensitisch hardend roestvast staal met als belangrijkste vertegenwoordiger de in tabel 8.1 genoemde kwaliteit 1.4568 (AISI 631), ook bekend als 17-7 PH. Dit staal bevat naast 17% chroom en 7% nikkel ook aluminium. Ook dit staal verkrijgt door middel van uitscheidingsharding specifieke structuren die afhankelijk zijn van de gevolgde warmtebehandeling. Hierdoor kan het staal een hoge hardheid verkrijgen in combinatie met een goede weerstand tegen schokken en corrosie. Afhankelijk van de warmtebehandeling is het materiaal of martensitisch of austenitisch. Een voordeel hiervan is, dat het staal in de zachtgegloeide toestand gevormd kan worden, om vervolgens door middel van een warmtebehandeling gehard te worden. Het materiaal is bij de warmtebehandeling stabiel en blijft maatvast. Deze staalsoort kan zowel in strip als op de rol worden geleverd, en wordt vaak gebruikt voor veren, ringen, scharen, enz. Het materiaal kan tot ca. 350 °C worden gebruikt.

Met name voor de olie- en gasindustrie zijn nieuwe typen goed lasbare supermartensitische roestvaste staalsoorten beschikbaar gekomen, zoals de 1.4313 (S41500), 1.4422 en 1.4423.

8.5 Austenitische roestvaste staalsoorten

De hierna volgende austenitische roestvaste staalsoorten kunnen worden gebruikt voor temperaturen tot ca. 350 °C. Uitgaande van het 1.4301 (AISI 304) type zijn er qua prijs en sterkte aantrekkelijke Cr-Ni-houdende alternatieven voor specifieke toepassingen. Een aantal daarvan is, samen met het referentiemateriaal type 1.4301 (AISI 304), opgenomen in tabel 8.3:

► 1.4310 (AISI 301)

een sterk alternatief bij minder zware eisen ten aanzien van de corrosieweerstand;

tabel 8.2 Enkele kenmerken van nieuwere ferritische en martensitische roestvaste staalsoorten (in principe zijn minimale sterkte-waarden opgenomen, 1 N/mm² = 1 MPa)

NEN-EN 10088	0,2% rekgrens	treksterkte	product	toepassingen
	[N/mm ²]	[N/mm ²]		
(1.4016)	(260) ¹⁾	(450)	dunne plaat, strip	huishouding, bestek, bumpers, wioldoppen, decoratief, branders
1.4405	540 ¹⁾	900		
1.4512	220 ¹⁾	380		huishouding, warmtewisselaars, automobiel (uitlaat), landbouw
1.4510	240 ¹⁾	420		
1.4521	300 ¹⁾	400		
1.4313	600	820	dik	olie- en gasindustrie

1) Minimum waarden voor warmgewalst materiaal; in de koudgewalste conditie zijn de rekgrenzen ca. 10 tot 40% hoger.

- ▶ **1.4318 (AISI 301LN)**
alternatief met hogere sterkte voor minder zware eisen ten aanzien van corrosieweerstand;
- ▶ **1.4372 (AISI 201)** ook **16-7 Mn staal**
goedkoop en sterk alternatief voor voertuigconstructies;
- ▶ **1.4307 (AISI 304L)**
alternatief voor 1.4306, minder chroom en nikkel, betere corrosiebestendigheid na het lassen;
- ▶ **1.4311 (AISI 304LN)**
een alternatief voor AISI 304 met hogere sterkte;
- ▶ **1.4303 (AISI 305)**
verhoogd nikkelgehalte, goede vervormbaarheid (dieptrekken) en corrosieweerstand.

tabel 8.3 Enkele kenmerken van nieuwere soorten warmgewalst austenitisch roestvast staal

NEN-EN 10088	0,2% rekgrens [N/mm ²] ¹⁾	treksterkte [N/mm ²] ¹⁾	toepassingen
(1.4301)	(210)	(520)	huishouding, voeding, transport, enz.
1.4310	250	600	huishouding, voeding, transport, enz.
1.4318	350	650	voertuigen, constructies
1.4372	350	750	voertuigen, constructies
1.4307	200	500	voeding, chemie, tankers
1.4311	270	550	voeding, chemie, cryogene techniek
1.4303	220	500	dieptrekken, apparaten, automobiel
1.4406	280	580	chemie, offschore, voeding, enz.
1.4432	220	520	chemie, offschore, voeding, farmacie
1.4436	220	530	chemie, offschore, voeding, farmacie
1.4435	220	520	chemie, offschore, voeding, farmacie
1.4439	270	580	chemie, offschore, voeding, farmacie
1.4539	220	520	chemie, afgassen, zwavelzuur
1.4565	420	650	chemie, gassen, zeewater, zwembad
1.4547	300	650	chemie, gassen, zeewater, zwembad
1.4529	320	650	chemie, gassen, zeewater, zwembad
1.4652	430	750	chemie, rookkanalen, zeewater
1) Minimum waarden voor warmgewalst materiaal. De minimaal te bereiken rekpercentages (A5) zijn 50% of hoger.			

Uitgaande van het EN 1.4401 type (AISI 316) zijn er eveneens chroom-nikkel-molybdeen-houdende varianten voor specifieke toepassingen en/of lagere kosten beschikbaar, bijvoorbeeld:

- ▶ **1.4406 (AISI 316LN)**
een alternatief met hogere sterkte en minder gevoelig voor spanningscorrosie na het lassen;
- ▶ **1.4432 en 1.4436 (beiden AISI 316L)**
alternatieven, iets hoger Mo- en N-gehalte, hogere sterkte en corrosieweerstand en minder gevoelig voor spanningscorrosie na het lassen;
- ▶ **1.4435 (AISI 316L)**
alternatief met 2,5-3% Mo en een iets hoger Ni- en N-gehalte voor hogere sterkte en betere corrosieweerstand; o.a. voor farmaceutische toepassing, lassen met laag ferrietgehalte;
- ▶ **1.4439 (AISI 316LMN)**
een alternatief met beduidend hogere corrosieweerstand en sterkte.

8.6 Superaustenitische roestvaste staalsoorten voor temperaturen tot ca. 350 °C

Deze soorten hebben ook na het lassen een vrijwel volledig austenitische structuur. Kenmerk is de zeer hoge corrosieweerstand en de hogere sterkte. De vervormbaarheid is goed, maar vereist meer kracht en gerekend moet worden met meer terugvering:

- ▶ **1.4539 (AISI 904L)**
hoog Cr-, Ni-, Mo-, N- en Cu-gehalte voor hoge sterkte en corrosieweerstand;

- ▶ **1.4565 (UNS S34565)**
alternatief met hoge corrosieweerstand, niet-magnetisch, zeer hoge sterkte;
- ▶ **1.4547 (UNS S32154)**
hoog Cr-, Ni-, Mo- en N-gehalte, hogere sterkte en corrosieweerstand, o.a. in zeewater en in zwembaden;
- ▶ **1.4529 (UNS N08926)**
hoog Cr-, Ni-, Mo- en N-gehalte, hogere sterkte en corrosieweerstand, o.a. in zwembaden en in zeewater;
- ▶ **1.4652 (UNS S32654)**
zeer hoog Cr-, Ni-, Mo-, N-gehalte, hogere sterkte en corrosieweerstand in agressief milieu.

Omdat de superaustenitische roestvaste staalsoorten moeilijker te vervormen zijn, zijn er grenzen aan de te bereiken minimale plaat- of stripdikte, en zullen deze soorten niet in hele dunne producten verkrijgbaar zijn.

8.7 Superaustenitische roestvaste staalsoorten voor temperaturen tot ca. 1000 °C

Deze soorten hebben ook na het lassen een vrijwel volledig austenitische structuur. Kenmerken zijn de zeer hoge corrosie- en oxidatieweerstand, en de hogere sterkte (tabel 8.4 en 8.5). De vervormbaarheid is goed, maar vereist meer kracht (en dus vermogen van het gereedschap), en er moet rekening worden gehouden met meer terugvering.

tabel 8.4 Enkele kenmerken (minimum waarden bij 20 °C) van roestvast staal voor hoge temperaturen

NEN-EN 10088	0,2% rekgrens [N/mm ²] ¹⁾	treksterkte [N/mm ²] ¹⁾	toepassingen
1.4948	190	510	ovens, chemie, verbranding
1.4818	290	600	ovens, chemie, verbranding
1.4833	210	600	max. temperatuur lucht 1000 °C
1.4835	310	650	max. temperatuur lucht 1150 °C
1.4841	230	550	max. temperatuur lucht 1150 °C
1.4845	210	500	max. temperatuur lucht 1050 °C
1.4854	300	650	max. temperatuur lucht 1175 °C
1) Minimum waarden voor warmgewalst materiaal. In de koudgewalste conditie zijn de rekgrens en treksterkte hoger. Voor warmgewalst materiaal zijn de minimaal te bereiken rekpercentages (A5) 50% of hoger.			

Enkele kenmerken zijn:

- ▶ **1.4948 (AISI 304H)**
standaard hittevast staal met nog beperkte sterkte en oxidatie weerstand;
- ▶ **1.4818 (UNS S30415)**
hittevast staal met verhoogde sterkte en verbeterde oxidatieweerstand in hete gassen;
- ▶ **1.4833 (AISI 309S)**
hittevast staal met beperkte sterkte en goede oxidatieweerstand in hete gassen;
- ▶ **1.4835 (UNS S30815)**
hittevast staal met hoge sterkte en sterk verbeterde oxidatieweerstand in hete gassen;
- ▶ **1.4841 (AISI 314/310), 1.4845 (AISI 310S)**
standaard hittevast staal met goede sterkte en oxidatieweerstand;
- ▶ **1.4854 (UNS S35315)**
hittevast staal met hoge sterkte en uitstekende oxidatieweerstand in allerlei hete gassen.

Hoewel dunne strip en plaat leverbaar is vanaf ca. 0,4 mm, worden deze kwaliteiten meestal ingezet in robuuste apparaten in grotere dikten.

Als staalsoorten bij hogere temperaturen (> 350 °C) mechanisch worden belast, kan er zeer langzaam een blijvende plastische vervorming optreden; dit fenomeen wordt krimp genoemd. Superaustenitisch roestvast staal voor hogere

tabel 8.5 Enkele sterktecijfers voor kruip van hittebestendige roestvast staalsoorten bij hoge temperaturen. Gegeven is de spanning die leidt tot 1% rek resp. breuk na 10.000 en 100.000 uur

materiaal	N/mm ² 1% rek 10.000 uur				N/mm ² 1% rek 100.000 uur				N/mm ² max. 10.000 uur				N/mm ² max. 100.000 uur			
temp. [°C]	600	700	800	900	600	700	800	900	600	700	800	900	600	700	800	900
1.4948	–	–	–	–	74	22	–	–	–	–	–	–	89	28	–	–
1.4818	–	–	–	–	80	26	9	3	–	–	–	–	88	35	14	5
1.4833	80	25	10	4	35	12	–	–	120	36	18	8,5	65	16	7	3
1.4835	–	–	–	–	80	26	11	6	–	–	–	–	88	35	15	8
1.4841	105 ¹⁾	37 ¹⁾	12	5,7	–	–	–	–	160 ¹⁾	40 ¹⁾	18	8,5	–	–	–	–
1.4845	105	37	12	5,7	45	–	–	–	160	40	18	8,5	80	18	7	3
1.4854	–	–	–	–	52	21	10	5	–	–	–	–	80	36	18	9

1) niet bij deze temperaturen gebruiken in verband met verbrossing

temperaturen heeft een goede weerstand tegen kruip bij hoge temperaturen.

De kwaliteit 1.4948 wordt wel toegepast voor nucleaire toepassingen.

Voor een aantal staalkwaliteiten zijn kruipsterkten bij hoge temperaturen, voor zover beschikbaar, gegeven in tabel 8.6. Gegeven is de mechanische belasting, die bij een bepaalde temperatuur en tijd tot 1% rek, respectievelijk tot breuk zal leiden.

8.8 Roestvast staal met verhoogde sterkte (Ultra High Strength Stainless Steel)

Door koudwalsen kan men band en strip van diverse roestvaste staalsoorten verkrijgen met zeer hoge sterkten. Een overzicht is gegeven in tabel 8.6. De leverbare dikten zijn doorgaans beperkt van 0,4 tot 3,0 mm, de maximaal te leveren breedte kan 1.000 tot 1.300 mm bedragen. De band of strip heeft nog voldoende rek over voor verdere productiestappen. Wel moeten daarbij grotere buigstralen worden toegepast (minimaal 2 × de plaatdikte), en moet men rekening houden met meer terugvering.

tabel 8.6 Enkele kenmerken van sterk koudvervormd roestvast staal in verschillende kwaliteiten

aanduiding NEN-EN 10088	treksterkte [N/mm ²]	ASTM	rek ¹⁾ (A5)	1.4310	1.4318	1.4301	1.4541, 1.4401, 1.4571	1.4372
C700	700-850	1/8 hard	~45%	X		X	X	
C850	850-1000	1/4 hard	~35%	X	X	X	X	X
C1000	1000-1150	1/2 hard	~30%	X	X	X		X
C1150	1150-1300	3/4 hard	~20%	X		X		X
C1300	1300-1500	hard	~12%	X		X		X
C1500 ²⁾	1500-1800		beperkt (<5%)					X

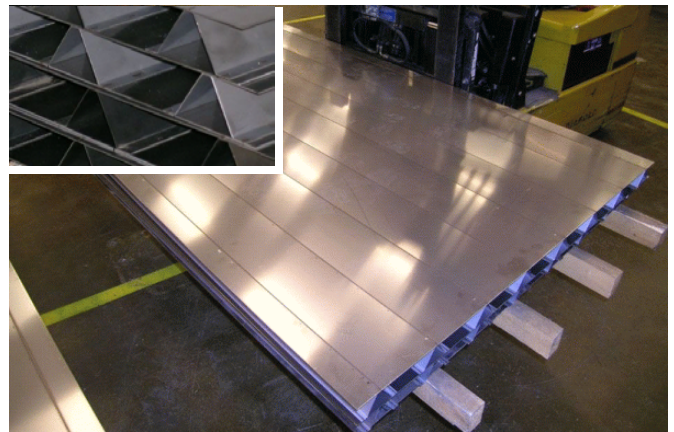
1) Typische waarden
2) Deze en hogere sterkten zijn overeen te komen

Naast de aanduidingen in de tabel zijn er kwaliteiten leverbaar, met rekgrans/treksterkte tot 1800 of zelfs 2000 N/mm² (bijvoorbeeld Hytens®). De vervormingsmogelijkheden hiervan zijn echter beperkt.

Als aan de koudgewalste staaltypen wordt gelast, neemt de sterkte ter plaatse van de las en de warmte beïnvloede zone af tot het oorspronkelijke niveau. Deze UHS SS stalen zijn zeer geschikt voor het maken van lichtgewicht constructies, mits men de constructie zodanig ontwerpt dat eventueel knikken kan worden voorkomen.

Een interessante toepassing in dit verband is het gebruik van dit soort roestvaste staalsoorten in een sandwich con-

structie (zie figuur 8.1). De hoge sterkte maakt dat er sandwich panelen vervaardigd kunnen worden met een hoge stijfheid en laag gewicht. Het vervaardigen van dit soort sandwich panelen kan uitstekend met behulp van het lasersnijden en laserlassen (weinig warmte-inbreng) worden uitgevoerd.



figuur 8.1 Sandwich paneel opgebouwd uit roestvast staalplaat en met een laser gelast.

Top: 1.4311 (AISI 301LN) C1000 - 2 mm
Tussenplaat: 1.4311 (AISI 310LN) C850 - 1 mm
Bodem: 1.4311 (AISI 301LN) C850 - 1,5 mm

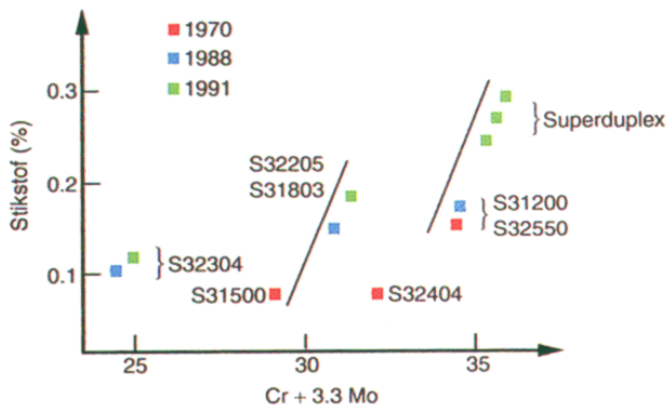
8.9 Duplex roestvaste staalsoorten

Begin jaren zeventig werd in Duitsland en Zweden 22%Cr ontwikkeld (1.4462; UNS S31803). Een patent beweerde dat dit nieuwe staal ongevoelig was voor interkristallijne corrosie na het lassen, vanwege een gebalanceerde chemische samenstelling, plus de toevoeging van extra stikstof. Duplex en superduplex roestvaste staalsoorten hebben de laatste decennia een enorme sprong gemaakt in de hoeveelheid toepassingen. Het zijn vooral de hoge sterkten gekoppeld aan een hoge tot zeer hoge weerstand tegen bepaalde corrosieve media die deze staalsoorten zo populair maken [7].

De structuur van duplex roestvast staal bevat ongeveer gelijke hoeveelheden ferriet en austeniet (vandaar de benaming duplex). De veel gebruikte typen bezitten 22 à 23% Cr. De typen met 25% of meer chroom hebben een betere corrosiebestendigheid dan de typen met een lager chroomgehalte. Naast standaard type 1.4462 zijn er de laatste jaren nieuwe soorten duplex roestvast staal op de markt gekomen, die zich uitstekend lenen voor toepassingen waarbij de sterkte benut kan worden om dunner te construeren. Uit het oogpunt van gewicht en prijs kan dit erg aantrekkelijk zijn. Figuur 8.2 Geeft een globaal overzicht van deze ontwikkelingen.

Enkele duplex roestvaste staalsoorten zijn samen met het type 1.4462 gegeven in tabel 8.7:

- 1.4362 is een aantrekkelijk alternatief voor standaard 1.4301 (1.4401), daar waar goede weerstand tegen chloridespanningscorrosie en sterkte gewenst zijn;



figuur 8.2 Globale ontwikkelingen van de verschillende duplex roestvast staal soorten [33]

tabel 8.7 Enkele kenmerken van nieuwere duplex roestvaste staalsoorten

NEN-EN 10088	0,2% rek grens [N/mm ²] ¹⁾	treksterkte [N/mm ²]	toepassingen
1.4362	400	600	apparaten, warmtewisselaars
1.4462	460	660	warmtewisselaars, tanks, roteren
1.4410	530	750	apparaten, zeewater, rookgassen

1) Het betreft warmgewalst materiaal. In de koudgewalste conditie zijn de rek grenzen minimaal 20 N/mm² hoger. Voor warmgewalst materiaal zijn de minimaal te bereiken rekpercentages (A5) ca. 35% of hoger.

- 1.4410, is een zogenaamd superduplex roestvast staal en heeft t.a.v. het standaard duplexstaal een superieure corrosieweerstand en sterkte.

Nieuwe kwaliteiten met verhoogd mangaan en een lager nikkelgehalte zijn in ontwikkeling, met name voor constructieve toepassingen. Duplex roestvast staal is inzetbaar tot ca. 280 °C. Daarboven ontstaan er uitscheidingen in de microstructuur, waardoor het materiaal brosser wordt.

De lasbaarheid van de meeste duplex en superduplex roestvaste stalen is uitstekend, mits overgelaten aan hierin gespecialiseerde bedrijven. Specifieke procedures moeten gevolgd worden die afwijken van het traditionele lassen van roestvast staal. Wordt hier niet aan voldaan, dan kan dit tot veel problemen (en hoge reparatiekosten) leiden.

Voor chemische samenstelling en normaanduidingen van de meest gebruikte duplexsoorten, zie de tabellen 2.1a t/m 2.4b in hoofdstuk 2. Enkele veel gebruikte duplex roestvaste staalsoorten zijn weergegeven in tabel 8.8.

tabel 8.8 Enkele veel gebruikte duplex staalsoorten

NEN-EN 10088	symbool	UNS nr.	Cr ¹⁾	Ni ¹⁾	Mo ¹⁾	overige
1.4362	X2CrNiN23-4	S32304	23	4		N
1.4417	X2CrNiMoSi19-5	S31500	17	5	3	–
1.4410	X2CrNiMoCuN25-6-3	S32750	25	6	3	CuN
1.4424	X2CrNiMoSi18-5-3	S31500	18	5	3	Si
1.4460	X4CrNiMoN27-5-2	S32950	27	5	1,7	N
1.4462	X3CrNiMoN22-5-3	S31803	22	5	3	N
1.4501	X2CrNiMoCuWN25-7-4	S32760	25	7	4	CuWN
1.4507	X2CrNiMoCuN25-6-3	S32750	25	6	3	CuN

1) gemiddelde (gew.) percentages

De laatstgenoemd typen (1.4501 en 1.4507) worden tot de zogenoemde superduplex staalsoorten gerekend.

Deze typen zijn tijdens de jaren tachtig ontwikkeld voor gebruik in agressievere milieus. De zogenaamde superduplex typen bevatten ongeveer 25% Cr, 6-7% Ni, 3-4 % Mo, 0,2-0,3% N, 0-2% Cu en 0-2% W.

De eigenschappen van de verschillende duplex staalsoorten variëren nogal. De meest markante kenmerken zijn hoge mechanische sterkte, goede weerstand tegen spanningscorrosie in chloridehoudende milieus (met name voor de Mo-houdende typen) en een goede algemene corrosiebestandheid. Daarnaast zijn deze materialen goed bestand tegen slijtage (cavitatie, erosie) en corrosievermoeiing. De meeste superduplex legeringen bezitten een putcorrosie equivalent getal (PRE_N: pitting corrosion equivalent number) groter dan 40.

Naast alle voordelen van de hooggelegeerde typen, zijn er ook nadelen, waarvan de hoge prijs niet de minste is. Verder bevordert een hoog legeringsgehalte uitscheiding van intermetallische fasen. Dit laatste kan echter worden vermeden door middel van goede procesbeheersing en (oplos-) gloeipraktijk en door het beperken van de boogenergie en interpass-temperatuur tijdens lassen.

Een andere ontwikkeling tijdens de jaren tachtig was een matig gelegeerd type (1.4362 - S32304). Het lagere legeringsgehalte (vooral Mo) houdt in dat dit type goedkoper te produceren is, maar heeft wel als nadeel een lagere weerstand tegen putcorrosie. In dit opzicht is het een regelrechte concurrent van de austenitische typen AISI 304L en AISI 316L met als kenmerkende voordelen hogere mechanische sterkte en verder overeenkomstige weerstand tegen putcorrosie in chloridenhoudende milieus.

Toepassingen van duplex roestvaste staalsoorten liggen op het gebied van installaties die met agressief koelwater (chloriden) in aanraking komen, alsmede voor pijpleidingen en andere componenten in de olie-, gas- en chemische industrie. De maximaal toelaatbare bedrijfstemperatuur voor duplex roestvast staal 1.4462 bedraagt 280 °C.

Lassen van duplex staal

Bij de verhitting tijdens het lassen van duplex roestvaste stalen, ontstaat grove ferriet in het lasmetaal en de WBZ, vooral bij wat langere verhittingstijd op hoge temperatuur. Ook de vorming van precipitaten leidt tot brosheid en verminderde corrosiebestandheid. Meestal wordt bij het lassen van duplex roestvast staal een toevoegmateriaal met een hoger Ni-gehalte dan van het basismateriaal toegepast, waardoor een te hoog ferrietgehalte in het lasmetaal wordt voorkomen. Zo zal bijvoorbeeld kwaliteit 1.4462 worden gelast met overeenkomstig of met 1.4820 toevoegmateriaal.

Veel toegepaste lasprocessen zijn MAG, TIG of het lassen met beklede elektroden. Het lassen moet bij voorkeur met een warmte-inbreng van 1 - 2,5 kJ/mm worden uitgevoerd.

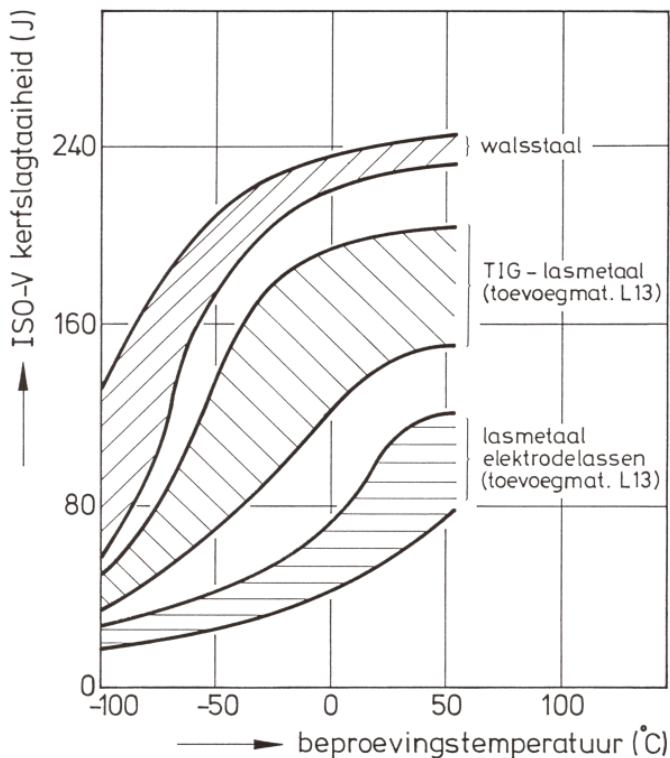
$$\text{Warmte-inbreng} = \frac{\text{Stroomsterkte [A]} \times \text{boogspanning [V]} \times 60}{\text{voortloopsnelheid [cm/min]}} \text{ [J/cm]}$$

Het lassen van dikwandige componenten met hogere warmte-inbreng, zoals het meergelagen-OP-lassen, is echter ook mogelijk, hoewel de structuur en de eigenschappen van de lasverbinding dan niet altijd optimaal zijn.

Uit figuur 8.3 blijkt dat de kerfslagtaaiheid van 1.4462-lasmetaal veelal aanzienlijk lager is dan van het basismateriaal; bij het elektrodolassen is dit nog sterker het geval dan bij het TIG-lassen. Bij het elektrodolassen kan de kerfslagwaarde van het lasmetaal bij 20 °C echter meestal boven 50 J worden gehouden.

Voorwarmen en/of spanningsarm gloeien na het lassen wordt meestal niet uitgevoerd. Wel worden fabrieksmatige producten, zoals uit plaat vervaardigde langsnaad-gelaste buizen, warmtebehandeld na het productieproces. Er mogen nooit waterstofhoudende beschermgassen worden gebruikt voor het lassen van duplex staal. Ten aanzien van het gebruik van waterstof in het backinggas moet voorzichtigheid betracht worden. Waterstofhoudende backinggassen mogen alleen maar worden gebruikt

als men er absoluut zeker van is, dat er geen waterstof in het beschermgas toe kan treden.



figuur 8.3 ISO-V-kerfslagwaarden van duplex roestvast walsstaal en lasmetaal 1.4462

8.10 Geplateerd staal

8.10.1 Kenmerkende gegevens geplateerd staal

Ongelegeerd of laaggelegeerd staal kan worden voorzien van een dunne laag roestvast staal, waardoor een product ontstaat dat (roestvast) geplateerd staal wordt genoemd. Voor het plateren kunnen ook andere materialen worden gebruikt zoals koper, nikkel en hun legeringen en de metalen Ti, Al, en Ta.

Bij het walsplateren wordt de verbinding tussen de roestvaste laag (de plateerlaag) en het gewone staal (het basismetaal) door walsen bij hoge temperatuur tot stand gebracht. Naast walsplateren wordt ook - in toenemende mate - het explosief plateren toegepast. Ook komt een combinatie van beide processen voor.

De hechting moet zodanig zijn, dat deze zonder gevaar voor loslaten, aan hoge belastingen kan worden blootgesteld. Ook is het mogelijk om een roestvaste laag via lassen op te brengen, waarbij veelal het bandoplassen wordt toegepast. In de meeste gevallen is het basismateriaal slechts eenzijdig geplateerd. Het bereik van de walsplateerlaag gaat van 10 tot 90 mm basismateriaal met 2 tot 8 mm dikke plateerlagen. Bij explosief plateren zijn plateringsdikten tot 40 mm mogelijk op platen met een dikte van soms meer dan 200 mm, zoals bijvoorbeeld bij pijplaten. Meestal wordt roestvast geplateerd staal gebruikt in gevallen waarin roestvast staal niet sterk genoeg is.

De voordelen van geplateerd staal zijn de gunstigere prijs en de mogelijkheid om de gunstiger mechanische eigenschappen van laag- en ongelegeerd staal te benutten.

Als roestvaste plateerlagen worden regelmatig de gangbare austenitische en ferritische staalsoorten gebruikt. Economisch toepasbaar worden echter ook steeds vaker plateerlagen uit materialen die elders in dit hoofdstuk behandeld zijn, zoals:

- De duplex stalen (bijvoorbeeld kwaliteit 1.4462);
- hooggelegeerde austenitische staalsoorten (bijvoorbeeld de kwaliteiten 1.4529, 1.4539 en 1.4563).

Ook komen plateerlagen met de nikkellegeringen Alloy 600, Alloy 625 en Alloy 825 regelmatig voor.

Als basismateriaal worden vaak gebruikt:

- Ongelegeerd staal en microgelegeerd staal S275NH t/m S490NH;
- ketelplaatstaal: P265GH, P296GH en P355GH.

8.10.2 Lassen van geplateerd staal

Voor het lassen van roestvast geplateerd staal wordt naast het Bmbe, het MAG-lassen, het TIG-lassen, het onder poeder lassen en het laserlassen toegepast (zie hiervoor hoofdstuk 6). De bereikbaarheid van de las bepaalt bij plaat en pijp de werkwijze bij het lassen. Als richtlijn kan worden aangehouden, dat:

- bij een dikte ≥ 4 mm moet het lassen in tenminste twee of meer lagen plaatsvinden;
- bij een dikte < 4 mm moet worden gestreefd naar een las in twee lagen om het gevaar van opmenging tegen te gaan.

Bij het lassen moeten de volgende grondregels zeer nauwgezet in acht worden genomen, daar elke nalatigheid de lasverbinding nadelig beïnvloedt:

- Wanneer hechtlassen noodzakelijk zijn, moeten deze bij voorkeur in het basismetaal worden aangebracht;
- bij het lassen van het basismetaal met een ongelegeerd of laaggelegeerd lastoevoegmateriaal moet ervoor worden gezorgd, dat het lasmetaal niet in aanraking kan komen met de plateerlaag; gebeurt dit wel, dan is een harde en min of meer brosse laag, met kans op scheuren onvermijdelijk;
- het lassen van de overgangslaag, dit is de laag die het basismetaal verbindt met de hooggelegeerde plateerlaag, moet plaatsvinden door middel van een bufferlaag (23 12 2 L);
- voor het lassen van de sluitlaag wordt een lastoevoegmateriaal gebruikt waarvan de samenstelling moet zijn aangepast aan de plateerlaag;
- bij het lassen wordt iedere laag met behulp van een penetrantmethode gecontroleerd op eventuele scheuren. Wordt een scheur aangetroffen, dan moet deze worden gerepareerd, omdat anders sterkte en corrosievastheid worden bedreigd. Is radiografisch onderzoek als eis gesteld, dan moet de las hieraan in zijn geheel worden onderworpen;
- oppassen voor spatten: scherm de omgeving van de lasnaad zo nodig af met een antispattpasta.

In het volgende zal nog enige toelichting worden gegeven over de gang van zaken bij enkele praktijkgevallen. Deze zijn voornamelijk gebaseerd op het Bmbe lassen maar zijn ook van toepassing als andere lasprocessen worden toegepast.

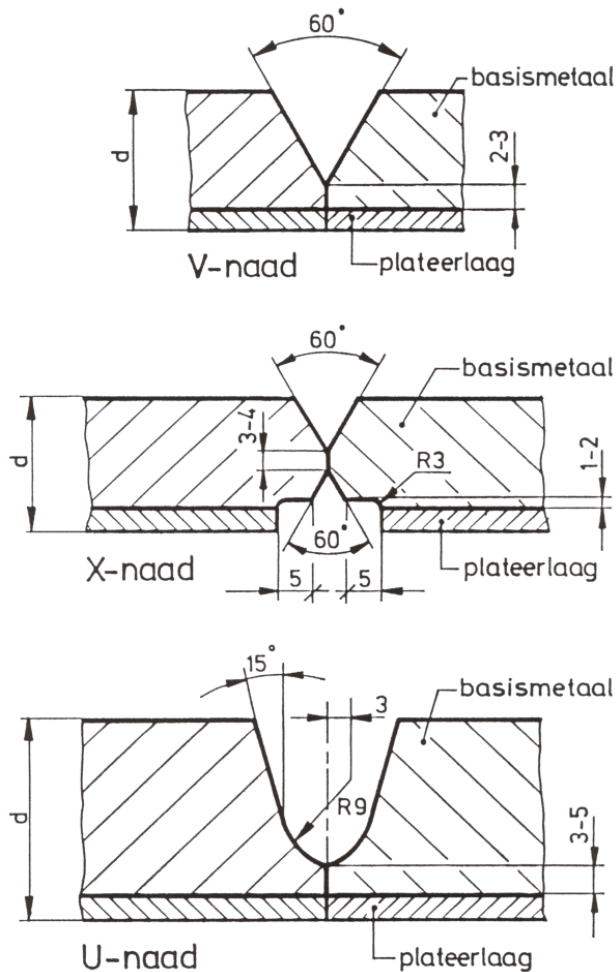
- Procedures bij tweezijdig toegankelijk geplateerd staal** (zie ook figuur 8.4)

Lassen met V-naad

Bij toepassing van een V-naad wordt een staand deel van minstens 2,5 mm voorgeschreven met een vooropening van minimaal 2 mm. Na het aflassen van het basismetaal wordt aan de keerzijde de plateerlaag zodanig uitgeslepen, dat een vrij diepe groef ontstaat, die tot in het lasmetaal van het basismetaal reikt. Deze groef kan tot ongeveer 2 mm onder de plateerlaag worden gelast met een ongelegeerde of laaggelegeerde elektrode. Daarna wordt met een bufferelektrode verder gelast tot in de plateerlaag. De plateerlaag wordt tenslotte gelast met een aan de plateerlaag aangepaste elektrode.

Lassen met X-naad

Eerst wordt de geheel in het basismetaal liggende helft van de X-naad gelast met een ongelegeerde of laaggelegeerde elektrode. Is dat deel afgelast, dan wordt de keerzijde van de naad tot in het lasmetaal uitgeslepen en met een zelfde type elektrode opgevuld tot ongeveer 1 à 2 mm onder de plateerlaag. Na gladlijpen van het ongelegeerde lasmetaal wordt de groef met een bufferelektrode tot in de plateerlaag gevuld, waarna de verdere vulling geschiedt met een aan de plateerlaag aangepaste elektrode.



figuur 8.4 Lasnaadvormen bij tweezijdig toegankelijk geplateerd staal

Lassen met U-naad

Omdat meestal direct wordt overgegaan op het OP-proces, moet het basismetaal in dit geval voorzien zijn van een staande kant (net als bij het maken van een V-naad). Na het leggen van de grondlaag kan de naad geheel worden afgelast. In tabel 8.9 is aangegeven welke buffermetalen en welke "aflas"-toevoegmaterialen worden aanbevolen bij het lassen van verschillende geplateerde materialen.

tabel 8.9 Voorbeelden keuze lastoevoegmaterialen voor roestvast geplateerd staal

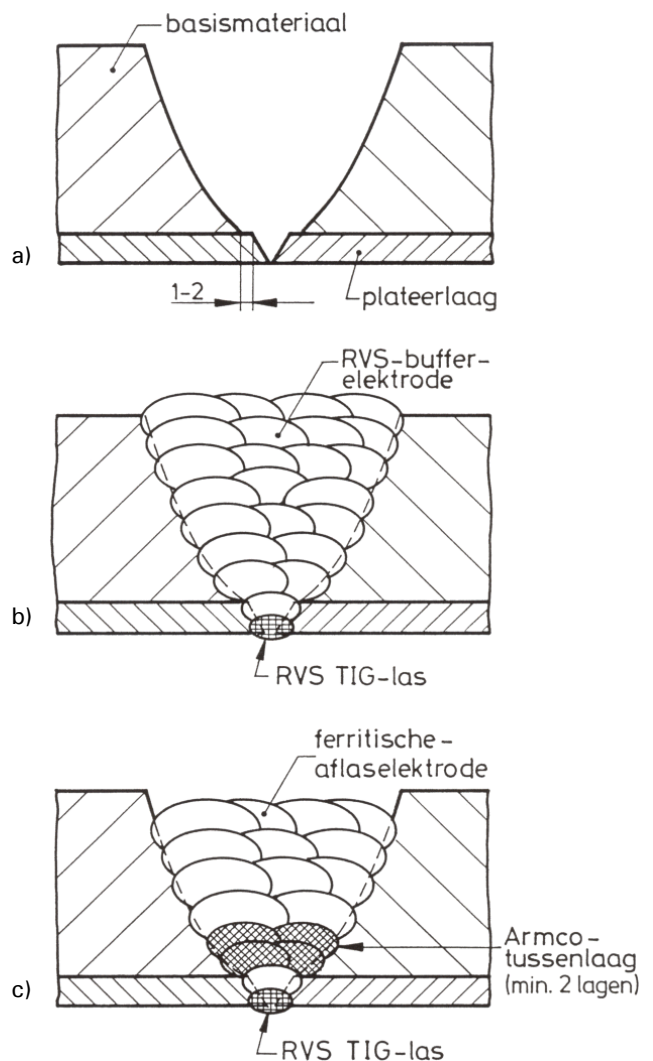
materiaaltype plateerlaag	buffermateriaal	lastoevoegmateriaal
EN of ASTM	EN of ASTM/AWS	EN of ASTM/AWS
1.4301 (304); 1.4307 (304L); 1.4541 (321); 1.4550 (347)	1.4332 (23 12 L)	1.4316 (19 9 L) 1.4551 (19 9 Nb Si) 1.4332 (23 12 L) 23 12 Nb (309Nb)
1.4401 (316); 1.4404 (316L); 1.4580 (316Nb); 1.4571 (316Ti)	1.4459 (23 12 2 L)	1.4430 (19 12 3 L) 23 12 2 (309Mo)
1.4462 (duplex)	1.4459 (23 12 2 L)	1.4462
1.4465 1.4539 1.4563	1.4459 (23 12 2 L)	1.4465 1.4539 1.4563

b) Lassen van eenzijdig toegankelijk geplateerd staal (zie ook figuur 8.5a, b en c)

Wanneer de constructie zodanig is dat de plateerlaag niet aan de buitenkant kan worden afgelast, moet een andere werkwijze worden gevolgd. Dit komt voor bij het lassen van pijpen en kleine cilinders met inwendige plateerlaag en soms bij het vullen van de laatste naad bij inwendig geplateerde drukvaten.

In die gevallen zijn we gedwongen eerst de plateerlaag vanaf de buitenzijde, met overeenkomstig toevoegmateriaal te lassen. Meestal geschiedt dit met het TIG-proces, waarbij gebruik wordt gemaakt van een backing-gas. Voor de verdere vulling moet dan een bufferelektrode worden genomen (zie figuur 8.5b).

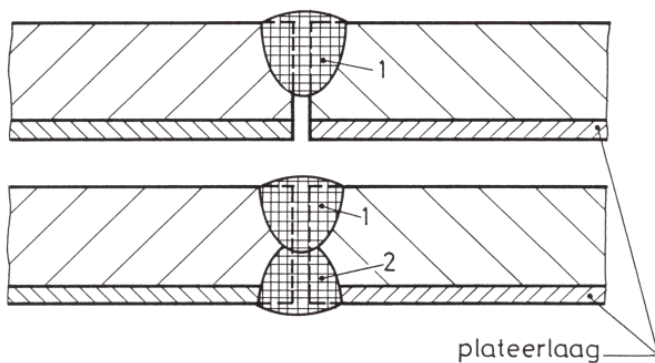
Wanneer voor de restvulling normale ferritische "aflas"-elektroden worden gebruikt, ontstaan problemen bij opmenging met het roestvast staal (martensietstructuur). Door na het lassen van de plateerlaag een Armco-ijzer-elektrode (staal met bijzonder laag C-gehalte) te kiezen als tussenlaag, die in tenminste 2 lagen wordt gelegd (zie figuur 8.4c), zal de hardheid van deze martensiet echter niet bijzonder hoog worden. Deze techniek mag men alleen toepassen als men de uitvoering volledig onder controle weet te houden. Na het lassen met een Armco-ijzer-elektrode moet altijd gegloeid worden op circa 625 °C om de hardheid te verlagen. Als alternatief kan eventueel gebruik worden gemaakt van een hoog nikkelhoudend elektrodetype.



figuur 8.5 Lassen van eenzijdig toegankelijk geplateerd staal
a. naadvoorbewerking
b. normale naadvulling
c. variant met Armco-tussenlaag

c) **Procedures bij zeer dun materiaal**
(zie ook figuur 8.6)

Het komt voor dat het geplateerde staal zo dun is, dat de beschreven voorbereidingen (afschuining tot vlak boven de plateerlaag) niet mogelijk zijn. We kunnen dan de platen zonder afschuining aan elkaar lassen. De eerste laag wordt gelast aan de grond-metaalzijde met ongelegeerde elektroden of met een ander lasproces, bijvoorbeeld OP-lassen. Ook hier geldt weer: de inbranding mag nooit de plateerlaag bereiken. Na het lassen van het basismetaal wordt aan de zijde van de plateerlaag de naad eerst uitgeslepen tot in het lasmetaal van het basismetaal, waarna de plateerlaag alleen met een bufferelektrode wordt afgelast. De samenstelling van deze elektrode moet aan die van de plateerlaag zijn aangepast. Dus bij een Mo-houdende platering een 1.4459 (23 12 2 L) en bij een Mo-vrije legering een 1.4332 (23 12 L) toevoegmateriaal gebruiken.



figuur 8.6 Het lassen van dunne geplateerde plaat
1. ongelegeerd toevoegmateriaal
2. buffertoevoegmateriaal

Meer informatie ten aanzien van het lassen van geplateerd staal kan worden gevonden in de voorlichtingspublicatie "VM 115 - Lassen van ongelijksoortige metalen".

Hoofdstuk 9

Het lassen van ongelijksoortige materialen

9.1 Inleiding

Het komt in de praktijk regelmatig voor, dat bepaalde typen roestvast staal aan andere metalen moeten worden gelast. Hierbij kan men denken aan bijvoorbeeld een lasverbinding tussen twee materialen met duidelijk verschillende chemische samenstellingen met gebruikmaking van een toevoegmateriaal met een wéér afwijkende chemische samenstelling. Een voorbeeld: een ongelegeerd staal aan een austenitisch roestvast staal met als toevoegmateriaal een overgangselektrode van het AISI type 309.

De chemische samenstelling en de hieruit voortkomende kristalstructuur van de uiteindelijk verkregen lasverbinding is een functie van de chemische samenstelling van de te lassen materialen, het type lastoevoegmateriaal en de opmenging bij het lassen. De chemische samenstelling van de te verbinden materialen is veelal een gegeven. De keuze van het lastoevoegmateriaal en de chemische samenstelling daarvan is de vraag. De opmenging met de basismaterialen en het te kiezen lasproces zijn zaken waaraan veelal onterecht te weinig aandacht wordt besteed.

9.2 Structuur en eigenschappen van Cr-Ni-lasmetaal

9.2.1 Algemeen

Men moet er in principe voor zorgen dat de eigenschappen van een las die van de te lassen materialen zo goed mogelijk benaderen. De las moet net zo sterk zijn als de zwakste van de twee te verbinden materialen. Ook zal men er rekening mee moeten houden, dat aan gelaste componenten, die onderhevig zijn aan mechanische of thermische schokbelasting, bepaalde taaiheidseisen moeten worden gesteld.

De structuur van het lasmetaal wordt vooral bepaald door de chemische samenstelling, de doorlopen warmtecyclus en lasuitvoering.

De chemische samenstelling van het lasmetaal wordt bepaald door de keuze van het lastoevoegmateriaal, de chemische samenstelling van het te lassen materiaal en de mate van opmenging. De invloed hiervan op de structuur wordt mede bepaald door het lasproces en de lasparameters.

9.2.2 Structuur voorspellen

De opmenging met de te lassen ongelijksoortige materialen is onder andere sterk afhankelijk van het lasproces, te weten voor:

Booglassen met beklede elektroden (111):	10 - 25%
MIG- of MAG-lassen (13):	5 - 50%
TIG-lassen (14):	0 - 100%
Onder poeder lassen (12):	30 - 70%

Verder is de opmenging met de basismaterialen afhankelijk van:

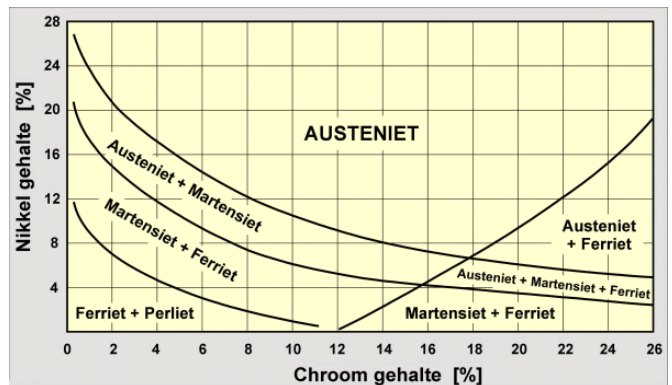
- ▶ elektrode- c.q. draaddiameter;
- ▶ lassnelheid;
- ▶ stroomsterkte;
- ▶ plaatdikte;
- ▶ voorwarmtemperatuur;
- ▶ stroomsoort;
- ▶ polariteit;
- ▶ type lastoevoegmateriaal;
- ▶ bij oplossen/cladden: de mate van overlap tussen twee elkaar opvolgende snoeren, met andere woorden, de mate waarin de boog óp en vóór het smeltbad brand.

Eerst als deze facetten bekend zijn kan men, gebruikmakend van een diagram, de te verwachten structuur van het lasmetaal voorspellen (bijvoorbeeld het Schaeffler-diagram).

9.2.3 Schaeffler-diagram

Het Schaeffler-diagram heeft in de loop van de jaren nogal een evolutie doorgemaakt.

De eerste publicatie over het lassen van ongelijksoortige materialen was te lezen in 'Welding Journal' van oktober 1947 (verslag van het AWS congres) onder de naam: 'Selection of austenitic electrodes for welding dissimilar metals' door A.L. Schaeffler [41]. Schaeffler baseerde zijn diagram op het bekende Maurer-diagram (zie figuur 9.1). E. Maurer had toen reeds vastgesteld dat een staal met $\pm 18\%$ Cr - 8% Ni en hoog C, afgeschrikt van hoge temperatuur in water, een volledige austenitische structuur veroorzaakte (18/8 of "VA"). In dit basisdiagram werden door Maurer al de ferriet/austenietgebieden aangegeven als functie van slechts het Cr- en Ni-gehalte.



figuur 9.1 Maurer-diagram

Om nu voor lasmetaal een gelijksoortig diagram te ontwikkelen bedacht Schaeffler diverse aanpassingen, zoals het invoeren van correctiefactoren teneinde de structuur te kunnen omschrijven in ferrietvormende en austenietvormende elementen. Hij realiseerde dit in zogenaamde Cr- en Ni-equivalenten.

Schaeffler ging uit van een 4,8 mm dikke elektrode en trok hiermede een rups op niet voorverwarmd SAE 4140 basismateriaal met de volgende lasparameters: 165 A - 27 V - 15 cm/min. Aan deze opgelaste rups bepaalde hij het ferriet, de opmenging, de structuur en de chemische samenstelling. De grenswaarden voor de diverse elementen werden vastgelegd. Deze moesten vallen binnen de volgende grenzen:

C	max 0,2 %
Si	max 1 %
Mn	max 4 %
Mo	max 3 %
Nb	max 1,5 %

Het eerste diagram gold slechts voor een beperkt aantal lastoevoegmaterialen, te weten E308 - 309 - 309Nb - 310 - 312 - 316 - 317 en 318. De nauwkeurigheid in de ferrietmeting bedroeg $\pm 2\%$ en was gebaseerd op microscopische metingen aan preparaten.

Deze eerste publicatie werd gevolgd door een tweede publicatie van zijn hand, in juli 1948, met als titel 'Welding dissimilar metals with stainless steel electrodes' [42] (zie figuur 9.2).

In november 1949 publiceerde Schaeffler zijn derde diagram in 'Metal Progress' onder de titel: 'Constitution diagram for stainless steel weld metal' [43] (zie figuur 9.3). In dit diagram werden veranderingen doorgevoerd in het Cr-equivalent. De elementen Si, Mo en Nb kregen een lagere correctiefactor.

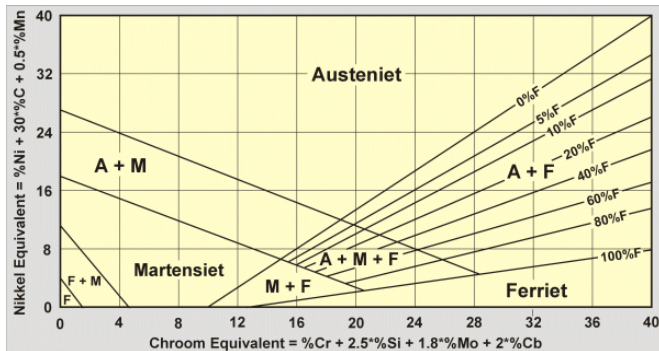
In de loop van de jaren hebben veel wetenschappers zich gebogen over de juiste opbouw van chroom en nikkel equivalenten, met de meest vreemde materiaalcombinaties als gevolg.

Bijvoorbeeld: Schneider and Climax Molybdenum Co, Foundry Trade Journal, 108, 562, 1960:

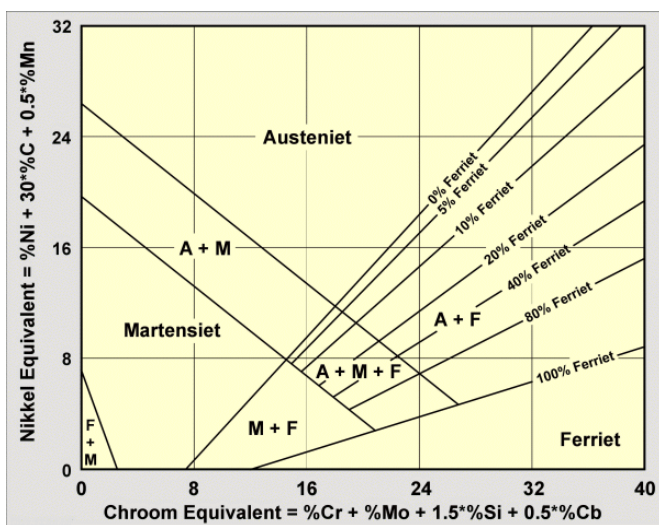
$$Cr_{eq} = \%Cr + 2 \times \%Si + 1,5 \times \%Mo + 5 \times \%V + 5,5 \times \%Al + 1,75 \times \%Nb + 1,5 \times \%Ti + 0,75 \%W$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + \%Co + 0,5 \times \%Mn + 0,3 \times \%Cu + 25 \times \%N + 30 \%C$$

Al deze afwijkende berekeningen hebben een geheel eigen toepassingsgebied en zijn derhalve meestal niet universeel bruikbaar, noch goed vergelijkbaar.



figuur 9.2 Schaeffler-diagram uit 1948



figuur 9.3 Schaeffler-diagram uit 1949

9.2.4 Nauwkeurigheid

De belangrijkste ontwikkeling was een verbeterde nauwkeurigheid. In november 1956 publiceerde DeLong, een collega van Schaeffler, een artikel met de titel 'Measurement and calculation of ferrite in stainless steel weld metal' [44], waarin hij enkele veranderingen in het Schaeffler-diagram voorstelde: wijziging van de ferriet-lijnen; toevoeging van de invloed van stikstof (correctiefactor 30 x) in het Ni-equivalent en druk het ferrietgehalte uit in een Ferriet Nummer (FN) in plaats van in volumepercenten.

Het introduceren van FN, gemeten met bijvoorbeeld de "Magne Gage" of de "Severn Gage", bevordert de meetnauwkeurigheid. De apparaten zijn speciaal voor dit doel ontwikkeld (torsiebalans met een permanent magneet van gespecificeerde afmetingen en magnetische sterkte) wordt de magneet van een glad te meten oppervlakte afgetrokken. De kracht welke hiervoor benodigd is, is een maat voor het Ferriet Nummer. Het voordeel van deze methode is, dat overal op de wereld een goede kalibratie kan plaatsvinden en dat uitgegaan kan worden van uniforme ijkmonsters.

Het DeLong voorstel was gebaseerd op een gedegen onderzoek. DeLong gebruikte 600 oplassingen met RVS elektroden. Er werden 8 lagen opgelast, welke telkens met water werden gekoeld. Slechts de laatste laag, gelast met korte boog en een lage stroomsterkte, werd afgekoeld aan lucht. Van deze laag werd ferriet bepaald door meting en door een berekening, gebaseerd op de chemische samenstelling.

De correctiefactor voor stikstof bleek belangrijk, omdat afhankelijk van de booglengte, bij het lassen grote variaties in stikstof in het lasmetaal kunnen optreden. DeLong stelde

verder vast, dat de elektrodediameter en de elektrodebedekking invloed hadden op het ferrietgehalte.

Nu is het niet zo dat Schaeffler geen rekening gehouden had met het stikstofgehalte. Hij ging uit van een koppeling van het stikstofgehalte aan het chroomgehalte, te weten:

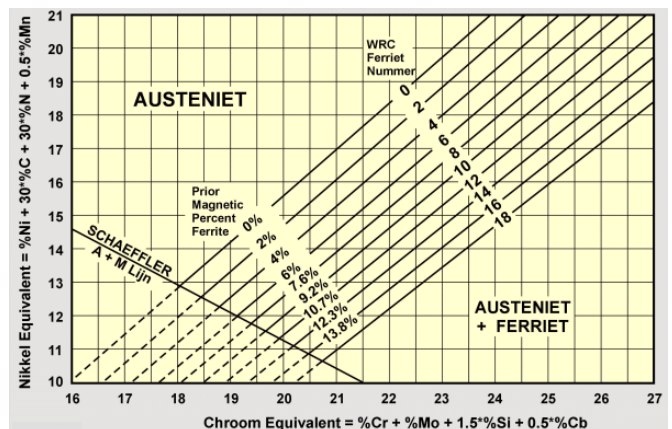
- 0,05% N bij < 18% Cr
- 0,07% N bij 18 - 25% Cr
- 0,10% N bij > 25% Cr

Samenvatting Schaeffler en DeLong diagram

Indien men de pro's en de contra's van beide besproken diagrammen op een rijtje zet, kan men de volgende conclusies trekken:

- Basis Schaeffler-diagram:
 - metallografisch onderzoek (uitgedrukt in %);
 - magnetische meetmethode;
 - geen eenduidige uitkomsten.
- Basis DeLong-diagram:
 - Magne (Severn) Gage-metingen, uitgedrukt in FN, gekalibreerd op ijzer/koper ijkmonsters (laagdikte monsters) en op las ijkmonsters waaraan metallografisch het ferrietgehalte van te voren was bepaald;
 - eenduidige uitkomsten!

Men zou mogen zeggen dat het DeLong diagram beter is gedefinieerd. Voor de kopergelegeerde lasmetalen en de hoger stikstof bevattende lasmetalen is DeLong nauwkeuriger (zie figuur 9.4). Het Schaeffler-DeLong-diagram is vele jaren toegepast, doch leidde in de praktijk tot discussies.



figuur 9.4 DeLong-diagram

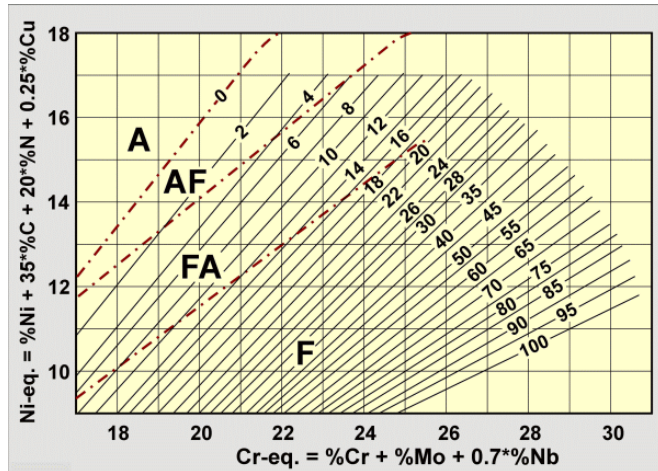
9.2.5 Het werk van de Welding Research Council (WRC)

In december 1988 publiceerden Siewert/Olson een artikel waarbij een nieuw diagram, het WRC 1988-diagram, werd gepresenteerd "Ferrite number Prediction to 100 FN in stainless steel weld metal" [45]. Dit diagram bleek nauwkeuriger dan het Schaeffler-DeLong-diagram. Het nieuwe diagram is gebaseerd op een database, met de resultaten van FN-metingen en analyses van de chemische samenstellingen van zuiver lasmetaal verkregen met 950 producties van verschillende typen roestvast staal beklede elektroden. Het ferrietgehalte varieert van 0 tot 100 FN en is toepasbaar binnen de volgende grenswaarden:

- Mn max 10%
- Mo max 3%
- N max 0,2%
- Si max 1%

Bovendien zijn in het diagram gebieden met de stollingsstructuren aangegeven te weten, austenitisch, austenitisch/ferritisch, ferritisch/austenitisch of ferritisch. Dit diagram is in 1992 gecorrigeerd door Kotecki en Siewert en is bekend als het WRC92-diagram [46]. De invloed op het Ni-equivalent van het element koper werd toegevoegd (zie

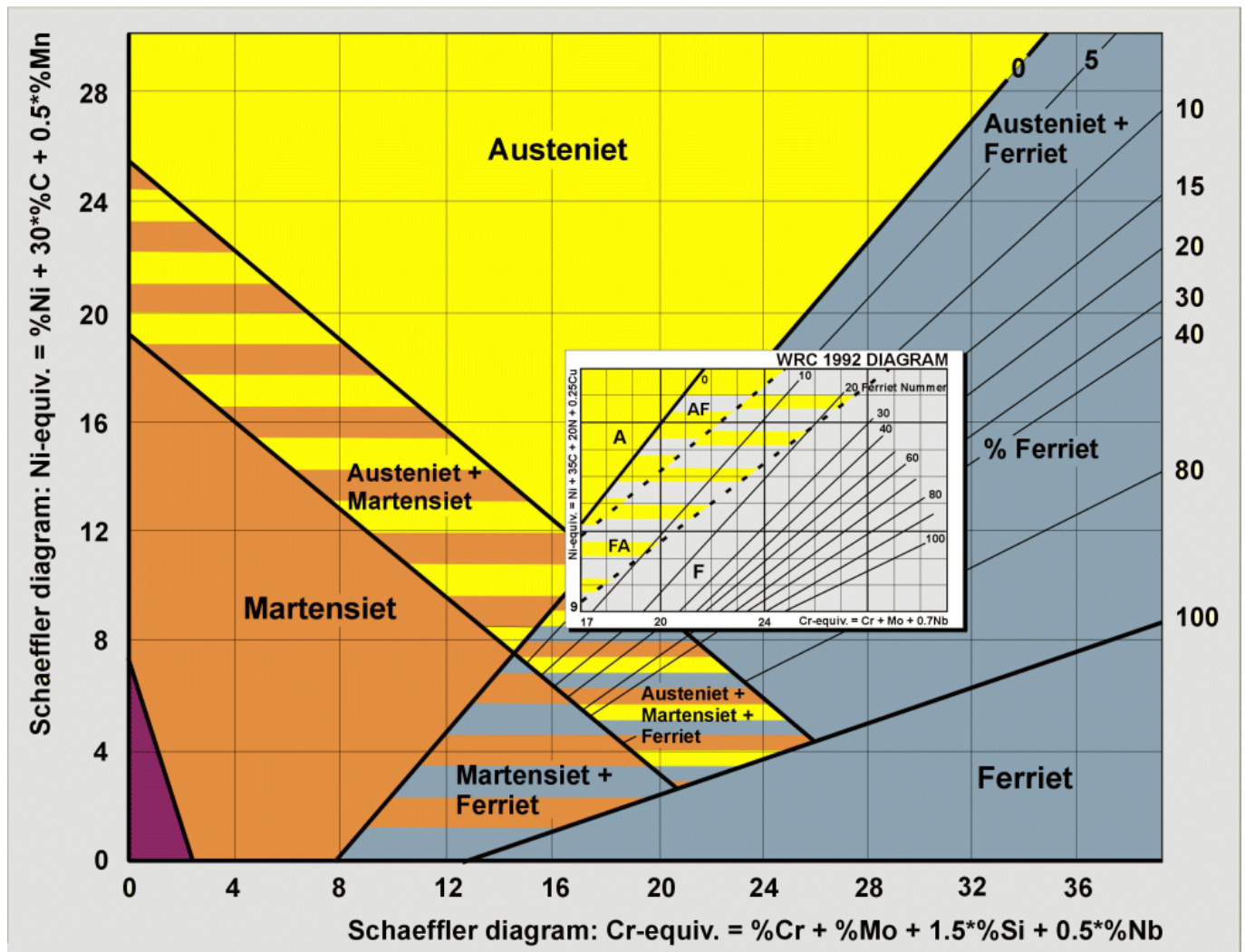
figuur 9.5). Dit diagram is internationaal door zijn grote nauwkeurigheid als norm geaccepteerd. In datzelfde jaar kwam ook Espy met een publicatie, waarbij met name aandacht werd besteed aan stikstof gelegeerd roestvast staal met een verhoogd mangaangehalte [47].



figuur 9.5 WRC92-diagram

In de praktijk bleek het echter moeilijk de structuur te voorspellen welke ontstond bij het lassen van ongelegeerd staal aan roestvast staal. Van Nassau en medewerkers hebben in 1992-1993 het WRC92-diagram gecombineerd met het bekende Schaeffler-diagram [49]. Hierbij zijn de vastgestelde formules voor het berekenen van de Cr- c.q. Ni-equivalenten van de respectievelijke auteurs gehandhaafd. Het resultaat van deze combinatie is weergegeven in figuur 9.6. Met dit geïmplementeerde WRC-diagram in het Schaeffler-diagram is het mogelijk de structuur te voorspellen van een lasmetaal tussen ongelegeerd staal en roestvast staal. Tevens is het mogelijk zeer nauwkeurig het ferriet te bepalen in het austeniet/ferriet-gebied. Tabel 9.1 geeft een compleet overzicht van de belangrijkste structuurdiagrammen voor RVS-lasmetaal.

Concluderend kunnen we stellen dat zowel de nauwkeurigheid als het toepassingsgebied van de structuurdiagrammen in de loop van de tijd aanzienlijk is verbeterd resp. vergroot.



figuur 9.5 Combinatie van het WRC92- en het Schaeffler-diagram uit 1949

tabel 9.1 Overzicht van de meest bekende structuurdiagrammen voor RVS-lasmetaal

naam	Cr- en Ni-equivalenten	opmerkingen	limieten
E. Maurer	Cr Ni	niet voor lasmetaal geschikt	
A.L. Schaeffler 1 ^e en 2 ^e diagram 1947/48	$Cr_{eq} : \%Cr + 2,5 \times \%Si + 1,8 \times \%Mo + 2 \times \%Nb$ (90 - 40) $Ni_{eq} : \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn$ (0 - 32)	Volume procenten ferriet 0 - 100	$C < 0,2$; $Mo < 3$; $Si < 1,0$; $Nb < 1,5$; $Mn < 4$
A.L. Schaeffler 3e diagram 1949	$Cr_{eq} : \%Cr + 1,5 \times \%Si + \%Mo + 0,5 \times \%Nb$ (0 - 40) $Ni_{eq} : \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn$ (0 - 32)	Volume procenten ferriet 0 - 100	
De Long diagram 1956	$Cr_{eq} : \%Cr + 1,5 \times \%Si + \%Mo + 0,5 \times \%Nb$ (0 - 40) $Ni_{eq} : \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn + 30 \times \%N$ (0 - 32)	Ferriet nummers: 1 - 18 (FN)	AISI 300 serie Weinig ferriet.
WRC 1988 diagram	$Cr_{eq} : \%Cr + \%Mo + 0,7 \times \%Nb$ (17 - 31) $Ni_{eq} : \%Ni + 35 \times \%C + 20 \times \%N$ (9 - 18)	FN 0 - 100	$Mn < 10$; $Si < 1,0$; $Mo < 3$; $N < 0,2$ + primaire stolling
ESPY diagram 1992	$Cr_{eq} : \%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Nb + 5 \times \%V + 3 \times \%Al$ (0 - 40) $Ni_{eq} : \%Ni + 30 \times \%C + 0,87$ (voor Mn) $+ 0,33 \times \%Cu + (\%N - 0,045) \times X$, (0 - 40) Waarin: X = 30 wanneer $0,0\% < N < 0,2\%$ X = 22 wanneer $0,21\% < N < 0,25\%$ X = 20 wanneer $0,26\% < N < 0,35\%$	Volume procenten ferriet 0 - 100 Let op : vast getal voor Mn!	
WRC 1992 diagram	$Cr_{eq} : \%Cr + \%Mo + 0,7 \times \%Nb$ (17 - 31) $Ni_{eq} : \%Ni + 35 \times \%C + 20 \times \%N + 0,25 \times \%Cu$ (9 - 18)	FN 0 - 100	Idem echter met X- en Y-as tot 0
Schaeffler + WRC 1992 gecombineerd	Schaeffler: $Cr_{eq} : \%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Nb$ (0 - 40) $Ni_{eq} : \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn$ (0 - 30) WRC 1992: $Cr_{eq} : \%Cr + \%Mo + 0,7 \times \%Nb$ (17 - 31) $Ni_{eq} : \%Ni + 35 \times \%C + 20 \times \%N + 0,25 \times \%Cu$ (9 - 18)	FN 0 - 100 en volume procenten Zeer geschikt voor verbindingen van ongelijksoortige materialen en nauwkeurige FN voorspellingen.	

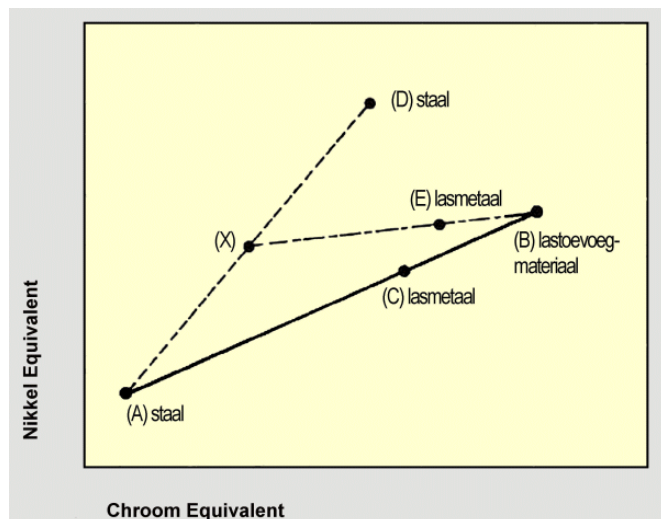
9.3 Verbindingslassen van RVS aan ongelegeerd of laaggelegeerd staal

9.3.1 Methode

Verbindingslassen van roestvast staal aan on- of laaggelegeerd staal worden vaak in West Europa ook wel zwart-wit (ongelijksoortig) verbindingen genoemd. Dit is misschien wel de meest voorkomende verbinding in de groep van ongelijksoortige lasverbindingen.

Het Schaeffler-(DeLong)-diagram wordt gebruikt om een geschikt lastoevoegmateriaal te kiezen voor het lassen van ongelijksoortige materialen. Een variabele hierbij is de opmenging, zoals eerder genoemd, en afhankelijk van veel factoren. Opmenging wordt gedefinieerd als de procentuele verhouding van de hoeveelheid omgesmolten werkstukmateriaal ten opzichte van de totale hoeveelheid omgesmolten toevoegmateriaal.

Werken met de opmenging in de hier genoemde diagrammen is in alle gevallen overeenkomstig. Hierbij is het niet van belang in welk diagram de berekening wordt toegepast; de systematiek is steeds dezelfde. Beschouwen we figuur 9.7.



figuur 9.7 Bepaling van lasmetaalsamenstellingen (schematisch)

Stel dat we een staal lassen met een samenstelling A, terwijl het toevoegmateriaal een samenstelling B heeft. De samenstelling van het lasmetaal komt overeen met punt C. De verhouding van de lijnstukken BC tot AB komt overeen met een in de praktijk zeer aannemelijk opmengpercentage van 30%.

In figuur 9.7 is nog een ander voorbeeld aangegeven, namelijk het lassen van staal A aan staal D met lastoevoegmateriaal B. We moeten daartoe eerst de samenstelling kennen van de twee te lassen materialen. Bij gelijke opmenging van materiaal A en D en zonder gebruikmaking van lastoevoegmateriaal, zou de samenstelling van het smeltbad worden gevonden in punt X. Bij gebruikmaking van lastoevoegmateriaal van samenstelling B, wordt de uiteindelijke samenstelling van het smeltbad gevonden op de verbindingslijn BX, waarin de verhouding BE/BX weer een opmengpercentage van 30% aangeeft.

9.3.2 Lasprocessen

De volgende lasprocessen komen voor het verbinden van RVS aan ongelegeerd of laag gelegeerd staal in aanmerking:

- booglassen met beklede elektroden (111);
- TIG-lassen (14);
- MAG-lassen met massieve en gevulde draad (13);
- onder poeder lassen (12).

Booglassen met beklede elektroden

Het lassen van RVS aan on- of laaggelegeerd staal werd vroeger uitgevoerd met elektroden van het type 310 met een chemische samenstelling van 25%Cr - 20% Ni. De volaustenitische structuur die hiermee wordt verkregen geeft aanleiding tot warscheuren. Dit kan men onderwerpen door 6 - 8% Mn aan de elektrode toe te voegen, een zeer laag percentage verontreinigingen zoals P en S, en door de keuze van een basische bekleding. Een dure en niet al te praktische oplossing, omdat de lasbaarheid en slaklossing niet best zijn. Een goedkopere oplossing is een 307 type, met 18Cr - 8Ni - 6Mn. Een oplossing die vooral in Duitsland veel wordt toegepast. Men dient ook hier rekening te houden dat met name de slaklossing niet optimaal is door het relatief hoog Mn-houdende neergesmolten lasmetaal.

Een andere oplossing om het risico van warscheurvorming te onderdrukken is uit te gaan van een austeniet-ferrietstructuur in de lasverbinding. Schaeffler toonde met zijn uitgevoerde proeven reeds duidelijk aan, dat de warscheur gevoeligheid sterk verminderd werd bij aanwezigheid van ferriet in de las. Het lagere gehalte aan legerings-

elementen, dat ontstaat door verdunning van het lasmetaal bij het opmengen met ongelegeerd staal, wordt opgevangen door een lasmetaal te kiezen met een verhoogd chroom- en nikkelgehalte. Bijvoorbeeld een 309L type voldoet hier ruimschoots aan. De chemische samenstelling van deze elektroden is 24Cr - 12Ni. Deze elektroden hebben een uitstekende lasbaarheid en kunnen ook nog eens zonder problemen worden toegepast voor het leggen van een bufferlaag bij het lassen van geplateerd staal.

Aangeraden wordt om bij voorkeur geen Mo-houdende elektroden als een 309MoL type toe te passen, indien de lasdikte meer dan 12 à 13 mm bedraagt. Vooral bij het lassen in meerdere lagen (bij grotere wanddikten) kan bij het lassen met Mo-houdende elektroden verbrossing ontstaan. De verbrossing wordt veroorzaakt door het ontstaan van ongewenste uitscheidingen bij hogere temperaturen tijdens het lassen. Lasmetaal verbrost vele malen sneller dan basismateriaal met dezelfde samenstelling.

In het geval van bijvoorbeeld kruipvaste CrMo-staalsoorten aan austenitisch staal is het belangrijk om toevoegmaterialen met een gecontroleerd ferrietgehalte te gebruiken. Bij toepassing van normale overgangselektroden voor het lassen van geplateerd staal is dit meestal het geval. Om de verbrossingsneiging bij hoogtemperatuur toepassing te verminderen, is het aan te bevelen om hoog nikkelhoudend toevoegmateriaal te gebruiken. De nadelen van de hogere prijs en de minder goede lasbaarheid van nikkelbasis toevoegmaterialen wegen ruimschoots op tegen het voordeel dat geen koolstofmigratie optreedt. Ontkoling van het basismateriaal en het opkolen van het lasmetaal wordt hiermede voorkomen. Een ander voordeel van nikkelbasis toevoegmateriaal is dat de lineaire uitzettingscoëfficiënt van nikkelbasis lasmetaal tussen die van austenitisch en ferritisch staal (kruipvast CrMo-staal) in ligt, waardoor op thermische schokbelaste verbindingen het risico van scheurvorming vele malen kleiner is.

TIG-lassen

Het TIG-lassen van on- en laaggeleerd staal aan roestvast staal hoeft geen problemen te geven, mits men zich aan bepaalde voorwaarden houdt. Om warmscheuren te voorkomen, dient ook hier een toevoegmateriaal te worden gekozen met een zekere hoeveelheid ferriet. Van belang hierbij is, dat de naadvoorbewerking zodanig wordt gekozen dat de lasser te allen tijde verplicht is om het toevoegmateriaal te gebruiken. Dit is noodzakelijk om er zeker van te zijn, dat een las met een voldoende austeniet - ferrietstructuur wordt verkregen. Bij het maken van verbindingen zoals bijvoorbeeld stikstofhoudend vol-austenitisch RVS aan CMn-staal heeft men van beide materialen invloed (opmenging) op de aanwezigheid van voldoende ferriet in het lasmetaal. Bij het TIG-lassen van RVS aan ongelegeerd en laaggeleerd staal moet men dus de juiste keuze maken van het lastoevoegmateriaal, een aangepaste naadvorm kiezen en over voldoende vakmanschap beschikken.

MAG-lassen met massieve en gevulde draad

Aangezien de energie- en draadtoevoer bij dit lasproces aan elkaar zijn gekoppeld, is het risico van een slechte mengverhouding in het algemeen kleiner. Een uitzondering op deze regel zijn de hoeklasverbindingen bij verstevigingsstrippen van ongelegeerd staal op roestvast staal, indien er met een hoge stroom (openboog gebied) wordt gelast. Bij deze toepassing kan men een zeer hoge mengverhouding hebben. Juiste keuze lastoevoegmateriaal en stand van laspistool zijn uitermate belangrijk om een goede scheurvrije lasverbinding te verkrijgen.

Voor de standaard toepassingen wordt aangeraden een 309L-draad toe te passen. Een massieve 309MoL-draad met verhoogd ferrietgehalte is niet te maken, bij de gevulde draad ligt dit natuurlijk geheel anders. Bij toepassing van een 309LSi massieve draad dient men pulserend te lassen met een beschermgas van argon met 2 - 3% CO₂. Vooral aan de RVS-zijde moet men oppassen voor bindingsfouten (plakfouten). De lasboog zal veelal op het roestvast staal

moeten worden gericht, om de boogafwijkingen tengevolge van magnetische blaaswerking te corrigeren en de betere stroomgeleidbaarheid van het ongeleerde staal te compenseren.

Onder poeder lassen

Het onder poeder lassen van on- en laaggeleerd staal aan roestvast staal is een kritische aangelegenheid. Afhankelijk van de naadvorm en de lasuitvoering kunnen mengpercentages worden verkregen tussen de 30 en 70%. Een dergelijke variatie in opmenging kan niet uitsluitend door de chemische samenstelling van de draad/poeder-combinatie worden opgevangen. Een scheurvrije las is dan ook alleen maar te realiseren indien men de juiste draad/poeder-combinatie kiest en de opmenging met name met het ongeleerde staal onder controle weet te houden. Met andere woorden: de lasuitvoering is zeer bepalend om een scheurvrije verbinding te verkrijgen. Voldaan moet worden aan onderstaande voorwaarden:

- ▶ richt de boog op het roestvast staal. Dit is nodig, omdat de boog afwijkt naar het ongeleerde staal, want ongeleerd staal geleidt de stroom beter dan roestvast staal;
- ▶ las in een naad zonder staande kant; dit houdt in dat men een grondlaag legt met het MAG-proces of met een basische elektroden;
- ▶ gebruik een chroom bijlegerend poeder;
- ▶ buffer de ongeleerde staalzijde vooraf met beklede elektroden, bijvoorbeeld een basisch 309L type. Daarna kan de verbinding normaal onder poeder worden afgelast met een aan het roestvast staal aangepaste draad/poeder-combinatie.

9.3.3 Eigenschappen van Cr-Ni-lasmetaal

In het Schaeffler-diagram van figuur 9.8 is aangegeven hoe het effect van een aantal van deze factoren samenhangen met het Cr-equivalent en het Ni-equivalent. Aangegeven zijn de volgende "gevaarlijke" gebieden:

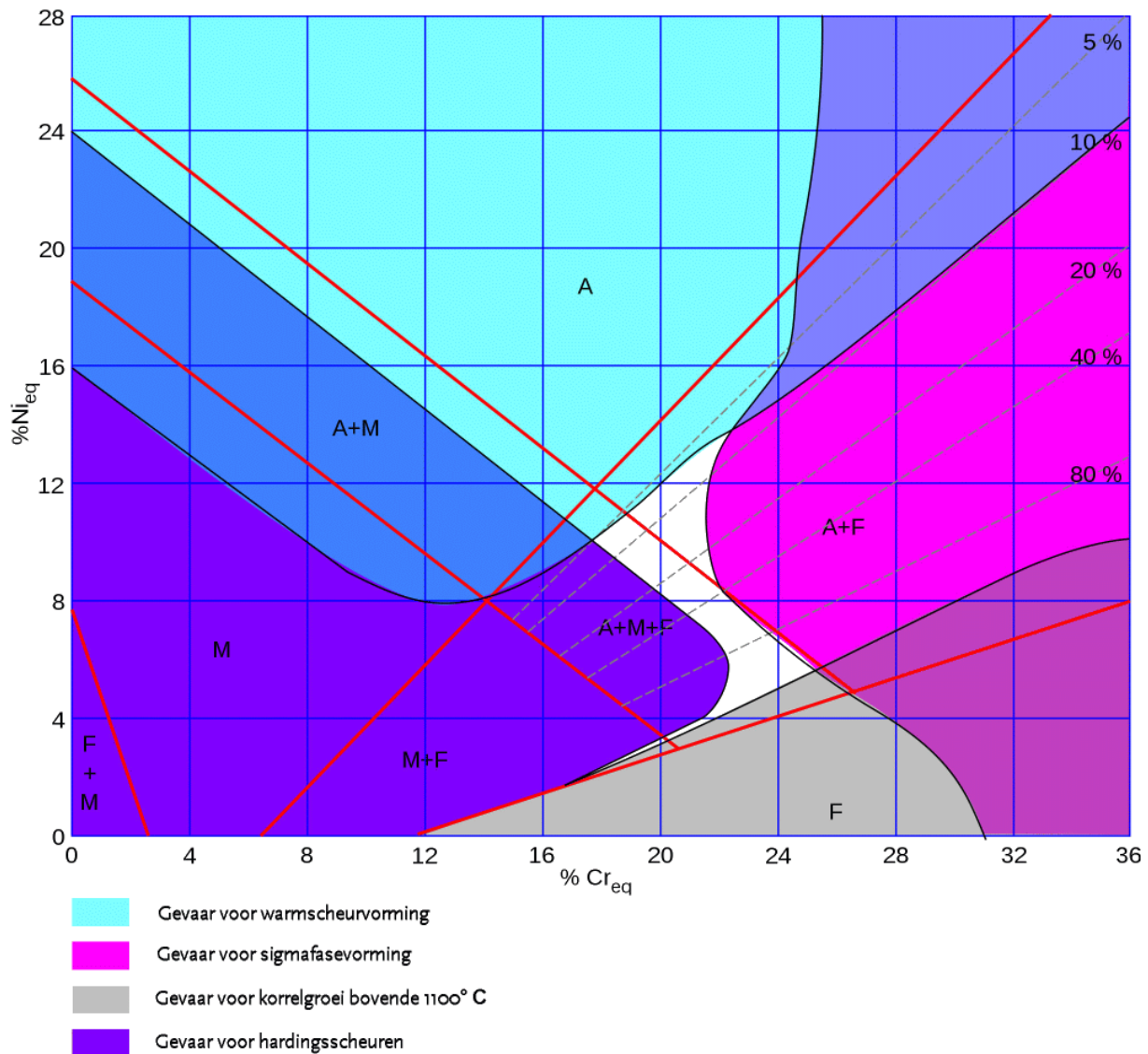
- ▶ warmscheurvorming boven 1250 °C; vooral bij vol-austenitische staalsoorten van toepassing (links boven in het diagram);
- ▶ sigma-fasevorming in het temperatuurgebied 500-900 °C; vooral bij gemengde austeniet-ferriet-structuren (rechts in het diagram);
- ▶ eventuele hardingsscheuren door martensietvorming beneden 400 °C (links onder in het diagram);
- ▶ mogelijke korrelgroei boven 1100 °C in ferritische staalsoorten (rechts onder in het diagram).

Het minst gevaarlijk lijkt dus het niet gearceerde gebied in het midden van het diagram te zijn. Het is uiteraard niet altijd mogelijk in dit gebied terecht te komen.

Tenslotte wordt in tabel 9.2 een globaal overzicht gegeven voor de keuze van lastoevoegmaterialen voor het verbindinglassen van ongelijksoortige materialen.

9.4 Conclusie

Aan het lassen van ferritische aan austenitische materialen zitten nogal wat haken en ogen, behalve lastechnisch ook wat betreft het corrosie- en het hoge temperatuur gedrag. In veel overzichten als tabel 9.2 wordt naast de keuze van het toevoegmateriaal eveneens aangegeven hoe de verbindingen moeten worden voorgewarmd en spanningsarm gegloeid om niet al te grote problemen te krijgen. Het moge duidelijk zijn dat per toegepast lasproces, er een scala van mogelijkheden ter beschikking staat van de lasdeskundige om bij een ongelijksoortige verbinding zoveel mogelijk aan de eisen van de materialen tegemoet te komen. Proceskennis is echter van het grootste belang.



figuur 9.8 Risicovolle gebieden aangegeven in het Schaeffler-diagram

tabel 9.2 Voorbeelden keuze lastoefeningsmateriaal voor het lassen aan ongelijksoortige kwaliteiten

EN/ASTM	ongelegerd staal	1Cr-0,5Mo (P12)	2,2Cr-1Mo (P22)	5Cr-0,5Mo (P5)	9Cr-1Mo (P9)	410-430 (1.4724) X10Cr13 X8Cr17 X10CrAl24	321 347 (1.4541, 1.4550)	330 (1.4864)	318 (1.4404)	316 316L (1.4406, 1.4580)	310 (1.4845)	309 (1.4724)	304 304L (1.4301, 1.4306)
304 304L (1.4301, 1.4306)	309S 309Mo	NiCr 70/15Mn 309S	NiCr 70/15Mn 309S	NiCr 70/15Mn 309S	NiCr 70/15Mn 309S	309S	304L 304H 347	NiCr 70/15Mn 309S	304L 318	403L 316L	309S 310	309S 309H	304L 304H
309 (1.4724)	309S 309Mo	NiCr 70/15Mn 309S	NiCr 70/15Mn 309S	NiCr 70/15Mn 309S	NiCr 70/15Mn 309S	309S	304L 309S	NiCr 70/15Mn 309S	316L 318 309S	316L 309S	309S 310	309S 309H	
310 (1.4845)	309S 309Mo	NiCr 70/15Mn 310	NiCr 70/15Mn 310	NiCr 70/15Mn 310	NiCr 70/15Mn 310	309S	309S	NiCr 70/15Mn 310	NiCr 70/15Mn 310	316L	310		
316 316L (1.4406, 1.4580)	309S 309Mo	NiCr 70/15Mn 309S	NiCr 70/15Mn 309S	NiCr 70/15Mn 309S	NiCr 70/15Mn 309S	309S(Mo) NiCr70/15Mn	304L 316L	NiCr 70/15Mn 310	316L 318	316L			
318 (1.4404)	309S 309Mo	NiCr 70/15Mn 309S	NiCr 70/15Mn 309S	NiCr 70/15Mn 309S	NiCr 70/15Mn 309S	309S(Mo) NiCr70/15Mn	304L 316L	NiCr 70/15Mn 310	318				
330 (1.4864)	NiCr 70/15Mn	NiCr 70/15Mn	NiCr 70/15Mn	NiCr 70/15Mn	NiCr 70/15Mn	NiCr 70/15Mn	NiCr 70/15Mn 309S 310	NiCr 70/15Mn					
321 347 (1.4541, 1.4550)	309S 309Mo	309S NiCr 70/15Mn	309S NiCr 70/15Mn	309S NiCr 70/15Mn	309S NiCr 70/15Mn	309S	304L 347						
410-430 (1.4724) X10Cr13 X8Cr17 X10CrAl24	309S	NiCr 70/15Mn	NiCr 70/15Mn	NiCr 70/15Mn	NiCr 70/15Mn	309S NiCr 70/15Mn							
P9	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)								
P5	(a)	(b)	(c)	(d)									
P22	(a)	(b)	(c)										
P12	(a)	(b)											
ongel. staal	(a)												

(a) E(R) 7015, E(R) 7016, E(R) 7018 (ongelegerd/laaggelegerd).
 (b) E(R) 8015-B2L, E(R) 8016-B2 OF E(R) 8018-B2 (1Cr-0,5Mo).
 (c) E(R) 9015-B3L, E(R) 9015-B3, E(R) 9016-B3, E(R) 9018-B3 (2,2Cr-1Mo).
 (d) E(R) 502 (5Cr-0,5Mo).
 (e) E(R) 505 (9Cr-1Mo).

Hoofdstuk 10

Warmtebehandelingen

10.1 Inleiding

Sommige bewerkingen, zoals koudvervormen, warmvervormen en lassen, kunnen een zodanige ongunstige invloed op de eigenschappen van het staal uitoefenen, dat een warmtebehandeling noodzakelijk is. Een warmtebehandeling kan de mechanische eigenschappen en de corrosiebestandheid in bepaalde gevallen zodanig verbeteren, dat aan de gestelde eisen wordt voldaan.

Warmtebehandelingen leveren weinig problemen op indien de behandeling goed past in de productielijn, dat wil zeggen indien de vormgeving van het product al bij hoge temperatuur moet plaatsvinden. Moeilijker of onmogelijk wordt warmtebehandelen, indien constructies bij de gloeitemperatuur schade kunnen oplopen. In de praktijk worden warmtebehandelingen vaak achterwege gelaten, vanwege de afmetingen, constructieve uitvoering en de daaruit voortvloeiende manipulatieproblemen en vervormingen.

Bij toepassing van warmtebehandelingen moet men er goed op letten dat deze volledig volgens de voorschriften worden uitgevoerd, omdat er anders ontoelaatbare kwaliteitsvermindering kan optreden.

Lasverbindingen geven altijd krimpspanningen. Tevens bestaat de mogelijkheid dat, door het inbrengen van warmte, uitscheidingen plaatsvinden. Al deze ongewenste verschijnselen kunnen de belastbaarheid en de levensduur van een gelaste constructie nadelig beïnvloeden.

Een remedie om genoemde effecten op te heffen is de warmtebehandeling. De temperatuur waarbij deze wordt uitgevoerd, moet echter binnen nauwe grenzen kunnen worden geregeld, omdat anders het middel erger is dan de kwaal. Een onjuiste warmtebehandeling kan carbidevorming in de hand werken, kan aanleiding zijn tot het optreden van korrelgroei, van 475 °C-brosheid of het ontstaan van sigma-fase.

10.2 Omschrijving warmtebehandelingen voor verschillende typen roestvast staal

In deze paragraaf wordt een overzicht gegeven van de verschillende soorten warmtebehandelingen die bij roest- en hittevast staal worden toegepast.

10.2.1 Austenitische roestvaste staalsoorten

a) Conventionele austenitische roestvaste staalsoorten

Een compilatie van warmtebehandelingen voor deze materialen is opgenomen in tabel 10.1. Deze tabel geeft alleen voorbeelden van genoemde materialen (niet alle soorten zijn opgenomen). De temperaturen zijn slechts

tabel 10.1 Warmtebehandeling voor roestvaste Cr-Ni-staalsoorten

materiaal			spanningsarm gloeien	homogeen gloeien	stabiliserend gloeien	oplossend gloeien
type	EN	AISI				
austenitische soorten	1.4310	301	ca. 16 uur op 400 °C houden, waarna nog vrij veel spanningen overblijven; om alle spanningen op te heffen, moet boven 900 °C worden gegloeid.	gedurende 2 uur op 870...900 °C houden, daarna afkoelen in lucht (niet nodig voor 1.4306).	niet gebruikelijk	gedurende 30 minuten per 25 mm materiaaldikte op 1010...1120 °C houden, daarna afschrikken in water of afkoelen in lucht
	1.4300	302				
	1.4305	303				
	1.4301	304				
	1.4306	304L				
	1.4311	304LN				
	--	304N				
	1.4312	305				
	--	308				
	1.4828	309				
	1.4833	309S				
	--	310				
	1.4845	310S				
	1.4841	314				
	1.4401	316				
	1.4404	316L				
	1.4406	316LN				
	1.4449	317				
	1.4438	317L				
	1.4583	(318)				
	1.4541	321				
	1.4550	347				
	--	348				
	hoog-gelegeerde austenitische soorten	1.4539		-		
--		254SMO				
1.4529		-				
1.4563		-				
duplex soorten	1.4460	329				
	1.4417	-				
	1.4462	-				
	--	Ferralium 255				
	1.4363	-				

indicaties. In de praktijk kan men het best de richtlijnen volgens specifieke normen of van de materiaalleverancier aanhouden.

- ▶ *Spanningsarm gloeien*, een warmtebehandeling waardoor inwendige spanningen worden verminderd (langdurig bij < 400 °C), dan wel praktisch geheel worden opgeheven (900-950 °C).
- ▶ *Homogeen gloeien*, een warmtebehandeling bij hoge temperatuur voor niet-gestabiliseerd austenitisch Cr-Ni-staal, waarbij door chroomdiffusie naar ontchroomde kristalgrenzen de corrosievastheid wordt verbeterd en tevens inwendige spanningen praktisch worden opgeheven.
- ▶ *Stabiliserend gloeien*, een warmtebehandeling bij hoge temperatuur, voor gestabiliseerde austenitische staalsoorten (typen 1.4541 (AISI 321), 1.4550 (AISI 347), 1.4561 (AISI 316Ti), 1.4580 (AISI 316Nb), waarbij de eventueel in oplossing gegane carbonitriden weer worden uitgescheiden en inwendige spanningen worden opgeheven.
- ▶ *Oplossend gloeien*, een warmtebehandeling bij hoge temperatuur, gevolgd door afschrikken; bedoeld voor alle austenitische staalsoorten, waardoor de Cr-carbiden en intermetallische verbindingen in oplossing worden gebracht en spanningsafbouw plaatsvindt. De hoge gloeitemperatuur (veelal > 1050 °C) en het afschrikken zijn echter in veel gevallen bezwaarlijk. Het materiaal wordt zacht, waardoor de constructie vervormt. Bodems en andere constructie-onderdelen worden soms koudgespoten in plaats van in een bad afgekoeld, vooral als de koelbadafmetingen daartoe niet groot genoeg zijn. Duplex roestvaste staalsoorten moeten nooit worden afgekoeld in een geforceerde luchtstroom i.v.m. het teruglopen van de kerftaaiheid.

Bij austenitisch roestvast staal moet ongeacht de behandeling bij het vullen van de oven rekening worden gehouden met de hoge thermische uitzetting. Deze uitzetting is namelijk ongeveer 50% hoger dan die van ongelegeerd staal en gelegeerd staal. De tussenruimte tussen de werkstukken moet dus voldoende groot zijn om plaats te kunnen bieden aan deze uitzetting. Stapelen van werkstukken moet met overleg plaatsvinden om vervorming bij hoge temperatuur te voorkomen. De hoogste praktische gloeitemperatuur waarbij nog geen buiten-sporige korrelgroei plaatsvindt, bedraagt 1095 °C.

- b) **Hooggelegeerde austenitische roestvaste staalsoorten**
Dit betreft austenitische typen met hogere Cr-, Ni- en Mo-gehalten. Spanningsarm gloeien en homogeen gloeien kunnen op dezelfde manier worden uitgevoerd als bij de conventionele austenitische typen. Het oplossend gloeien geschiedt gemiddeld op een 100 °C hogere temperatuur dan bij kwaliteit 1.4401 en 1.4449 (tabel 10.1).
- c) **Duplex roestvaste staalsoorten [21]**
De microstructuur van duplex roestvast staal is austenitisch/ferritisch. De balans van 50% ferritisch en 50% austeniet wordt verkregen door een juiste chemische samenstelling en een warmtebehandeling op 1050 °C, gevolgd door afschrikken in water. Deze structuur kan worden afgeleid uit het fasediagram. De stolling begint ferritisch en zal bij het passeren van de soliduslijn een volledige ferrietstructuur bevatten. Bij verdere afkoeling zal een omzetting naar austeniet plaatsvinden. Wanneer deze afkoeling voldoende traag verloopt, bestaat de kans dat de ferriet volledig wordt omgezet naar austeniet. Door nu het basismateriaal te verwarmen tot ongeveer 1050 °C ontstaat een evenredige verdeling van ferriet en austeniet. Wanneer het basismateriaal vervolgens wordt afgeschikt in water, wordt deze structuur als het ware ingevroren. Het basismateriaal mag een ferrietpercentage bevatten tussen de 40 en 60%. Warmtebehandelingen bij duplex moeten met kennis van zaken worden uitgevoerd. Onjuiste warmtebehandelingen kunnen veel schade veroorzaken, zoals scheuren door

een te hoog ferrietgehalte en verhoogde corrosiegevoeligheid door ongewenste uitscheidingen. Plaatmateriaal en niet gelaste buizen worden echter altijd in de optimale warmtebehandelde toestand geleverd (oplossend gegloeid op 1050 °C gevolgd door afschrikken in water). Het basismateriaal van een gelaste buis is ook op deze wijze behandeld en wordt daarna gedeformeerd en tot buizen gelast. De (rest)spanningen in een gelaste buis zullen altijd hoger zijn dan in een naadloze gegloeide buis. Daarom moet een (langsnaad)gelaste duplex roestvaste stalen buis na het lassen bij voorkeur oplossend gegloeid worden.

Spanningsarm gloeien van duplex roestvast staal (na bijvoorbeeld snelle afkoeling, richten of lassen) kan bij de meeste typen het beste worden uitgevoerd bij 550 °C. Voor oplossend gloeien, geldt voor lager gelegeerde typen een gloeitemperatuur van maximaal 1000 à 1050 °C en voor de hoger gelegeerde typen van > 1050 °C. Voor dikwandige werkstukken worden soms nog hogere temperaturen voorgeschreven. Het afschrikken moet plaatsvinden in water om optimale eigenschappen te bereiken. De vraag is of de beruchte 475 °C-brosheid ook op kan treden tijdens het lassen van duplex. Hier geldt net als bij de ferritische staalsoorten, dat er na enig verblijf op een temperatuur rond 475 °C een verbrossing ontstaat. Deze verbrossing kan ook optreden bij lassen die uit meerdere lagen zijn opgebouwd en ook indien een deel van de constructie een aantal malen dit kritieke gebied heeft gepasseerd. Het spreekt daarom voor zich dat bij langdurig verblijf op temperaturen rond de 475 °C het duplex steeds brosser wordt. Bij duplex is echter meer tijd nodig om dit te bereiken dan bij ferritische typen. Proeven hebben aangetoond dat na jarenlange blootstelling van duplex aan temperaturen lager dan 280 °C geen merkbare achteruitgang van de taaiheid is vast te stellen. Daarom mogen duplex en superduplex in principe slechts worden toegepast tot bedrijfstemperaturen van maximaal 280 °C.

Bij kortstondig verblijf op ± 800 °C wordt op de korrelgrenzen van duplex roestvast staal al de brosse chi-fase uitgescheiden. Dit betreft een ongewenst ijzer-chroom-molybdeen-precipitaat. Deze chi-fase is rijk aan chroom (± 25%) en aan molybdeen (± 20%). Voor de vorming van deze precipitaten wordt de matrix plaatselijk 'ontchroomd' en daalt ook het molybdeengehalte. Het resultaat hiervan is een aanzienlijke achteruitgang van de kerfslagwaarde en de corrosievastheid. Bij bepaalde hoog molybdeenhoudende duplex RVS-soorten zoals bij superduplex kan overigens wel de sigma-fase ontstaan. Door een hoog molybdeengehalte wordt de weerstand tegen putcorrosie beter, maar de ongunstige precipitatie van intermetallische fasen gaat echter dan ook sneller.

10.2.2 Ferritische roestvaste staalsoorten [21]

Ferritisch roestvast staal blijft in theorie bij alle temperaturen ferritisch en kan dus in principe niet worden gehard door een warmtebehandeling en afschrikken. Maar in de praktijk blijkt dit echter niet altijd waar te zijn. Sommige ferritische RVS-typen vormen namelijk grensgevallen als het chroomgehalte aan de lage kant is en het koolstofgehalte aan de hoge kant, want dan kan er bij verwarming een weinig austeniet ontstaan, die bij afkoeling overgaat in martensiet. De belangrijkste warmtebehandeling die ferritisch roestvast staal ondergaat, is zachtgloeien. In de zachtgegloeide toestand ontwikkelen ferritische typen maximale zachtheid, vervormbaarheid en corrosieweerstand. Zachtgloeien dient in de eerste plaats om spanningen af te bouwen die het gevolg zijn van bijvoorbeeld lassen of koudvervormen. In de tweede plaats geeft het een vrijwel homogene structuur en heft het structuuromzettingen op die het gevolg zijn van lassen. Ook elimineert dit gloeien de zogenaamde 475 °C-verbrossing, wat de kerfslagtaaiheid ten goede komt. De 475 °C-verbrossing is het gevolg van de uitscheiding van chroom-ijzerverbindingen, die zeer bros zijn. Bij afkoe-

ling moet het temperatuurstraject van 525 tot 400 °C daarom zo snel mogelijk worden doorlopen. Ferritisch roestvast staal wordt daarom altijd gegloeid bij temperaturen boven de 475 °C, maar onder de temperatuur waarbij austeniet zou kunnen ontstaan.

Spanningsarm gloeien van gelaste verbindingen in ferritisch roestvast staal kan worden gedaan ter verbetering van de ductiliteit van de warmte beïnvloede zone. Voor type AISI 430 is het aan te bevelen de lasverbinding te gloeien bij 700 à 800 °C. De brosheid in de gelaste toestand bij deze staalsoorten wordt veroorzaakt door korrelgroei en 475 °C-brosheid. Superferrietten hebben wat minder last van deze 475 °C-brosheid door het lage koolstof- en stikstofgehalte in deze legeringen.

10.2.3 Martensitische roestvaste staalsoorten

Martensitisch roestvast staal is gevoeliger voor variaties in de warmtebehandeling dan ongelegeerd staal of gelegeerd staal. Het afkeuringspercentage als gevolg van fouten in de warmtebehandeling is dan ook navenant hoger. Vanwege de hoge materiaalkosten van deze soort en de hoge kosten om er producten van te maken, heeft het alleen zin om dit staal toe te passen als er hoge eisen worden gesteld ten aanzien van de corrosieweerstand en/of de slijtvastheid. De warmtebehandeling moet dan ook zo worden uitgevoerd dat deze hoge corrosieweerstand onder alle omstandigheden gehandhaafd blijft. Om verontreiniging te voorkomen, moeten alle werkstukken en hulpgereedschappen volledig worden gereinigd, voordat ze in de oven worden geplaatst.

Rekken en steunen moeten zelf van roestvast staal zijn vervaardigd, of van een nikkellegering die aanzienlijke hoeveelheden chroom bevat. Juiste reiniging is vooral van belang als er gebruik wordt gemaakt van een beschermende atmosfeer. Martensitisch roestvast staal wordt doorgaans gehard door het te verhitten tot boven het transformatietemperatuurtraject (925 tot 1065 °C), gevolgd door afkoeling aan lucht. Vanwege de slechte warmtegeleiding kunnen hoge temperatuursgradiënten en hoge spanningen tijdens snelle opwarming, vervorming en zelfs scheuring veroorzaken [21]. Om dit te voorkomen wordt voorwarmen aanbevolen vooral bij werkstukken:

- ▶ met veel scherpe hoeken;
- ▶ waar veel slijpwerk aan is verricht;
- ▶ die koudvervormd zijn of gericht;
- ▶ die al eens zijn gehard, maar opnieuw een warmtebehandeling moeten ondergaan.

Voorwarmen vindt gewoonlijk plaats op 760 tot 790 °C en moet lang genoeg duren om er zeker van te zijn dat elk deel van een werkstuk deze temperatuur heeft aangenomen. Als maximale corrosieweerstand en sterkte wordt gevraagd, moet martensitisch roestvast staal worden omgezet in austeniet bij een zo hoog mogelijke temperatuur, afgebakend door het toelaatbare temperatuurtraject. De verblijftijd vormt een compromis tussen enerzijds het bereiken van maximale sterkte en corrosieweerstand en anderzijds het tegengaan van ontkoling, buitensporige korrelgroei, restausteniet, brosheid en afschrikscheuring. Eventuele restausteniet kan worden verwijderd door koeling bij temperaturen onder nul, gevolgd door ontlaten (zie noot 3 onder tabel 10.2).

tabel 10.2 Warmtebehandeling voor martensitische roestvaste staalsoorten

materiaal			zacht gloeien	uitgloeien ¹⁾	hardnen ²⁾	ontlaten ³⁾
type	EN	AISI				
martensitische soorten	1.4000	403	850...900 °C; in oven afkoelen tot 590 °C; daarna in lucht	680...730 °C; daarna afkoelen in lucht	15 minuten op 920...1010 °C houden (langer gloeien geeft kans op korrelvergroving), daarna afschrikken in olie	gedurende 1 uur op 650...750 °C houden ter verkrijging van optimale taaheid; gedurende 1...2 uur op 230...370 °C houden voor het zoveel mogelijk behouden van de hardheid
	1.4006	410				
	--	414	niet gebruikelijk	650...700 °C; daarna afkoelen in lucht		
	1.4005	416	850...900 °C; in oven afkoelen tot 590 °C daarna in lucht	680...730 °C; daarna afkoelen in lucht		
	--	416Se				
	1.4021	420	850...870 °C; in oven afkoelen tot 590 °C; daarna in lucht	680...730 °C; daarna afkoelen in lucht	15 minuten op 980...1040 °C houden, daarna afschrikken in olie	gedurende 1...2 uur op 150...370 °C houden
	1.4057	431	niet gebruikelijk	620...665 °C; daarna afkoelen in lucht	15 minuten op 980...1020 °C houden, daarna afschrikken in olie	als voor AISI 403 416Se is aangegeven
	1.4109	440A	850...900 °C; in oven afkoelen tot 650 °C; daarna in lucht	680...730 °C; daarna afkoelen in lucht	15 minuten op 1010...1070 °C houden, daarna afkoelen in lucht of afschrikken in olie	gedurende 1...2 uur op 150...400 °C houden
	1.4112	440B				
	1.4126	440C				
ferritische soorten	1.4002	405	niet toelaatbaar of ongebruikelijk	700...750 °C; daarna afkoelen in lucht	niet mogelijk	niet gebruikelijk
	1.4016	430		700...750 °C; daarna afkoelen in lucht of afschrikken in water		
	1.4104	430F				
	--	430Se				
	1.4510	430Ti				
	1.4511	430Nb				
	1.4749	446		820...870 °C; daarna afschrikken in water		
superferrietten	--	29-4-2		760... 960 °C/water		
	1.4521	--		950...1020 °C/water		
	--	MONIT		1010...1070 °C/water		
	1,4575	--		1010...1070 °C/water		

1 Uitgloeien is gloeien op een lager temperatuurniveau ten behoeve van een tussentijdse bewerking. De behandeling is eenvoudiger maar voldoende voor het gestelde doel: het bereiken van een redelijke bewerkbaarheid, het opheffen van versteviging na koudvervorming en het verlagen van inwendige spanningen. Voor het uitgloeien van martensitisch roestvast staal bedraagt de gloeitemperatuur maximaal 730 °C. Voor de ferritische typen ligt deze temperatuur veelal wat hoger tot maximaal 1070 °C voor bepaalde superferrietten. Vooral als de gloeibehandeling tot doel heeft om ongewenste precipitaten weg te gloeien, wordt aanbevolen de gloeitemperatuur boven 1000 °C te kiezen.

2 Hardnen is een warmtebehandeling bij hoge temperatuur gevolgd door snel afkoelen; hardnen is alleen mogelijk bij martensitische staalsoorten.

3 Ontlaten is een warmtebehandeling welke onmiddellijk na het hardnen moet plaatsvinden en die op twee wijzen kan geschieden:

- a) op een zodanig temperatuurniveau (650-750 °C), dat naast het opheffen van de hardingsspanningen door verandering van de structuur, een optimale taaheid wordt verkregen met behoud van een relatief grote hardheid; de corrosievastheid gaat wel achteruit;
- b) op een lager temperatuurniveau (150-400 °C), waardoor de hardingsspanningen ten dele worden opgeheven, maar de hardheid en de corrosievastheid voor het grootste deel behouden blijven; de taaheid is echter minder dan na ontlaten op het hoge temperatuurniveau.

10.2.4 *Precipitatiehardende roestvaste staalsoorten*

Het merendeel van de precipitatiehardende RVS-typen kunnen worden gehard tot tenminste 44 H_{RC} en vaak hoger. Dit vindt echter niet plaats via de conventionele afschrikhardingsmethodes die worden gebruikt voor martensitische RVS-typen. De hardingsmethodes voor deze RVS-soort komen veel meer overeen met die voor non-ferrolegeringen. In het algemeen wordt er eerst verwarmd tot een hoge temperatuur, vervolgens wordt er snel afgekoeld, waarna precipitatie (uitscheiding) plaatsvindt bij een relatief hoge temperatuur.

10.3 *Aanbevolen warmtebehandelingen na het lassen van verschillende typen roestvast staal*

10.3.1 *Spanningsarm gloeien van gelaste verbindingen in austenitisch roestvast staal*

De effecten van lassen op de inwendige spanningen in dit soort staal is nog weinig diepgaand onderzocht. Uit aanwezige informatie valt wel af te leiden dat axiale trekspanningen ter hoogte van de 0,2%-rekgrens aanwezig zijn. In het algemeen is enkele uren gloeien op 900 °C noodzakelijk om 85 tot 100% spanningsrelaxatie te bereiken. Indien gegloeid wordt op 550 à 650 °C wordt nog maar een spanningsrelaxatie bereikt van 30 tot 40%. Bovendien wordt gloeien in laatstgenoemd temperatuurgebied afgeraden in verband met Cr-carbiden-uitscheidingen. Volledige spanningsrelaxatie is nodig als een onderdeel goed bestand moet zijn tegen spanningscorrosie in een agressief milieu; meestal wordt dan gloeien op 900 °C aanbevolen.

10.3.2 *Spanningsarm gloeien van gelaste verbindingen in martensitisch 12%Cr-staal*

In de meeste voorschriften wordt aanbevolen om gelast 12%Cr-staal na het lassen op minimaal 650 en maximaal op ca. 750 °C te ontlaten om brosheid door harde structuren te voorkomen.

Als het er alleen om gaat inwendige spanningen af te bouwen, kan dit worden bereikt door te gloeien bij wat lagere temperaturen.

Uit onderzoek over de afbouw van inwendige spanningen na lassen van 12%Cr-staal is gebleken dat gloeien bij 550 à 600 °C door middel van locale inductieve verhitte, de inwendige spanningen slechts 20 à 25% doet afnemen. Door 2 uur te gloeien in een oven bij 550 à 600 °C is het wel mogelijk tot een spanningsafbouw van 80 à 90% te komen.

10.3.3 *Spanningsarm gloeien van gelaste verbindingen in ferritisch roestvast staal*

Ter verbetering van de ductiliteit van de warmte beïnvloede zone van bijvoorbeeld kwaliteit 1.4016 (AISI 430) is het aan te bevelen de lasverbinding te gloeien bij 700 à 800 °C. De brosheid in de gelaste toestand bij deze staalsoorten wordt veroorzaakt door korrelgroei en 475 °C-brosheid. Zoals reeds eerder opgemerkt in hoofdstuk 8, hebben superferieten wat minder last van 475 °C-brosheid door het lage C-gehalte in deze legeringen.

10.4 *Praktische wenken bij het uitvoeren van de warmtebehandelingen*

Voor het gloeien kunnen de volgende ovens worden gebruikt:

- Gas- of oliegestookte ovens;
- elektrische ovens, onder andere weerstands- en inductieovens;
- voor het harden komen ook zoutbaden in aanmerking.

Voor de warmtebehandeling van werkstukken welke reeds op of nagenoeg op maat zijn bewerkt, is het gewenst dat ovens met beheerste atmosfeer of zoutbaden worden toegepast. In deze gevallen moet namelijk worden voorkomen dat de oppervlakken oxideren of op andere wijze worden aangetast. Men mag niet vergeten dat de warmtebehandeling van roestvast staal in ovens waarvan de atmosfeer bestemd is voor ongelegeerd en laaggelegeerd staal, vaak aanleiding geeft tot oxideren en opkoling bij RVS. Voor zoutbaden geldt hetzelfde, tenzij deze regelmatig worden schoongemaakt en geregenereerd.

Men moet namelijk voorkomen dat door een verkeerd ovenmilieu of door verontreinigingen aan het oppervlak van het werkstuk, de corrosievastheid nadelig wordt beïnvloed. Tevens moet men waken voor te hoge temperaturen en ongewenste vormveranderingen. Daarom nogmaals een opsomming van de punten van aandacht:

- Voordat het werkstuk in de oven wordt gebracht, moet het oppervlak echt vrij zijn van verontreinigingen zoals vuil, merkkrijt, penetrerende vloeistoffen, vet, olieresten, enz.;
- wil men oxidatie voorkomen, dan is het werken in vacuüm of het toevoegen van een inerte of reducerende gasatmosfeer nodig;
- het plaatselijk oververhitten van het werkstuk heeft funeste gevolgen voor het materiaal. Daarom mogen in gas- of oliegestookte ovens de branders niet direct op het werkstuk zijn gericht. Het is noodzakelijk het werkstuk in deze ovens af te schermen. Dit is niet nodig bij weerstands- of inductieovens;
- als de werkstuktemperatuur kritisch is, moet deze, evenals de temperatuurverdeling in de oven, gemeten kunnen worden. Dit geschiedt het beste met behulp van één of meer thermokoppels. Deze dienen zodanig op het werkstuk te worden aangebracht, dat een betrouwbare aanwijzing van de temperatuur van het werkstuk wordt verkregen;
- aandacht verdient ook het opleggen in de oven. Liever geen gebruik maken van gewoon staal of gietijzer in verband met het gevaar van opkoling bij de oplegpunten. Daarom kan men voor dit doel beter een paar roestvaste stalen oplegplaatjes gebruiken;
- voor controle van het staaloppervlak na de warmtebehandeling, zie hoofdstuk 11 en 12.

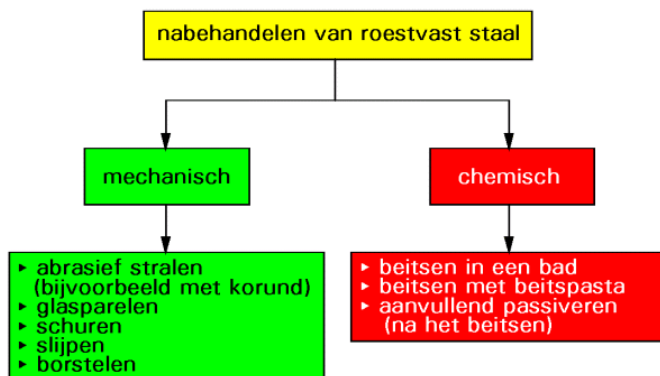
Hoofdstuk 11

Nabehandelingen

11.1 Inleiding

Roestvast staal ontleent zijn corrosievastheid onder meer aan de aanwezigheid van een zeer dunne, dichte, doorzichtige oxidehuid. Deze wordt op een chemisch schoon oppervlak bij blootstelling aan de lucht of aan andere oxidierende atmosferen gevormd.

Bij temperaturen hoger dan 700 °C (bijvoorbeeld tengevolge van lassen, walsen, warmtebehandelen) verloopt het oxidatieproces sneller en wordt een uit meerdere lagen opgebouwde oxidehuid gevormd. Dergelijke oxidelagen schaden het uiterlijk van het roestvast staal (door de donkere kleur) en nog veel belangrijker: verminderen de corrosievastheid. De bij hoge temperatuur opgebouwde oxidelaag bezit geen beschermende werking, onder meer tengevolge van scheurvorming in de oxidelaag veroorzaakt door verschil in uitzettingscoëfficiënt van het oxide en het metaal. Het is dus noodzakelijk deze slechte oxidehuid weer te herstellen. Voor het verwijderen van de aangetaste oxidehuid (verkleuring) kan worden gekozen uit één van de in figuur 11.1 weergegeven nabehandelmingsmethoden.



figuur 11.1 Methoden voor het nabehandelen van roestvast staal

Teneinde het daar opvolgende regenereren van het corrosiewerende oxidehuid snel en beheerst te laten verlopen, wordt een passivering toegepast. Deze komt hierop neer dat de oxidatie met behulp van een chemisch middel snel en gelijkmatig plaatsvindt, onder de meest gunstige omstandigheden.

Nadere bijzonderheden over genoemde oppervlaktebehandelingen zoals stralen, beitsen en passiveren zijn onder § 11.3 opgenomen. Hieronder volgt eerst een beknopt overzicht van de werkwijzen bij nabehandelingen in verband met lassen en/of warmtebehandeling.

11.2 Verwijderen van ongewenste oxidelagen

11.2.1 Oxiden die ontstaan door plaatselijke verhitting tengevolge van het lassen

Deze oxiden bestaan in het algemeen uit betrekkelijk dunne lagen welke grotendeels kunnen worden verwijderd door schuren met staalwol of borstelen met staalborstels uit austenitisch Cr-Ni-staal. Zijn de oxidelagen hiervoor te dik, dan moet men overgaan tot slijpen. Eventueel kan in plaats van slijpen een straalbewerking worden toegepast (zie onder § 11.3.1).

Deze mechanische methoden van nabehandelen zijn niet altijd afdoende om de oxidelaag volledig te verwijderen, in dit geval kan hierna nog een beitsbehandeling worden uitgevoerd. Omdat de hier besproken oxidatie (verkleuring) slechts op en in de directe omgeving van de lassen voor-

komen, kan het beitsmiddel in vloeibare vorm met een kwast, als pasta of door middel van een spuitbus worden opgebracht.

11.2.2 Oxiden die ontstaan bij een warmtebehandeling in een oven boven 700 °C

Als geen vacuüm of een beschermgas wordt toegepast, vormen de oxiden zich bij deze hoge temperatuur over het hele oppervlak van het werkstuk. Bovendien zijn deze lagen aanmerkelijk dikker door de veel langere verhitingsduur. Het verwijderen ervan geschiedt niet alleen om het uiterlijk, maar ook om de corrosievastheid te verbeteren. De bij verhitting gevormde oxidehuid bestaat uit meer lagen, waarbij elk nieuw gevormde laag de onderliggende lagen min of meer afschermt. Zo ontstaat een gelaagde structuur met een van buiten naar binnen afnemende oxidatiegraad. Het meest geoxideerde materiaal van de buitenste laag is zeer hard en bestand tegen aantasting door zuren. Dit zou betekenen dat men voor het verwijderen ervan is aangevozen op mechanische middelen, hetgeen echter wegens de hardheid op bezwaren stuit.

Beitsen van deze lagen is echter wel mogelijk door de eerder genoemde scheurvorming in de laag. Hierdoor kan de beitsvloeistof zijn weg vinden naar de onderliggende, gemakkelijker oplosbare oxidelagen. Na een beitsbehandeling komen daardoor de buitenste lagen los te liggen, waardoor deze dan gemakkelijker mechanisch kunnen worden verwijderd. Herhaalt men dit eventueel enige keren, dan is het uiteindelijk mogelijk alle oxiden te verwijderen (wel oppassen voor een te sterke aantasting op andere plaatsen). Indien niet moet worden gepolijst, is het meestal doelmatig - ter besparing van tijd en kosten - eerst een zo groot mogelijke hoeveelheid van de oxiden door stralen te verwijderen en pas daarna te beitsen.

In tabel 11.1 is een overzicht gegeven van aanbevolen werkwijzen na lassen en warmtebehandelen.

tabel 11.1 Overzicht van aanbevolen werkwijzen na lassen of warmtebehandeling

na:	mechanische nabewerking	chemische nabewerking	eindbewerking
lassen	schuren met roestvaste staalwol	beitsen	passiveren
	borstelen met roestvaste staalwol	beitsen	passiveren
	slijpen-polijsten	–	event. passiveren
	straalreinigen	–	passiveren
gloeien	geen nabewerking	beitsen met tussentijds borstelen	passiveren
	straalreinigen	–	passiveren

11.3 Stralen, beitsen en passiveren van roestvast staal

11.3.1 Stralen

Stralen, beter gritstralen of korrelstralen, wordt uitgevoerd met straalmiddelen die niet schadelijk zijn voor het roestvast staal. Staalgrit of koperslak worden daarom niet gebruikt. Straalmiddelen die wel toepassing vinden zijn: roestvast staalgrit, glasparels of keramische parels. Voor al deze straalmiddelen geldt dat het gehalte ijzeroxide erin niet hoger mag zijn dan 0,1 gewichtsprocent.

Voor straalbewerkingen kunnen onder andere korund en zirkoonsilicaat worden gebruikt.

In tabel 11.2 is een overzicht gegeven van de straalmiddelen voor toepassing op roestvast staal.

tabel 11.2 Straalreinigingsmiddelen voor toepassing op roestvast staal

aanduiding	samenstelling	percen- tage vrij kwarts	s.m. [g/cm ³]	hardheid volgens	
				Mohs [H]	Vickers [HV10]
blastyte kunstkorund ASO korund amaril sonometha corindon	Al ₂ O ₃ (aluminium- oxide)	< 1%	3,77	9 - 10	1720...2720 gemiddeld 2135
zircosil abrazir zirkoonzand	ZrSiO ₄ (zirkoon- silicaat)	< 1%	4,60	ca. 7	750...1250
metcolite	mengsel van SiC (carborun- dum) en Al ₂ O ₃	< 1%	3,95	9 - 10	1970...2570 gemiddeld 2270
forsterietzand	MgSiO ₄ (magnesium- silicaat)	< 1%	2,94		400... 700

Omdat een ruw oppervlak sterker corrodeert dan een glad oppervlak en bij roestvast staal de beschermende oxidehuid zich na het straalreinigen niet voldoende regelmatig kan vormen, is het aan te bevelen het te behandelen oppervlak zo klein mogelijk te houden. Dit kan gebeuren door het omliggende oppervlak af te schermen door middel van bijvoorbeeld rubber of hardboardstroken. Als het oppervlak als eindbewerking moet worden gepolijst, dan liever niet eerst straalreinigen.

Bij het parelstralen met glas of keramische parels worden vrijwel volmaakt ronde bolletjes gebruikt, die in diverse diameters worden geleverd. Belangrijk is dat de parels bij het stralen zo weinig mogelijk breken. Deze 'break down rate' wordt zowel bepaald door de kwaliteit van de parels als door de straalmethode. Keramische parels versplinteren veel minder snel dan glaspereels en resulteren daardoor in een lagere ruwheid. Vooral lasnaden worden vaak droog met parels gestraald. Er wordt bij het parelstralen zeer weinig materiaal afgenomen en er ontstaat een fraai satijn-glanzend oppervlak.

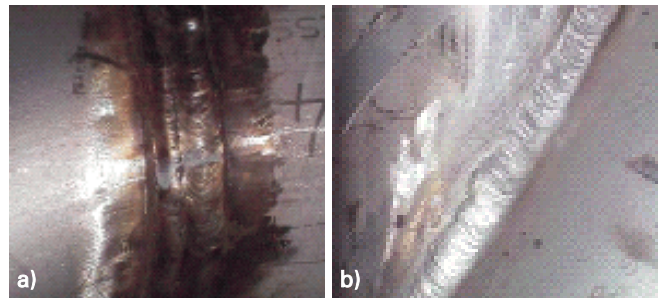
11.3.2 Beitsen

Het beitsen van roestvast staal kan om de volgende reden uitgevoerd worden:

1. Verwijderen van onstabiele, gedeeltelijk actieve oxide-lagen en vreemde metaaldeeltjes.
2. Verbeteren van het uiterlijk.
3. Het oppervlak chemisch schoon maken (een belangrijke voorwaarde voor een goede, daarop aansluitende passivering).

Een beitsbehandeling is de enige nabehandelmingsmethode die de corrosiebestendigheid van de lasverbinding terug-

brengt op het niveau van het oorspronkelijke uitgangsmateriaal. Dit geldt onafhankelijk van de staalsoort. Ten aanzien van het beitsen bestaat er geen verschil in effectiviteit tussen dopen in een bad of gebruik van een beitspasta. Figuur 11.1 a en b geven een overzicht van een onbehandelde las en een gebeitste las.



figuur 11.1 Weergave van de las direct na het lassen (a) en na het ondergaan van een beitsbehandeling (b) [23]

Er zijn vele recepten voor beitsmiddelen, maar slechts enkele worden breed toegepast. Deze zijn gebaseerd op zwavelzuur, salpeterzuur, zoutzuur en/of waterstoffluoride (fluorwaterstofzuur). De volgende middelen komen in aanmerking voor het beitsen:

- Beitsmiddelen op basis van salpeterzuur en fluorwaterstofzuur (meest gebruikt);
- beitsmiddelen op basis van zwavelzuur;
- beitsmiddelen op basis van zoutzuur (hierbij wordt ijzer(III)chloride gevormd: gevaar voor putcorrosie!);
- beitsmiddelen op basis van ijzer(III)sulfaat (veel gebruikt bij de fabricage van roestvaste staalplaat).

Een bruikbare samenstelling voor een beitsbad is 22 gew.% salpeterzuur met 5 gew.% waterstoffluoride. Bij een beits-temperatuur van 20 °C zijn geschikte beits tijden:

- conventioneel austenitisch RVS : 1-4 uur
- hooggelegeerd austenitisch RVS : 2-24 uur
- duplex roestvast staal : 6-48 uur

De beits temperatuur heeft een sterke invloed op de vereiste beits tijd: iedere 10 °C verlaging, betekent een verdubbeling voor de beits tijd.

Beitsen van roestvast staal na een warmtebehandeling

Samenstellingen van in aanmerking komende beitsvloei-stoffen zijn aangegeven in tabel 11.3.

De juiste samenstelling kan nog variëren met de aard van de aanwezige oxidehuid en de chemische samenstelling van de te behandelen staalsoort. De voor beitsen beschik-

tabel 11.3 Beitsoplossingen en werkvolgorde voor het verwijderen van oxidelagen van warmtebehandelingen

1e beitsbad	spoelen en borstelen	2e beitsbad	spoelen en borstelen	opmerkingen	toepasbaar op staalsoort
6...8 vol. delen H ₂ SO ₄ (s.m. 1,84) 2...4 vol. delen HCl (s.m. 1,19) aanvullen met water tot 100 vol. delen. beits temperatuur: 60...70 °C	met heet water en borstel	22 vol. delen HNO ₃ (s.m. 1,42) 2 vol. delen HF (s.m. 1,185; 70% tech- nisch zuiver) aanvullen met water tot 100 vol. delen. beits temperatuur: 55...60 °C	met heet water en borstel	bad 1: voor zeer zware oxidelagen bad 2: als nabehande- ling na bad 1 Bij dunne oxidelagen kan worden volstaan met bad 2	austenitisch Cr-Ni-staal
10 liter H ₂ SO ₄ (s.m. 1,84) 2,6 kg NaCl aanvullen met water tot 100 liter. beits temperatuur: 70...80 °C	met heet water en borstel	25 vol. delen HCl (s.m. 1,19) 3 vol. delen HNO ₃ (s.m. 1,42) aanvullen met water tot 100 vol. delen beits temperatuur: 65...70 °C	met heet water en borstel	als boven; indien het uiterlijk te dof wordt, moet iets HNO ₃ worden toegevoegd	austenitisch Cr-Ni-staal en voor ferritische en martensi- tische chroomstaal- soorten

N.B. Zie voor toepassing beitsrem en controle op putvormige aantasting ook in tekst

bare zuren tasten het roestvast staal aan. Daarom is de toevoeging van een beitsrem aan dergelijke beitsmiddelen soms noodzakelijk. Een aantal zeer goede beitsremmen is in de handel verkrijgbaar. Het is echter aan te bevelen vooraf de werkzaamheid van de beitsrem te controleren. Men moet er ook op letten dat bij het beitsen de benodigde dompeltijd afhankelijk is van de vervuiling en dat deze tijd ook sterk wordt beïnvloed door de temperatuur. Langer beitsen dan noodzakelijk moet altijd worden vermeden.

Na het beitsen en/of passiveren moet men ook zeer grondig spoelen, ongeacht welk beitsbad men heeft gebruikt. Als resten van zoutzuur, zwavelzuur of salpeterzuur achterblijven, zal hierdoor later de oxidehuid worden verstoord en kan corrosie het gevolg zijn.

Dus zeker daar waar spleten aanwezig zijn, moet men er op toezien dat er grondig wordt gespoeld. Als men er niet zeker van is dat het beitsmedium niet in spleten kan komen, doet men er beter aan het onderdeel niet te beitsen.

Veel beter is het dan om de onderdelen vóór de montage te beitsen. Gedacht kan hierbij worden aan bijvoorbeeld pijpen in pijpenplaten, die aan de uitmondzijden worden gelast. Hierbij kan men er namelijk van uitgaan dat er steeds spleten aanwezig zijn tussen pijp en pijpplaat.

Alle zuurbaden geven, indien zij uitgeput raken, kans op putvormige corrosie van austenitisch Cr-Ni-staal en van chroomstaal. Het vrije zuur wordt namelijk omgezet in chroom-nikkel- en ijzertzouten die, als de concentratie te hoog wordt, putvormige corrosie kunnen veroorzaken. Daarom moet het bad vóór elk nieuw gebruik worden beproefd met behulp van een stukje afvalplaat van het te beitsen object, door dompelen gedurende 15-20 minuten bij de bedrijfstemperatuur. Indien de geringste neiging tot putvormige corrosie wordt geconstateerd, moet het bad in zijn geheel te worden verversd.

Beitsen van roestvast staal na een lasprocedure

1) Dompelen

Onderdompeling in een bad gedurende een bepaalde tijd is de meest elegante methode. Grotere voorwerpen worden met behulp van nylonstropen in het bad geplaatst. Bij kleine onderdelen is een beitskorf een handig hulpmiddel. Ook een trommelapparaat is heel praktisch, als regelmatig kleine voorwerpen moeten worden gebeitst. Gewoonlijk zal na het lassen kunnen worden volstaan met een enkel beitsbad (bijvoorbeeld $\text{HNO}_3\text{-HF}$) en een dompelperiode van 5-10 minuten. Als het metaaloppervlak na spoelen in water en gelijktijdig borstelen nog niet blank is, dan moet de gehele behandeling worden herhaald. De behandeling met een spoelborstel is belangrijk; loszittende resten van de laag worden daardoor verwijderd. Hierdoor wordt voorkomen, dat de beitsbehandeling zonder noodzaak wordt herhaald of te lang wordt voortgezet.

2) De ABC-methode

Bij de ABC-methode worden de werkstukken gereinigd, gebeitst en gepassiveerd in één behandeling; dit kan, omdat bij de pasta's gebruik wordt gemaakt van oxiderende zuren. De procedure is als volgt:

- De lasnaden insmeren met beitspasta;
- terwijl de pasta nog doorwerkt, worden de vlakken met behulp van een zuurbestendige spons bewerkt met vloeibare beits;
- na voldoende inwerktijd worden de voorwerpen afgespoeld met koud water tot ze geheel zuurvrij zijn.

3) Werken met sproeibeits

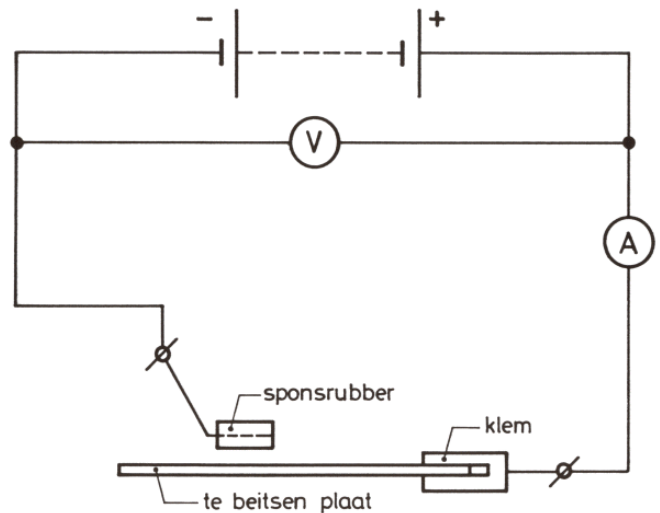
Sproeibeits is een enigszins verdikte beitsoplossing, waarbij het verdikkingsmiddel geheel bestaat uit een oppervlaktespanningverlagende stof, zodat een optimale spreiding op het metaaloppervlak wordt gewaarborgd. Het werken met sproeibeits is een goede keuze als voorwerpen moeten worden gebeitst die te groot of te bewerkelijk zijn voor de ABC-methode en men geen beitsbad bezit. Sproeibeits wordt aangebracht op de

werkstukken met een lagedruk spuit.

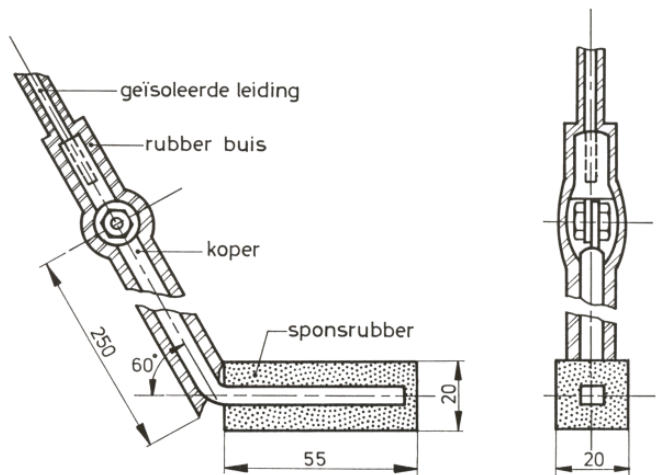
Ook sproeibeits reinigt, beitsd en passiverd in één behandeling. Het verkrijgen van een gelijkmatig uiterlijk vraagt echter ervaring in het sproeien.

4) Elektrolytisch beitsen

Een niet algemeen gebruikte beitsmethode is het elektrolytische proces. Bij dit proces wordt het oppervlak aangesloten op de + pool van een gelijkstroombron. Een met de -pool verbonden koperen elektrode, waaraan een met beitsvloeistof gedrenkt sponsje is bevestigd, wordt langzaam over het metaaloppervlak bewogen. De schakeling en de apparatuur zijn schematisch weergegeven in figuur 11.3 en 11.4



figuur 11.3 Schakelschema voor elektrolytisch beitsen



figuur 11.4 Kathode voor elektrolytisch beitsen

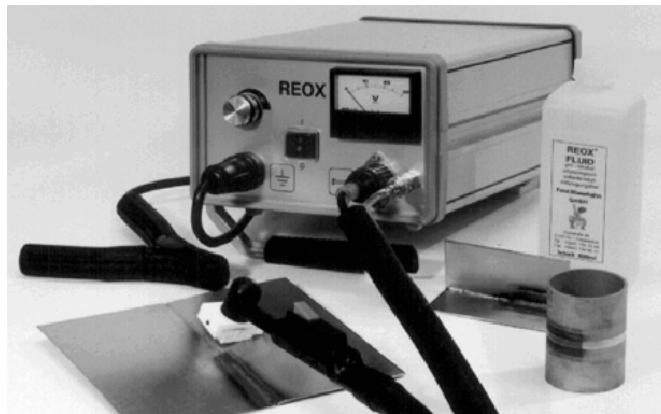
Als beitsvloeistof wordt hierbij een 50%-oplossing van orthofosforzuur (H_3PO_4) in water gebruikt. Bij een spanning van 10 V en een stroomdichtheid van $0,5 \text{ A/cm}^2$ (stroom per oppervlakte-eenheid van het sponsje) kan snel en zonder hinderlijke gasontwikkeling worden gewerkt. Voor zware oxidelagen verdient het aanbeveling de zuurconcentratie, de spanning en de stroomdichtheid iets te verhogen. Afwisselend borstelen versnelt het proces eveneens.

Er zijn tegenwoordig speciale apparaten in de handel die het mogelijk maken lokaal door middel van het elektrolytisch beitsen lasnaden en hun directe omgeving schoon te maken (zie figuur 11.5 en 11.6).

Over het algemeen zijn dit soort apparaten geschikt voor zowel het reinigen en passiveren in één handeling. Het oppervlak verkrijgt na het reinigen weer zijn oorspronkelijke



figuur 11.5 Elektrolytisch beitsapparaat (Fronius)



figuur 11.6 Elektrolytisch beitsapparaat (Reox)

uiterlijk. Met dit soort apparaten kunnen roestvaste staal-soorten tot hoogglans worden gepolijst. Het belangrijkste toepassingsgebied van deze apparaten is vooral gericht op dunne plaat en pijp, waarbij de maximale materiaaldikte die (economisch) kan worden behandeld ongeveer 4 mm bedraagt. De gemiddelde snelheid waarmee materiaal kan worden gereinigd is ca. 150 mm per minuut.

Veiligheids- en milieu-aspecten bij het beitsen

In de praktijk blijkt dat het nog steeds nodig is te waarschuwen voor de gevaren van beitsmiddelen voor het menselijk lichaam. Behalve de "gewone" zuren zoals zwavelzuur, salpeterzuur en zoutzuur is met name ook fluorwaterstof (HF) uiterst gevaarlijk voor de huid. Tegen de beitsvloeistoffen kan men zich wapenen door het dragen van zuurbestendige, vochtdichte kleding en een gesloten veiligheidsbril. Ook voor het kleinste karwei, waarbij beitsmiddelen betrokken zijn, moet men de zuurbestendige bril opzetten en veiligheidshandschoenen aantrekken. Er is nog een tweede gevaar bij het beitsen. Door de reactie tussen het metaal en de sterke zuren in het beitsmiddel, ontstaat gasvorming. Hierin is altijd waterstof aanwezig, dat erg brandbaar is. Bij het beitsen met salpeterzuur komen er boven het beitsbad nitreuze dampen vrij. Dit zijn mengsels van stikstofoxiden die gevaarlijk zijn voor de longen. Om contact met de lippen te vermijden en wegens brandgevaar in ieder geval nooit roken.

Goede ventilatie op de werkplek is noodzakelijk, bij voorkeur door middel van directe afzuiging boven het beitsoppervlak en toevoer van verse lucht. Direct boven de beitsbak werken is ontoelaatbaar. Is zo'n situatie toch onvermijdelijk dan moet in ieder geval een adembescherming worden gedragen.

Het schoonspuiten van met beitspasta of met sproeibeits behandelde voorwerpen, levert een hoeveelheid spoelwater op, die niet rechtstreeks in het riool geloosd mag worden:

- Ook in grote verdunning is dit spoelwater nog zuur en zou het de betonnen riolering kunnen aantasten.

- In het water komen van het beitsproces afkomstige, schadelijke zware metalen voor, die milieubelastend zijn.

11.3.3 Passiveren

Roestvaste staalsoorten danken hun corrosievastheid in hoofdzaak aan de zeer dunne oxidelaag welke zich vormt op een chemisch schoon oppervlak bij blootstelling aan de buitenlucht of aan andere oxiderende atmosferen.

Deze oxidelaag moet, om een zo groot mogelijke corrosievastheid te bezitten, volkomen gaaf en dicht zijn. Om het vormen van deze laag te versnellen en om de oxidelaag zo gelijkmatig mogelijk te laten worden, is het aan te bevelen het materiaal na elke eindbewerking van mechanische, chemische of thermische aard, door middel van bepaalde zuren of een mengsel van zuren, te passiveren. Aanwezigheid van vet of olie verhindert de vorming van een goede oxidehuid ter plaatse; poedervormige stoffen in de vorm van metaalspanen, slijpmiddelen of stof veroorzaken beschadigingen van de passiveringslaag. Het is daarom noodzakelijk vóór het passiveren het oppervlak grondig te ontdoen van stof, vet, olie, slijpmiddelen en andere onzuiverheden.

Passiveermiddelen

Er worden in de praktijk vele samenstellingen gebruikt voor het passiveren van roestvast staal. Het is mogelijk dit soort mengsels zelf te maken, ze zijn echter ook kant-en-klaar beschikbaar in de markt. Dit laatste verdient aanbeveling, omdat het zelf samenstellen van dit soort middelen deskundig en onder gecontroleerde omstandigheden moet plaatsvinden.

Indien er behoefte is om toch zelf aan de slag te gaan, zijn de volgende twee samenstellingen goed bruikbaar gebleken:

- Meng 15 liter salpeterzuur (HNO_3 , s.m. 1,42) in 85 liter water en verwarm deze tot 55 à 60 °C. Het te behandelen object wordt 15-20 minuten in deze oplossing gedompeld. Vervolgens borstelt men schoon met heet water en spoelt na met schoon water.

Deze samenstelling wordt in de praktijk het meest toegepast; ook bij lagere temperaturen dan aangegeven; in dat geval is een langere behandeling gewenst.

- Meng 15 liter salpeterzuur (HNO_3 , s.m. 1,42) in 85 liter water en los daarin 2,2 kg natriumbichromaat ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) op, waarna wordt verwarmd tot 45 à 55 °C. Het te behandelen object wordt 30 minuten in deze oplossing gedompeld en daarna 1 uur in een oplossing van 5 gew.% $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ in water van 60 à 70 °C. Vervolgens borstelt men het object met schoon heet water en spoelt men na met schoon koud water.

Deze samenstelling wordt vooral gebruikt voor zeer fijn geslepen of gepolijste oppervlakken.

11.4 Controleren van het oppervlak na de verschillende bewerkingsprocessen

Als roestvast staal wordt bewerkt met niet roestvaste stalen gereedschap, zoals een staalborstel, slijpschijf, hamer of beitel, kan er vreemd materiaal in het roestvast staal worden ingebracht. Ook als in dezelfde werkplaats staal en roestvast staal naast elkaar worden gebruikt (iets dat altijd vermeden moet worden) is het mogelijk dat niet-roestvast staal deeltjes op of in het oppervlak terecht komen (contaminatie). Deze deeltjes moeten door beitsen worden verwijderd. Na het beitsen moet gecontroleerd worden of er geen vreemd materiaal meer aanwezig is op het oppervlak van het roestvast staal. Ter controle van vreemde metaaldeeltjes op het oppervlak kan de ferroxytest worden gebruikt. Er zijn echter nog andere testmethoden, zoals de koperammoniumsulfatetest en de NaCl-test die vreemde deeltjes op het metaaloppervlak aan kunnen tonen.

Hoofdstuk 12

Kwalificatie, inspectie en onderzoek [24]

12.1 Inleiding

Bij constructies in roestvast staal zullen we veel te maken hebben met drukvaten en leidingen. Na een overgangstermijn van 2,5 jaar is enige jaren geleden de PED (Pressure Equipment Directive van kracht geworden. Een onafhankelijke keuringsinstantie moet nu toetsen of aan alle voorwaarden is voldaan. De fabrikant blijft echter eindverantwoordelijk voor zijn producten en is dus productaansprakelijk. De Drukapparaten Richtlijn of PED stelt zogeheten essentiële veiligheidseisen aan het product. Deze richtlijn wordt doorgetrokken voor de gebruiksfase, waarbij op nationaal niveau bepaald is waar de installatie aan moet voldoen. Naarmate de veiligheidsrisico's toenemen, zijn de eisen met betrekking tot keuring en toezicht stringenter. Drukapparaten die aan de eisen van de PED voldoen, moeten door de Nobo (Notified Body) worden voorzien van een CE markering, deze laat dit echter praktisch bijna altijd door de fabrikant doen. Dit betekent dat het apparaat vrij verhandeld mag worden binnen de lidstaten van de EU en de EVA landen (Noorwegen, IJsland, Lichtenstein). De PED vermeldt dat voor het maken van alle permanente verbindingen de procedure en het uitvoerende personeel gekwalificeerd moeten zijn. We beperken ons tot de bespreking van de normen van de twee meest toegepaste permanente verbindingstechnieken: lassen en solderen. Uitgaande van de PED kunnen vijf hoofdwegen worden gevolgd: lassers-, lasoperator-, soldeerder-, lasprocedure- en soldeerprocedurekwalificatie (zie figuur 12.1).

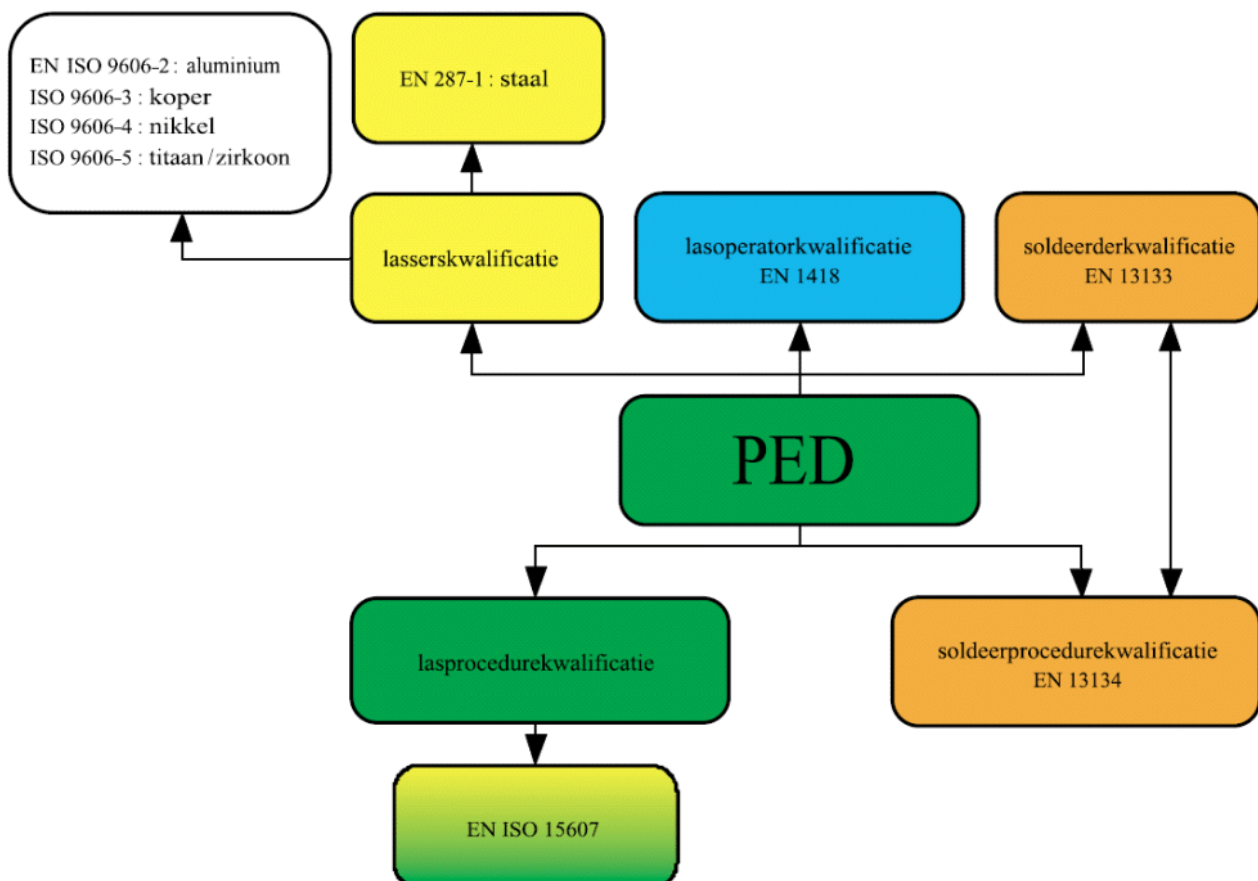
Ten aanzien van de (in dit hoofdstuk) genoemde normen is het verstandig de laatste actuele stand te raadplegen op

de website van de NEN: www.nen.nl, daar er regelmatig wijzigingen plaatsvinden op dit gebied en de actualiteit dus lastig vast te leggen is. Het flow-diagram uit figuur 12.2 bevat verder referenties van normen waarnaar wordt verwezen in de hoofdnormen. Bij de lasserskwalificatie bijvoorbeeld moet er destructief en niet-destructief onderzoek worden uitgevoerd. Het flow-diagram geeft aan welke normen hiervoor moeten worden gebruikt. Het is echter onmogelijk om al deze normen in detail te behandelen. Het flow-diagram uit figuur 12.2 kan worden gebruikt als een wegwijzer voor deze minder bekende normen. Wel moet er opgemerkt worden dat normalisatie een proces is dat continu evolueert, dus in de toekomst is het mogelijk dat dit flow-diagram verandert. Om herhaling van sommige normen, die bijvoorbeeld zowel gebruikt worden bij een lasserskwalificatie als bij lasprocedurekwalificatie, te voorkomen is er in het flow-diagram gebruik gemaakt van verwijzingen door middel van letters. NEN-EN 970 (visueel onderzoek) heeft in het schema bijvoorbeeld de verwijzing "d" meegekregen. Het normnummer wordt in het schema één keer vermeld en voor de rest wordt de verwijzing "d" gebruikt.

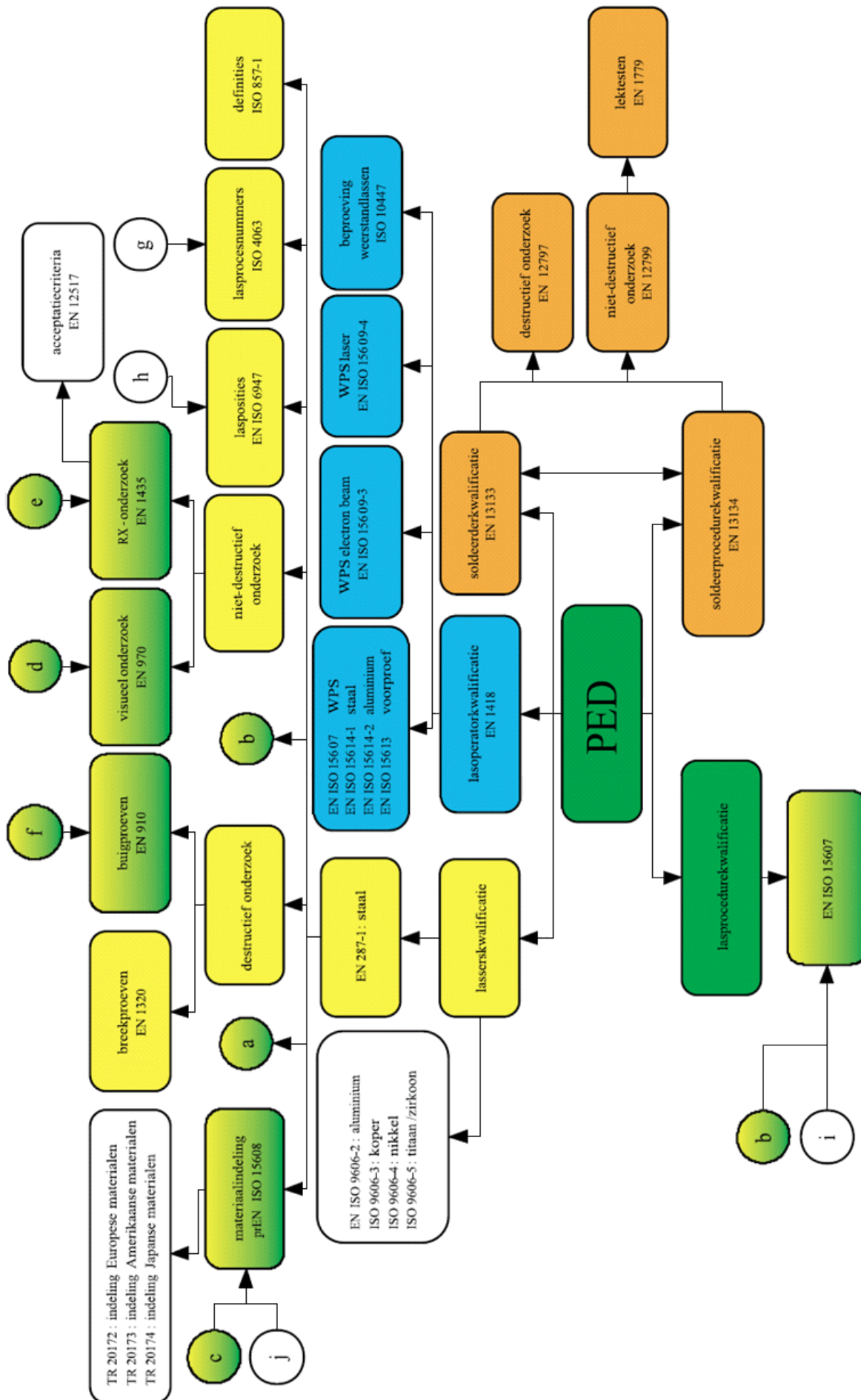
Voor het kwalificeren van laswerk (voor solderen geldt hetzelfde) is een gedegen voorbereiding noodzakelijke die start met de lasmethodebeschrijving (LMB).

12.2 Lasmethodebeschrijving

In de lasmethodebeschrijving (LMB, in het Engels: WPS - "Weld Procedure Specification") - ook wel lasprocedure genoemd - wordt beschreven hoe de las moet worden opgebouwd. De lasmethodebeschrijving is de basis die ervoor moet zorgen dat de las het voorgeschreven kwaliteitsniveau zal halen en dat de mechanische eigenschappen voldoen aan de gespecificeerde waarden. In de lasmethodebeschrijving worden gedetailleerd de variabelen weergegeven, zoals het aantal lagen, het toevoegmateriaal, het te gebrui-



figuur 12.1 Uitgaande van de PED richtlijn kunnen vijf hoofdwegen worden gevolgd: lassers-, lasprocedure-, lasoperator-, soldeerder-, en soldeerprocedurekwalificatie



figuur 12.2 Meer gedetailleerde uitwerking van figuur 12.1

ken proces, de laspositie, de lasnaadvorm, de lasstroom, de voorwarmtemperatuur, enzovoort. Gewoonlijk worden voor ieder nieuw project, waarvoor een LMB vereist is, nieuwe procedures geschreven. Vervolgens worden deze door alle partijen (werkplaats, opdrachtgever, inspectie-instantie) voor akkoord getekend. De procedures moeten zichtbaar opgehangen zijn op de werkplek, zodat eenvoudig vastgesteld kan worden of de lasser werkt volgens de WPS. De WPS wordt vergezeld van een aantal documenten (bijvoorbeeld een rapport, waarin vermeld hoe de las is vervaardigd, NDO, resultaten van mechanische beproevingen) die gezamenlijk de "lasprocedure" vormen, of - zoals in de norm wordt genoemd - de WPAR (EN288) of PQR (ASME). Zowel in de Europese norm als in de ASME code, wordt één aantal "essentiële variabelen" gespecificeerd die, wanneer ze wijzigen, effect kunnen hebben op de laskwaliteit of op de mechanische eigenschappen. Daarom vereist een wijziging in een van deze essentiële variabelen dat een nieuwe kwalificatieproef wordt uitgevoerd.

12.3 *Lasserskwalificatie*

Een lasser (booglassen van staal en roestvast staal) kan worden gekwalificeerd volgens de "nieuwe" NEN-EN 287-1. Deze norm werd in 2004 gepubliceerd en na een overgangsperiode in de Nederlandse normering opgenomen. Dus vanaf 2004 moet deze norm worden gebruikt voor de kwalificatie van een lasser voor het lassen van staal. Voor een lasserskwalificatie volgens NEN-EN 287-1 moet een lasser een gestandaardiseerd proefstuk lassen. Het gelaste proefstuk moet door middel van niet-destructief (visueel, radiografisch) onderzoek en/of destructief onderzoek (radiografisch onderzoek mag vervangen worden door buig- of breekproeven) gecontroleerd worden. Voor de evaluatie van het visueel onderzoek moet de NEN-EN-ISO 5817 (staal) worden toegepast. Deze norm beschrijft drie kwaliteitsniveaus voor de beoordeling van lasfouten. Een lasserskwalificatie moet voldoen aan het strengste niveau (B), behalve voor geometrische fouten is niveau C voldoende. De meest recente versie van deze norm dateert van 2007. Voor de lasserskwalificatie voor het lassen van aluminium kan de NEN-EN-ISO 9606-2 worden toegepast. Deze norm werd in december 2005 gepubliceerd. Het visueel onderzoek van een proefstuk in aluminium moet worden geëvalueerd aan de hand van de NEN-EN-ISO 10042. Deze norm is net als de NEN-EN-ISO 5817 opgebouwd volgens drie kwaliteitsniveaus. Vervolgens bestaan er nog een drietal minder bekende ISO normen die gebruikt worden voor de kwalificatie van een lasser voor het lassen van koper (NEN-EN-ISO 9606-3), nikkel (NEN-EN-ISO 9606-4), alsmede titaan en zirkoon (NEN-EN-ISO 9606-5).

12.4 *Lasoperatorkwalificatie*

Een lasoperator is een persoon die een lasmachine bedient. De kwalificatie gebeurt volgens NEN-EN 1418. Een lasoperator is gekwalificeerd indien hij/zij een lasprocedure (volgens NEN-EN 288-3) op een correcte manier kan uitvoeren, zodanig dat het gelaste proefstuk de gewenste eigenschappen (visueel, mechanisch, enz.) bezit.

12.5 *Soldeerderkwalificatie en soldeerprocedurekwalificatie*

Deze Europese normen (NEN-EN 13133: soldeerkwalificatie en NEN-EN 13134: soldeerprocedurekwalificatie) zijn twee minder bekende normen. Eerst en vooral omdat er minder gesoldeerd dan gelast wordt en misschien ook omdat deze normen geen echt duidelijk antwoord bieden op technische vragen uit de praktijk. Zo is bijvoorbeeld het gebied van een soldeerprocedurekwalificatie niet eenduidig vastgelegd, dit in vergelijking met het gedeelte "Brazing" in ASME IX, waar dit wel terdege is uitgewerkt.

12.6 *Lasmethodekwalificatie*

"De 288-3" is in de laswereld een welbekende uitspraak, maar daar is in 2004 een einde aan gekomen. In de toekomst moet de lasmethode (voor het booglassen van staal) gekwalificeerd worden volgens NEN-EN-ISO 15614-1. Het nummer is er in ieder geval niet eenvoudiger op geworden en past in een volledig nieuw systeem van normen. Het algemene deel van deze reeks normen is de NEN-EN-ISO 15607. Deze norm beschrijft onder andere op welke verschillende manieren een methode kan worden gekwalificeerd:

- ▶ door gebruik te maken van geteste toevoegmaterialen (NEN-EN-ISO 15610),
- ▶ op basis van eerder verworven ervaring (NEN-EN-ISO 15611),
- ▶ door gebruik te maken van een standaard lasprocedure (NEN-EN-ISO 15612),
- ▶ door gebruik te maken van een productie-voorproef (NEN-EN-ISO 15613),
- ▶ op basis van een lasmethodebeproeving (NEN-EN-ISO 15614-x).

Tevens bevat de NEN-EN-ISO 15607 een schema, waaruit kan worden opgemaakt welke normen gebruikt moeten worden op basis van de toegepaste lasprocessen en de te lassen basismaterialen.

NEN-EN-ISO 15614- 1, veruit de belangrijkste norm, werd gepubliceerd in juni 2004, en is dus sinds december 2004 officieel de vervanger van EN 288-3.

12.7 *Productaansprakelijkheid*

"De producent is aansprakelijk voor de schade, veroorzaakt door een gebrek in zijn product" zo luidt artikel 1 van de EG-richtlijn 85/374 van 25 juli 1985, waarbij onder artikel 3, punt 1 onder producent wordt verstaan "de fabrikant van een eindproduct, alsmede een ieder die zich als producent presenteert door zijn naam, zijn merk of een ander onderscheidingsteken op het product aan te brengen".

De EG-richtlijn is alleen van toepassing op roerende goederen die industrieel zijn vervaardigd, ongeacht of zij nu wel of niet een bestanddeel vormen van een ander goed of gebouw.

De richtlijn bepaalt het principe van de objectieve aansprakelijkheid of aansprakelijkheid buiten schuld van de producent in geval van schade veroorzaakt door een gebrek in zijn product. Indien verscheidene personen aansprakelijk zijn voor dezelfde schade, is elk hunner hoofdelijk aansprakelijk. Als producent worden beschouwd:

- ▶ Elke deelnemer aan het productieproces;
- ▶ elke importeur van het gebrekkige product;
- ▶ elke persoon die zijn naam, zijn merk of een ander onderscheidingsteken op het product aanbrengt;
- ▶ elke persoon die een product levert waarvan de producent niet kan worden vastgesteld.

Bewijslast; de benadeelde moet:

- ▶ het bestaan van de schade bewijzen;
- ▶ het gebrek van het product bewijzen;
- ▶ het oorzakelijk verband tussen de schade en dit gebrek bewijzen.

In het kader van de objectieve aansprakelijkheid als bedoeld in de richtlijn, hoeft de nalatigheid of de schuld van de producent of importeur dus niet te worden aangetoond. Uit bovenstaande blijkt dat de kwaliteit van het product, mede door goede - schriftelijk vast te leggen - afspraken, controles en rapportering, van groot belang is. Dit is de reden dat vrijwel alle bedrijven werken met een kwaliteitsborgingssysteem.

12.8 *Kwaliteitsborging*

De filosofie van de normen en voorschriften is primair het waarborgen van de veiligheid van de constructie als deze in bedrijf is. Er zijn talloze schadegevallen bekend, waarvan de oorzaak is terug te voeren op fabricage-/montagefouten. Om deze zoveel mogelijk uit te sluiten, is een doelmatige kwaliteitsborging bij de fabricage/montage belang-

rijk. Voor gelaste installaties betekent dat in eerste instantie een goede kwaliteitsbeheersing bij het lassen. In tabel 12.1 is een schema te zien waarin de filosofie van een geschikte werkwijze is weergegeven. In de volgende paragrafen zal dit schema op verschillende punten worden uitgewerkt. Verwezen wordt echter vooral naar de voorlichtingspublicatie VM 85 "Kwaliteitsborgingsaspecten bij de vervaardiging van gelaste constructies" [25].

12.9 *Kwaliteitsonderzoek ten behoeve van gelaste constructies*

12.9.1 *Niet-destructief onderzoek (NDO)*

De toe te passen NDO-methoden en de acceptatiecriteria staan veelal omschreven in de betreffende codes of klantenspecificaties. Toch is hierin vaak onvoldoende vastgelegd. Dan verdient het de voorkeur aanvullende zaken (als uitvoering van het onderzoek en acceptatiecriteria) alsnog van tevoren vast te leggen.

De principes van het Niet Destructief Onderzoek aan lassen in roestvast staal zijn uiteraard niet anders dan bij ongelegeerd staal.

Een overzicht van de meest gangbare NDO technieken en enkele kenmerken wordt weergegeven in tabel 12.2.

12.9.2 *NDO onderzoek in relatie tot roestvast staal*

De afwijkende eigenschappen van lassen in roestvast staal, vooral wat de structuur betreft, hebben echter tot gevolg dat bij sommige NDO-methoden speciale voorzorgen in acht moeten worden genomen of aan specifieke aspecten aandacht moet worden geschonken. Een aantal van deze specifieke bijzonderheden met betrekking tot roestvast staal worden hierna kort toegelicht.

Magnetisch onderzoek

Magnetisch onderzoek is niet mogelijk bij austenitisch roestvast staal, omdat deze soort niet ferromagnetisch is. Soms is magnetisch onderzoek van roestvast staal wel mogelijk; dit is bijvoorbeeld het geval bij ferritisch en duplex roestvast staal, die beide ferromagnetisch zijn. Er zal echter per geval moeten worden bekeken of dit verstandig is, omdat als gevolg van permeabiliteitsverschillen en verschillen in samenstelling tussen las- en moedermateriaal, schijnindicaties kunnen optreden.

tabel 12.1 Kwaliteitsborging en onderzoeksmethoden bij het lassen

voorbereiding	a) lasmethodebeschrijving (LMB)
	b) lasmethodekwalificatie (LMK)
	c) lasserskwalificatie (LK)
	d) CE markering aanwezig?
uitvoering	– controle afmetingen lasnaadvoorbewerking
	– opslag lastoevoegmateriaal
	– functioneren lasapparatuur
	– voorwarmtemperatuur
	– lasnaadopbouw
	– enz.
onderzoek	– visuele inspectie
	– oppervlakte-onderzoek
	▶ magnetisch (M.T.)
	▶ penetrant (P.T.)
	– inwendig onderzoek
	▶ radiografisch (R.T.)
	▶ ultrasoon (U.T.)
	– bijzonder
	▶ wervelstroom
	▶ lekdetectie

plex roestvast staal, die beide ferromagnetisch zijn. Er zal echter per geval moeten worden bekeken of dit verstandig is, omdat als gevolg van permeabiliteitsverschillen en verschillen in samenstelling tussen las- en moedermateriaal, schijnindicaties kunnen optreden.

Radiografisch onderzoek

Radiografisch onderzoek aan RVS-lassen verschilt weinig met die van lassen in ongelegeerd staal. De absorptie voor röntgen- en gammastraling kan, bij bepaalde legeringen, wat afwijken van die bij ongelegeerd staal. Hierdoor is het noodzakelijk soms een belichtingscorrectie toe te passen. Vooral bij lassen in materiaal met geringe wanddikten kan het voorkomen, dat als gevolg van diffractie vage lijnvormige indicaties op de film ontstaan. Deze kunnen echter door een geoefend filmlezer worden onderscheiden van foutindicaties.

tabel 12.2 Overzicht van gangbare NDO-methoden

methode	principe	te detecteren foutsoort	bijzonderheden	personeelseisen
Visuele inspectie	Optische inspectie van het zichtbare oppervlak onder goede lichtcondities.	Zichtbare afwijkingen in lasvorm, uittijningheid, verkleuring, inkarteling.	Kan ook worden uitgevoerd met visuele hulpmiddelen zoals endoscoop, TV.	Training, ervaring en bekendheid met de eisen.
Penetrant onderzoek	Een vloeistof met geringe oppervlaktespanning dringt door capillaire werking in de fout en wordt vervolgens door absorptie in een ontwikkelaar die op het oppervlak is aangebracht, zichtbaar gemaakt.	Oppervlakte-defecten die aan het oppervlak open zijn.	Geschikt voor alle niet-poreuze materialen. Hoge eisen worden gesteld aan de reinheid van het oppervlak.	Formele kwalificatie, ervaring en bekendheid met de eisen.
Radiografie	Doordringing van het materiaal door elektromagnetische (ioniserende) straling. Zwartingsverschillen op de onderliggende film geven een beeld van eventuele defecten.	Ingesloten defecten, in het bijzonder die welke zwartingsverschillen op de film veroorzaken; dit stelt eisen aan de richting van de straling bij detectie van vlakke fouten.	Er is een direct document voorhanden voor latere referentie. De film geeft een overzichtelijk beeld van de las. Diepteligging van het defect niet precies meetbaar. Detectie van scheurvorming kan beperkt zijn.	Formele kwalificatie en ervaring. Speciale aandacht voor training van filmlezers en bekendheid met stralingsveiligheid. Bekendheid met de eisen.
Ultrasoon onderzoek	Reflectie van elastische golven aan grensvlakken; foutlokalisatie door looptijdmeting.	Ingesloten defecten, ook bij grote wanddikten. Bij geschikt ontwerp is volledig volumetrisch onderzoek van de las mogelijk.	Is een vergelijkingsmethode, daarom is altijd een kalibratie op een referentiereflector nodig. Problemen kunnen ontstaan bij hoge absorptie en grove structuur. Vaak zijn speciale oplossingen mogelijk.	Formele kwalificatie en ervaring. De opleiding bevat relatief veel theorie, vooral goniometrie. Bekendheid met de eisen. Voor RVS-onderzoek speciale training nodig.
Lekdichtheidscontrole	Meting van hoeveelheid doorstromend gas per tijdseenheid onder invloed van aangelegd drukverschil.	'Lekken' (ondichtheden) in insluitsystemen.	Te bereiken gevoeligheid sterk afhankelijk van gebruikte methode. Methodekeuze baseren op ontwerpisen.	Training, ervaring en bekendheid met de eisen.

Ultrasoon lasonderzoek

Het gebruik van ultrasoon lasonderzoek is bij roestvast staal moeilijker, vanwege de overeenkomst tussen de korrelgrootte en de golflengte. Hierdoor ontstaan storingen. Voornamelijk bij dikten vanaf 50 mm is ultrasoon onderzoek toepasbaar.

Ten aanzien van het ultrasoon lasonderzoek aan lasverbindingen in roestvast staal kunnen de volgende kanttekeningen worden gemaakt:

- De onderzoekbaarheid en de te gebruiken tasters moeten van geval tot geval worden bekeken. Dit houdt verband met het feit, dat de structuur van het te onderzoeken materiaal kan verschillen als gevolg van lasnaadvorm, lasmethode, opmenging, legering en wanddikte.
- Van de binnen een project voorkomende lasvormen en/of wanddikten moeten proefstukken beschikbaar zijn, waarin zich een representatieve las bevindt. Dergelijke proefstukken worden gebruikt om tasters te selecteren en de foutdetecteerbaarheid in termen van de geldende acceptatiecriteria op kunstmatige reflectoren in de las na te gaan; later kunnen ze tijdens het onderzoek als referentiestuk dienen.
- Voor een bepaalde dikte zijn vaak meer tasters nodig dan bij conventioneel onderzoek aan lassen in ongeleerd staal. Deze tasters zijn dan veelal op bepaalde diepten werkzaam en onderzoeken dus slechts een zone van de las. Hoeveel tasters nodig zijn, zal per geval moeten blijken en hangt af van de wanddikte, de lasvorm en de structuur. Op deze manier is toch het hele volume van de las te onderzoeken.
- Het is sterk aan te bevelen, de te gebruiken techniek samen met de acceptatiecriteria in een projectgerichte procedure vast te leggen.
- Het onderzoek moet, gezien de bijzondere eigenschappen van de tasters, worden uitgevoerd door gekwalificeerd personeel, dat ervaring heeft met het onderzoek aan roestvast staal.
- Mechanisatie van het onderzoek kan leiden tot een grotere betrouwbaarheid en reproduceerbaarheid. Vooral wanneer meerdere gelijksoortige lassen moeten worden onderzocht, kan het zinvol zijn deze mogelijkheid te overwegen.

De uitvoering van NDO moet bij voorkeur worden vastgelegd in procedures. Zeker in het geval van roestvast staal, waarbij de NDO-methoden zoals gezegd vaak wat afwijken (in het bijzonder bij het ultrasoon onderzoek), is het aan te bevelen de omvang en de techniek van het NDO tevoren in een procedure vast te leggen. Deze procedure wordt dan meestal gekwalificeerd en goedgekeurd door de betrokken partijen. Behalve een beschrijving van de methode behoren ook rapportagenormen en/of acceptatiecriteria onderdeel van de procedure te zijn, afhankelijk van de contractuele eisen.

12.9.3 Destructief onderzoek

Evenals voor het NDO geldt dat de principes van het DO aan lassen in roestvast staal uiteraard niet anders zijn dan bij ongeleerd staal.

12.9.4 DO onderzoek in relatie tot roestvast staal

De afwijkende eigenschappen van roestvast staal en de lassen die zich hierin bevinden, vooral wat de structuur betreft, hebben echter tot gevolg dat bij sommige DO methoden speciale voorzorgen genomen moeten worden genomen. Een aantal bijzonderheden betreffende het DO onderzoek van roestvast staal worden hierna kort behandeld.

Metallografisch onderzoek

Geprepareerde doorsneden van de las kunnen macroscopisch of microscopisch worden onderzocht. Uit het macroscopisch onderzoek kan het aantal laslagen en de mate van inbranding worden bepaald. Het microscopisch onderzoek geeft een beeld van de microstructuur (aanwezige fasen en precipitaten, scheuren, enz.) in het basismateriaal, de WBZ en het lasmetaal. Dit onderzoek wordt

veelal gecombineerd met niet-destructief onderzoek. De doorsneden worden dan genomen op plaatsen waarbij tijdens het niet-destructief onderzoek onvolkomenheden zijn geconstateerd.

Er bestaan voor roestvast staal een serie elektrolytische en chemische etsmiddelen voor het aanetsen van specifieke fasen. In tabel 12.3 zijn de meest gebruikte etsmiddelen opgenomen met een indicatie van de fasen waarvoor het etsmiddel geschikt is.

tabel 12.3 Etsmiddelen voor het aantonen van specifieke fasen in roestvast staal

etsmiddel	voor het etsen van:			
	ferriet	martensiet	carbiden	sigma-fase
A. elektrolytische etsmiddelen				
1 10%-ige natriumcyanide-oplossing			(+)	+
samenstelling: 10 g natriumcyanide (NaCN) 90 ml water				
2 10%-ige oxaalzuur-oplossing	+		+	(+)
samenstelling: 10 g oxaalzuur (C ₂ H ₂ O ₄ ·2H ₂ O) 100 ml water				
B. Chemische etsmiddelen				
1 etsmiddel vlg. Kalling	+	+		
samenstelling: 5 g koperchloride (CuCl ₂ ·2H ₂ O) 100 ml zoutzuur (HCl; s.m. 1,19) 100 ml ethylalcohol (C ₂ H ₅ OH)				
2 etsmiddel vlg. T. Murakami (verdunde oplossing)			+	(+)
samenstelling: 10 g kaliumferricyanide (K ₃ Fe(CN) ₆) 10 g kaliumhydroxide (KOH) 100 ml water				
3 etsmiddel vlg. T. Murakami (geconcent. oplossing)			+	+
samenstelling: 30 g kaliumferricyanide (K ₃ Fe(CN) ₆) 30 g kaliumhydroxide (KOH) 60 ml water				
4 etsmiddel vlg. Groesbeck			(+)	(+)
samenstelling: 4 g Kaliumpermanganaat (KMnO ₄) 4 g natriumhydroxide (NaOH) 100 ml water				
+ = zeer geschikt (+) = minder geschikt				

Het *elektrolytisch etsen* met natriumcyanide (A1 in tabel 12.3) geeft van genoemde etsmiddelen voor het aantonen van sigma-fase in lasmetaal van type 1.4301 (AISI 304) en 1.4401 (AISI 316) de beste resultaten. Een nadeel van dit etsmiddel is de giftigheid, wat zeer voorzichtig werken nodig maakt. Met de 10%-oxaalzuuroplossing (A2) kunnen ook gunstige resultaten worden bereikt bij het aanetsen van ferriet en carbiden.

Het *etsen met chemische middelen* is echter veelal eenvoudiger en sneller uit te voeren. Voor het aantonen van ferriet en martensiet geeft de etsing volgens Kalling (B1) goede resultaten. Voor het aantonen van carbiden en sigma-fase is de verdunde Murakami-oplossing (B2) goed bruikbaar. Oplossing B3 (Murakami-sterk) geeft aan carbiden dezelfde kleurschakering als aan sigma-fase. Iets dergelijks zien we bij de Groesbeck-etsing (B4).

De structuur aan het oppervlak kan behalve met microstructuuronderzoek aan doorsneden, ook zichtbaar worden gemaakt door middel van replica-technieken. Replica-onderzoek moet evenals verschillende van de hieronder genoemde ferrietmetingen tot het NDO worden gerekend.

Bepaling van het ferrietgehalte

De microstructuur van austenitisch lasmetaal bevat meestal een bepaalde hoeveelheid ferriet. De aanwezigheid hiervan is zeer belangrijk in verband met het risico van warmscheuren. In de loop van de tijd is een aantal meetmethoden ontwikkeld, waarvan we de meest gebruikte hier in het kort zullen bespreken.

► Microscopisch

Door microscopisch onderzoek kunnen we de hoeveelheid ferriet vaststellen door telling volgens een bepaalde methode. Hoewel deze benadering voor gewalst en gegloeid staal nauwkeurig is, blijkt deze voor lasmetaal minder geschikt. De verschijningsvorm van het ferriet kan per geval nogal verschillen. Het is daarom soms moeilijk uit het microscopische beeld op te maken, wat als ferriet moet worden geïnterpreteerd en wat niet. Het resultaat hangt bovendien af van de etsmethode, de gebruikte vergroting, het aantal metingen en de ervaring van de onderzoeker.

► Bepaling met het Schaeffler/Delong-diagram

Het principe van dit diagram is behandeld in hoofdstuk 9 (zie ook figuur 9.1). Met dit diagram kunnen we van lasmetaal (dat geen warmtebehandeling heeft ondergaan), de hoeveelheid ferriet bij benadering bepalen. Hiervoor moeten we wel de analyse van het lasmetaal en het opmengpercentage kennen.

► Bepaling door meting van de magnetische permeabiliteit

Hierbij maken we gebruik van de eigenschap dat ferriet bij kamertemperatuur ferromagnetisch is en de austenietfase niet. Voor deze meting bestaan verschillende uitvoeringen. Het meest gebruikte type maakt gebruik van magnetische inductie. De meting geschiedt door een taster die over het te beproeven stuk wordt gevoerd.

► Meting van de magnetische aantrekkingskracht

Ook bij deze methode maken we gebruik van de magnetische eigenschappen van ferriet in austenitisch lasmetaal. Met een magneet van een bepaalde sterkte meten we de kracht waarmee deze van een oppervlak wordt losgetrokken. Deze kracht zal groter zijn naarmate het ferrietgehalte hoger is.

► IJking en meting van hoge ferrietgehalten

Gebruik van de ene of andere meetmethode kan nogal eens verschil in resultaat opleveren. Dit komt onder andere door het ontbreken van een primaire ijking. Nog niet zo lang geleden heeft het IIW gekozen voor een methode die de magnetische aantrekkingskracht meet met behulp van een goed gedefinieerde magneet. Een instrument waarmee we deze ijkingen kunnen uitvoeren is de Magna Gage. In feite is deze ontwikkeld uit een laagdiktemeter.

Na invoering van deze methode spreekt men van FN-waarden (Ferrite Numbers) in plaats van ferrietgehalten. Door invoering van EFN-waarden (Extended Ferrite Numbers) is het ook mogelijk ferrietgehalten te meten zoals die voorkomen bij duplex roestvast staal.

Evaluatietests voor interkristallijne corrosie

De volgende methoden kunnen ingezet worden voor het meten van de gevoeligheid voor interkristallijne corrosie: Methode A: aanetsen door oxaalzuur.

Methode B: ijzersulfaat/zwavelzuurproef (Streicher-test).

Methode C: salpeterzuurproef (Huey test).

Methode D: salpeterzuur/fluorwaterstofzuurproef.

Methode E: koper/kopersulfaat/zwavelzuurproef (in DIN 50914 genoemd als Strauss test).

De volgende factoren bepalen het toepassingsgebied voor deze 5 onderzoeksmethoden:

- Gevoeligheid voor interkristallijne corrosie veroorzaakt door de precipitatie van chroomcarbiden is gelijk bij alle 5 methoden;
- sigma-fase in gewalst Cr-Ni-Mo-staal kan resulteren in hoge corrosiesnelheden bij methode C;
- sigma-fase in Ti- of Nb-gestabiliseerd staal kan resulteren in hoge corrosiesnelheden bij methoden B en C.

Methode A is een snelle werkwijze om door een eenvoudige etsing interkristallijne corrosie tengevolge van carbide-uitscheiding aan te tonen.

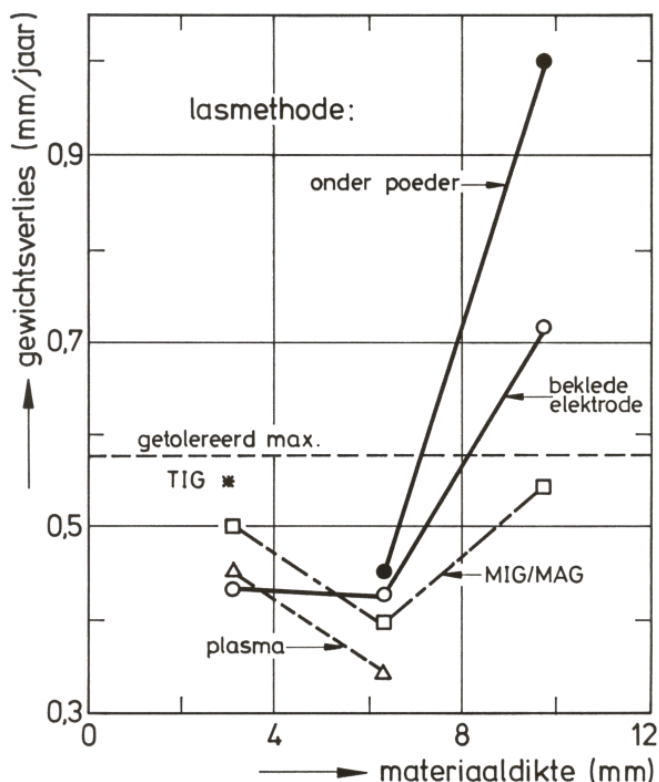
Methoden B, C en D zijn gebaseerd op meting van een gewichtsverlies en geven daarom een kwantitatieve maat voor de gevoeligheid voor interkristallijne corrosie.

Methode E is gebaseerd op visuele waarneming aan ge-

bogen proefstaven en geeft alleen een ja/nee-uitslag, maar is in veel gevallen toch aantrekkelijk.

Methode D is het best geschikt voor Mo-houdende austenitische staalsoorten.

Methode B en E zijn voor het aantonen van carbide- en nitride-invloeden gevoeliger dan methode C. Methode C is speciaal bedoeld voor het testen van materialen die in de salpeterzuur-industrie worden gebruikt. Voor enige uitkomsten van de Huey-proef bij onderzoek van austenitische lasverbindingen, zie figuur 12.5.



figuur 12.3 Voorbeelden van aantasting bij de Huey-proef na het lassen volgens verschillende processen bij kwaliteit 1.4315 (type 304N); [26]

Chemische samenstelling

Door een chemische analyse kan geleverd of te leveren materiaal worden gecontroleerd op de juiste samenstelling. Dit geldt zowel voor werkstukmateriaal als voor toevoegmateriaal. De samenstelling van het lasmetaal geeft een controle op de juiste uitvoering van de las in verband met de gestelde eisen. Dit is vooral van belang voor de corrosievastheid van de sluitlaag.

Een belangrijk hulpmiddel voor het bepalen van de chemische samenstelling van metalen is tegenwoordig de OES ofwel optical emission spectrometry, waarbij op basis van het analyseren van metalen deeltjes die van het te analyseren materiaal worden gevonkt, de chemische samenstelling kan worden bepaald. Het voordeel van de OES is dat het een snelle en dus relatief goedkope analysemethode is.

Hoofdstuk 13

Reparatie

13.1 Primaire overwegingen

In de voorgaande hoofdstukken zijn de gegevens vermeld, waarmee een lasverbinding in roest- en hittevast staal op de vereiste wijze en met goed gevolg kan worden uitgevoerd. Ook is in de gedeelten waarin de diverse lasprocessen worden besproken, aangegeven waarom en wanneer iets fout kan gaan. Niemand heeft uiteraard de bedoeling bewust lasfouten - beter gezegd onvolkomenheden - te maken. Reparaties die uitgevoerd moeten worden (uitslijpen, controleren, repareren, noodzakelijk extra onderzoek) en de hierdoor veroorzaakte extra kosten), bedragen vaak een veelvoud van de gecalculeerde laskosten per meter laslengte. Bij noodzakelijke reparatie wordt ook de "doorloop" in de productie gehinderd en kan de levertijd in het gedrang komen. Is reparatie echter nodig, dan is het nuttig dat men niet alleen rekening houdt met de vorm, het type en de plaats van het defect, maar ook met de voorgeschiedenis van het materiaal en de aanwezige spanningen. Daarnaast is het belangrijk dat de reparaties worden uitgevoerd, rekening houdend met de eisen die aan de constructie worden gesteld. Voor met het werk wordt begonnen, moeten de foutacceptatiecriteria van tevoren behoorlijk worden vastgelegd.

Als illustratie van de normale gang van zaken, is een algemeen reparatieschema opgenomen in tabel 13.1

tabel 13.1 Algemeen reparatieschema [27]

ABC van het reparatieproces	
A. VASTSTELLEN VAN DE OORZAAK VAN EEN DEFECT	▶ materiaalsoort en materiaaltoestand ▶ spannings- en rektoestand ▶ corrosief milieu ▶ geometrie ▶ typen van de belasting ▶ veranderd gebruiksdoel
B. KARAKTERISERING VAN DE REPARATIEPLAATS	▶ materiaaldikte en -soort ▶ gebruikstemperatuur ▶ omgeving, vocht, vuil ▶ reparatie tijdens of uit bedrijf ▶ bereikbaarheid ▶ laspositie ▶ mogelijkheden tot warmtebehandelen
C. OPSTELLEN VAN DE REPARATIEPROCEDURE	▶ afwijkingen in geometrie en/of constructie ▶ lasnaadkeuze, slijpen, enz. ▶ lasproces, -toevoegmateriaal en -procedure ▶ mogelijkheden voor niet-destructief onderzoek ▶ voorwarmen ▶ warmtebehandeling (na het lassen) ▶ oppervlaktebehandeling (na het lassen) ▶ beperking van de vervorming ▶ consequenties voor de constructie ▶ economie van de lasproceskeuze
D. KWALITEITSVERWACHTING	▶ toetsing aan literatuur en ervaring ▶ toetsing door kwalificatie
E. UITVOERING	▶ vastleggen van: ▶ uitvoering van de reparatie ▶ resultaten van bijbehorend onderzoek
F. NAZORG	▶ periodieke inspectie ▶ consequenties voor nieuwbouw ▶ eindtoets na een zekere tijd ▶ is de kwaliteitsverwachting bewaarheid?

Dit schema kan worden beschouwd als een algemeen "ABC" voor lasreparaties. Het geldt in principe voor allerlei soorten materialen en lasconstructies. Dit geldt ook voor de "Basisregels" die in tabel 13.2 zijn opgenomen.

tabel 13.2 Algemene basisregels voor lasreparaties

- 1. Type defect**
Selecteer de defecten op:
 - scheurvormige defecten en
 - niet-scheurvormige defecten.
- 2. Oorzaak defect**
Stel bij scheurvormige defecten de oorzaak voor het ontstaan vast op basis van:
 - materiaaleigenschappen;
 - belastingsomstandigheden;
 - corrosief milieu;
 - vorm van de las;
 - lasuitvoering;
 - combinaties van deze factoren.
- 3. Opheffen oorzaak**
Bedenk dat het repareren van een scheur pas echt zinvol is, als de oorzaak voor het ontstaan daarvan kan worden opgeheven.
- 4. Repareren niet-scheurvormige fouten**
Overweeg bij niet-scheurvormige onvolkomenheden of een reparatie een werkelijke verbetering betekent voor de lasverbinding uitgaande van:
 - positie van de onvolkomenheid ten opzichte van materiaaldikte of vorm van de las;
 - belastingsniveau en -toestand ter plaatse van de onvolkomenheid.
- 5. Rekening houden met star geheel**
Bedenk dat het plaatselijk repareren van defecten vrijwel altijd het lassen in een STAR geheel inhoudt. Overweeg in alle gevallen een austenitisch-ferritisch lastoevoegmateriaal.
- 6. Toepassen NDO**
Pas na het verwijderen van een onvolkomenheid een niet-destructief onderzoek toe om bij het begin van het lassen zeker te zijn dat het gehele defect is verwijderd.
- 7. Waterstof**
Zorg bij ferritisch, martensitisch en bij duplex roestvast staal voor extra laag waterstofaanbod door:
 - de lasgroef en het oppervlak naast de groef schoon te slijpen tot blank metaal;
 - het werkstuk voor te verwarmen (niet nodig voor de gangbare austenitische soorten);
 - elektroden voor het gebruik te drogen volgens aanwijzingen van de fabrikant.
- 8. Starts en stops**
Zorg ervoor dat in de te vullen naad de starts en stops (kraters) niet boven elkaar zijn geplaatst. Pas, indien mogelijk, start- en uitloopplaten toe; overweeg toepassing van het penetrant onderzoek om na te gaan of de reparatie goed is uitgevoerd.
- 9. Inkartelingen**
Denk eraan dat bij het repareren van oppervlaktefouten, zoals inkartelingen, uitslijpen inderdaad de beste remedie is.
- 10. Kwalificatieproef**
Stel door het uitvoeren van de kwalificatieproef de te volgen procedure vast.
- 11. Oppervlaktetoestand**
Zorg dat na de reparatie de oorspronkelijke oppervlaktetoestand wordt hersteld.

Het raadplegen van genoemde schema's, voorafgaande aan het reparatieproces, zal zeker bijdragen tot een succesvolle reparatie, al was het maar om ervan verzekerd te zijn dat er niets wordt overgeslagen. Men moet zich echter wel realiseren dat het voor ieder praktijkgeval noodzakelijk is dat vooraf (schriftelijk) wordt vastgelegd welke stappen uit deze schema's worden gevolgd. Meestal geschiedt dit in de bestaande lasmethodebeschrijving of in een afzonderlijke reparatieprocedure-specificatie.

13.2 *Lasonvolkomenheden*

Vroeger was het gebruikelijk te spreken van las 'fouten'. Tegenwoordig wordt gesproken over 'onvolkomenheden'. Een onvolkomenheid kan een lasfout zijn als er een toetsing heeft plaatsgevonden van de betreffende onvolkomenheid aan de acceptatie die in de norm, het voorschriften, enz. worden gesteld.

De belangrijkste onvolkomenheden kunnen als volgt worden ingedeeld:

- 1) Onvoldoende doorlassing
- 2) Bindingsfouten
- 3) Scheuren (warm-, koud- of krimpscheuren)
- 4) Slakinsluitingen
- 5) Gasholten
- 6) Randinkartelingen

De onvolkomenheden 1, 2, en 3 zullen in vrijwel iedere beoordeling tot reparatie aanleiding geven, de onvolkomenheden 4 en 5 niet altijd. Onvolkomenheid 6 is een oppervlakte defect dat vaak visueel kan worden geconstateerd en meestal met licht slijpen te verhelpen is. De beoordeling van onvolkomenheden lijkt eenvoudig en eenduidig, maar is dat vaak niet. Bij slakinsluitingen is het van groot belang te weten of deze scherpe, dan wel afgeronde vormen hebben. Gasholten hebben meestal een afgeronde vorm. Verder is het bij de beoordeling, en voordat tot een reparatie wordt besloten, belangrijk te weten of de constructie statisch of dynamisch (vermoeiing) zal worden belast. Ook de gevarenklasse kan bepalend zijn bij de beoordeling. Bij een potentieel gevaarlijke constructie hoort een strengere acceptatiegrens of een grotere omvang van de inspectie.

13.3 *Opsporen onregelmatigheden in het lasproces*

Indien de lasser onregelmatigheden constateert tijdens het lassen, is het van belang dat hij stopt en samen met de lasdeskundige of bedrijfsleiding bespreekt en beslist hoe verder te gaan, terwijl over het op dat moment reeds uitgevoerde lasgedeelte ook een beoordeling en beslissing nodig zijn.

Dit voorkomt reparaties in reeds verder samengebouwde toestand, waarbij de reparatiemogelijkheden altijd minder zijn.

De lasdeskundige legt schriftelijk vast wat de onregelmatigheid inhield en maakt melding of er sprake is van een procesfout of een lasfout. Tevens vermeldt hij welke maatregelen er getroffen zijn. Bij een procesfout kan er aanleiding zijn de lasmethodebeschrijving te wijzigen.

13.4 *Vorbereiding reparatiewerkzaamheden*

De werkzaamheden ten behoeve van de productie en het onderzoek moeten zodanig worden opgezet en uitgevoerd, dat zij elkaar efficiënt opvolgen en elkaar niet blokkeren. De lasmethode- en lasserskwalificatie moeten gereed zijn voor de aanvang van het werk.

De werkvoorbereiding moet vooruit zien en het is zaak tegelijk met het opzetten van de lasmethodebeschrijving één of meerdere reparatieprocedures op te zetten. Daarmee wordt voorkomen dat bij een eventuele reparatie vertraging in de afhandeling optreedt.

Voor het door middel van lassen repareren van onvolkomenheden is in tabel 13.2 een aantal algemeen geldende basisregels geformuleerd, die de kans op een succesvolle reparatie vergroten.

13.5 *Uitvoering*

Hierbij moet het volgende in het oog worden gehouden:

- Meestal kan de onvolkomenheid worden uitgeslepen. Het slijpen moet rustig en regelmatig worden uitgevoerd met een zo gelijkmatig mogelijke aanzet (druk). Verkleuringen tengevolge van een te zware aanzet moeten worden

voorkomen. Uitsluitend moeten slijpschijven gebruikt worden die bestemd zijn voor het slijpen van roestvast staal;

- constateer na afloop of de onvolkomenheid inderdaad voldoende is weggeslepen (bijvoorbeeld d.m.v. penetrant onderzoek);
- reparatie vindt plaats volgens de geldende lasmethodebeschrijving of een separate reparatieprocedure;
- in de te repareren las zijn restspanningen aanwezig. Om extra spanningen zo veel mogelijk te vermijden, moet met name bij het repareren van ferritische en martensitische roestvaste staalsoorten rekening worden gehouden met het volgende:
 - een gecontroleerde voorwarming rondom de plaats waar de reparatie moet worden uitgevoerd; indien de lasmethodebeschrijving of de reparatieprocedure een voorwarmtemperatuur aangeeft, moet deze worden aangehouden (voorwarmen geldt meestal niet voor de gangbare austenitische soorten);
 - de reparatie altijd uitvoeren in een opbouw die bestaat uit dunne lasrupsen;
 - onderzoek van de gerepareerde plaats en (indien vereist) een warmtebehandeling en een oppervlaktebehandeling sluiten de reparatie af.

13.6 *Reparatie van in bedrijf geweest zijnde installaties*

In voorgaande paragrafen voorkomende beschouwingen hebben primair te maken met reparatie tijdens de nieuwbouw. Naast deze gevallen bij nieuwbouw worden ook regelmatig reparaties uitgevoerd aan installaties die door vermoeiing, kruip, interkristallijne corrosie of spanningscorrosie, scheuren aan het oppervlak vertonen. In geval van te repareren scheuren moeten bestaande scheuren geheel worden uitgeslepen.

Door slijtage en door algemene en putvormige corrosie aangetaste oppervlakken worden wel door oplassen gerepareerd. Als dit deskundig gebeurt, kan de levensduur van de component aanzienlijk worden verlengd. Bij een ondeskundig uitgevoerde reparatie kan de remedie erger zijn dan de kwaal. De moeilijkheidsgraad bij dit soort reparaties hangt af van de aard van het te repareren materiaal en de mechanische, thermische of chemische belastingen tijdens het in bedrijf zijn van de component.

Hoofdstuk 14

Economische overwegingen bij het lassen en de verwerking van roestvast staal

Het is niet mogelijk binnen het kader van deze publicatie uitvoerig in te gaan op alle kostenaspecten die men bij de verwerking en het lassen van roestvast staal tegenkomt. We moeten ons beperken tot de verklaring van enkele begrippen en daarnaast het aangeven met welke facetten men rekening moet houden bij de vaststelling van de kosten.

14.1 *Kostenindeling*

De kosten van het lassen van roestvast staal worden voor- namelijk bepaald door:

- 1) Voorbewerkingskosten;
- 2) Loonkosten;
- 3) Kosten lastoevoegmateriaal;
- 4) Machinekosten;
- 5) Inschakelduur (I.D.);
- 6) Neersmeltsnelheid;
- 7) Nabewerkingskosten.

Op de verschillende kostenposten zal hieronder nader worden ingegaan.

14.1.1 *Voorbewerkingskosten*

Een algemene overweging kan zijn, dat van de stompe lassen de voorbereidingskosten laag zijn voor de I-, de V-, de X- en de K-las, en hoog zijn voor de U- en de J-las. Bij de hoeklassen zijn de voorbereidingskosten aanzienlijk lager. Over het algemeen zijn de voorbereidingskosten voor lasnaden die machinaal worden aangebracht hoger dan die welke door thermische processen worden aangebracht. Wel moet erop worden gelet dat lasnaden die door middel van thermische processen worden aangebracht niet altijd zonder meer gebruikt kunnen worden. Soms (o.a. afhankelijk van de kwaliteitseisen en de samenstelling van de materialen) is het noodzakelijk om de thermisch gesneden lasnaadkanten, mechanisch na te bewerken.

In tegenstelling tot ongelegeerd staal zijn de voorbereidingskosten bij roestvast staal in het algemeen aanzienlijk. Daarom mag bij het lassen van roestvast staal nooit een situatie ontstaan dat er een goedkopere las wordt gelegd, maar dat dan bijvoorbeeld de voorbereidingskosten door een vereiste grotere maatnauwkeurigheid of een duurdere naad meer zijn toegenomen dan de besparing op de laskosten bedraagt. De voorbereidingskosten worden in berekeningsmodellen vaak buiten beschouwing gelaten, maar bij roestvast staal is dit eigenlijk niet juist.

Dit geldt in nog sterkere mate voor de nabewerkingskosten, deze kunnen zeer hoog oplopen voor sommige toepassingen (voedselindustrie en farmacie), zie ook § 14.1.7.

14.1.2 *Loonkosten*

Dit zijn de loonkosten van de lasser, inclusief de overheadkosten, voor het laswerk (stellen, hechten en (af)lassen), zonder loonkosten voor voor- en nabewerken.

Hoewel procesparameters (zoals lassnelheid en neersmeltsnelheid) veelal maatgevend zijn voor de loonkosten, zijn deze vaak ook afhankelijk van de omstandigheden in een bepaald bedrijf. In het algemeen geldt dat bij het lassen van roestvast staal de loonkosten veelal hoger zijn dan de kosten van het lastoevoegmateriaal.

14.1.3 *Lasmetaalkosten*

Dit betreft de kosten van het lastoevoegmateriaal. Indien de lasinhoud of de hoeveelheid neersmelt bekend is, kunnen de kosten van het verbruikte lastoevoegmateriaal in het algemeen vrij gemakkelijk worden berekend. Hierbij moet ook rekening te worden gehouden met de P.T.-fac-

tor, dat wil zeggen de overdikte van de lasnaad. In formule uitgedrukt:

$$\text{P.T.-factor} = \frac{\text{praktische lasinhoud}}{\text{theoretische lasinhoud}}$$

De kosten van het roestvast staal lastoevoegmateriaal zijn aanzienlijk hoger dan de kosten voor ongelegeerd lastoevoegmateriaal.

14.1.4 *Apparatuurkosten*

Voor de meeste apparatuur geldt dat de apparatuurkosten in verhouding tot de loon- en materiaalkosten van minder betekenis zijn. Dit geldt echter niet voor kapitaalsintensieve apparatuur als bijvoorbeeld laserapparatuur. Dit soort apparatuur bepaalt voor een belangrijk deel mede de laskosten. Een uitstekend programma dat inzicht biedt bij het bepalen van de laskosten bij het laserlassen is gratis te downloaden op de website www.verbinden-online.nl. Daar de apparatuurkosten per werkuur worden aangegeven, spelen niet alleen de aanschaffingsprijs, de afschrijvingskosten, het renteverlies en de onderhoudskosten een rol, maar ook het aantal uren per jaar dat met het apparaat zal worden gelast. Onder apparatuurkosten hoort ook gerekend te worden de speciale voorzieningen die getroffen moeten worden voor het lassen van roestvast staal (afgeschermdes ruimten waar alleen roestvast staal mag worden gelast).

14.1.5 *Inschakelduur (I.D.)*

Onder de inschakelduur (I.D.) wordt het percentage verstaan dat aangeeft welk gedeelte van de werktijd daadwerkelijk wordt gelast. Er wordt ook wel gesproken van procentuele inschakelduur omdat het om een verhoudingsgetal gaat zoals onderstaande formule laat zien.

$$\text{I.D.} = \frac{\text{boogtijd}}{\text{werktijd lasser}} \times 100\%$$

De inschakelduur voor apparatuur (stroombronnen, lastoortsen) wordt altijd berekend over een periode van 10 minuten. In de praktijk wordt er naar gestreefd om steeds een zo hoog mogelijke I.D. te bereiken. Factoren die de I.D. beïnvloeden zijn de procesbepalende tijden zoals de insteltijd van de machine, de elektroden- en draadwisseltijden en de tijd om slak, spatten en de aanloopkleuren te verwijderen. Ook is de mate van mechanisatie van invloed op de inschakelduur. Daarnaast moet rekening worden gehouden met personele aspecten en ook de organisatie binnen het bedrijf is van invloed. De I.D. ligt in de praktijk meestal tussen 10 en 40%.

14.1.6 *Neersmeltsnelheid*

De neersmeltsnelheid, dat wil zeggen de hoeveelheid lasmetaal die per tijdseenheid wordt neergesmolten, is een andere belangrijke invloedsfactor. De neersmeltsnelheid is met name afhankelijk van het lasproces en de laspositie.

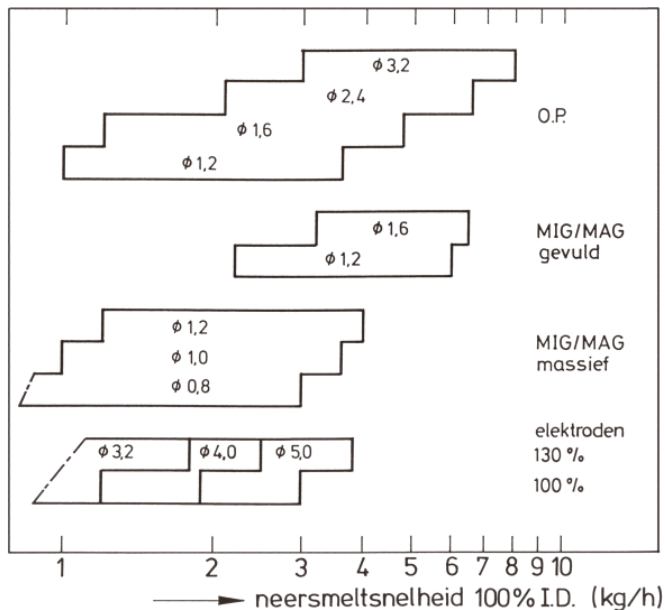
In figuur 14.1 is voor 100% inschakelduur de gemiddelde neersmeltsnelheid per uur voor een aantal lasprocessen aangegeven. Een grotere neersmeltsnelheid vereist niet altijd een ander lasproces, maar bij het handlassen met beklede elektroden kan bijvoorbeeld ook een grotere diameter worden toegepast.

Ook het gebruik van rendementselektroden zal een positieve invloed hebben op de neersmeltsnelheid. Een goede mogelijkheid om deze snelheid te vergroten, is het lassen in positie te vervangen door het onder de hand lassen. Stroomsterkte en draaddiameter kunnen dan allebei worden vergroot.

Wijziging van de laspositie is niet altijd mogelijk, maar wanneer dat wel het geval is, is de aanschaf van hulpmiddelen zoals draaitafels, rolstellingen en manipulatoren te overwegen.

14.1.7 *Nabewerkingskosten bij roestvast staal*

Nabewerkingskosten zijn soms moeilijk exact te berekenen.



figuur 14.1 Relatie tussen draaddiameter en de neersmeltsnelheid bij het lassen van roestvast staal volgens verschillende processen

Door wijzigingen in elektrodetype, draaddiameter, enz. kan een ruwere las worden verkregen die een aanmerkelijk duurdere nabewerking zal verlangen. De nabewerkingskosten kunnen dan een veelvoud van de besparing gaan bedragen. Onder de nabewerkingskosten vallen bijvoorbeeld ook die van een warmtebehandeling of van een straal-, schuur-, beits- en passiveringsbehandeling. Deze kosten zijn niet eenvoudig op te geven en deze worden in berekeningsmodellen voor het bepalen van de laskosten dan ook vaak buiten beschouwing gelaten, terwijl eigenlijk deze kosten toch zouden moeten worden meegenomen.

De nabewerkingskosten bij het lassen van roestvast staal zijn vaak hoog, soms zelfs zo hoog dat de laskosten in het niet vallen. Zo moeten lassen vaak worden gebeitst en gepassiveerd en soms worden zulke hoge eisen aan de kwaliteit van de producten gesteld, dat lassen vrijwel volledig moeten worden weggeschuurd of gepolijst.

Een aantal richtlijnen ter vermindering van de nabewerkingskosten met betrekking tot het TIG en MAG lassen betreffen:

► **Ten aanzien van het TIG lassen:**

Om de verkleuring te verminderen:

- Gebruik als beschermgas argon met 2 tot 5 % waterstof;
- gebruik een lastoorts met een gaslens.

Om de lasdoorsnede (bijv. overdikte) te minimaliseren:

- gebruik waar mogelijk geen lastoevoegmateriaal;
- gebruik daar waar mogelijk het puls-TIG lassen.

Combineer bovenstaande aanbevelingen omdat ze elkaar versterken.

► **Ten aanzien van het MAG kortsluitbooglassen:**

- Gebruik een 'koude variant' van het kortsluitbooglassen (STT, CMT, ColdArc, enz.) als alternatief voor het traditionele MAG kortsluitbooglassen (minder spatten, minder warmte-inbreng en dus vervorming);
- gebruik het puls-MAG lassen (geen spatten, mogelijk vanaf een plaatdikte van 2 mm materiaaldikte).

► **Ten aanzien van het MAG openboog lassen:**

- Gebruik het puls-MAG lassen (minder warmte-inbreng minder vervormingen, mogelijk vanaf 2 mm materiaaldikte).

Algemeen verminderen nabewerkingskosten

Verwijder de verkleuring op de las en naast de las direct na het lassen.

14.2 Berekening van de laskosten

Voor het berekenen van de laskosten bestaan sinds enige tijd laskostenberekeningsprogramma's. Deze kunnen op een standaard PC worden toegepast. De reden dat dit soort software is ontwikkeld is, dat het berekenen van laskosten nogal complex is. Zeker zo'n 15 à 20 gegevens moeten via evenzoveel formules worden verwerkt. Wanneer de gegevens ingebracht zijn, is de verwerking daarvan een kwestie van seconden. Onder andere het NIL heeft een programma ter beschikking (Costcomp®). Ook is het al eerder genoemde laskostenberekeningsprogramma voor het laserlassen vrij beschikbaar op de website www.verbinden-online.nl.

Van de totale kosten nemen bij de traditionele lasprocessen de loonkosten meestal een flink deel voor hun rekening. Van belang is het daarom een lasproces te kiezen dat een zo groot mogelijke neersmeltsnelheid heeft. Bij het laserlassen zijn het vooral de afschrijving van de apparatuur samen met de loonkosten die de laskosten bepalen.

14.3 Samenvatting ten aanzien van de laskosten

Zoals uit het bovenstaande blijkt worden de laskosten van een product bepaald door vele factoren. Laskostenberekeningsprogramma's als Costcomp® en het kostprijsberekeningsprogramma voor het laserlassen zijn hierbij handige hulpmiddelen. Alleen met deze programma's bent u er niet, vaak moeten bedrijfspecifieke aspecten worden meegenomen in de uiteindelijke bepaling van de laskosten van het product. Verder geldt dat, afhankelijk van het type product, de laskosten een bescheiden of juist een groot deel van de productkosten uit kunnen maken. Dit bepaalt in belangrijke mate of het zinvol is veel energie te steken in het reduceren van de laskosten. Naast het bepalen van de "traditionele" laskosten worden de kosten voor de veiligheid en Arbo-aspecten, opleiding en training, eventueel noodzakelijke aanpassingen van de productiewerkplaats, enz. vaak buiten beschouwing gelaten, terwijl een deel van deze kosten wel degelijk een onderdeel van de laskosten kunnen vormen.

Hieronder volgt een korte samenvatting van de aspecten die een belangrijke rol spelen bij de bepaling van de kosten voor het lassen. Zoals gezegd zijn dit echter een deel van de laskosten, want hiernaast moet men rekening houden met kosten voor de veiligheid en Arbo aspecten, opleiding en training, eventueel noodzakelijke aanpassingen van de productiewerkplaats, enz.

Hoofdstuk 15

Veiligheid en gezondheid

Las- en snijwerkzaamheden geven, naar gelang de aard en de situatie waarin ze worden uitgevoerd, min of meer belastende arbeidsomstandigheden, zoals ultraviolette (UV) straling, lasrook, warmte, brand- en explosiegevaar, gevaar voor elektrische schok of overmatige fysieke belasting. Verhoogde risico's treden vooral op bij het werken in besloten ruimten.

Algemene aspecten ten aanzien van de veiligheid en gezondheid van de lasser en zijn directe omgeving zijn bij het lassen van roestvast staal niet anders dan bij het lassen van de meeste andere metalen.

Het gaat hierbij om veiligheidsaspecten als:

- ▶ Elektromagnetische velden en straling;
- ▶ elektrische stroomdoorgang door het lichaam;
- ▶ geluid.

Hierna volgt een korte toelichting ten aanzien van deze aspecten. Voor verdere informatie wordt verwezen naar de opleidingsboeken die door het NIL worden uitgegeven. Aanluitend zal worden ingegaan op een ander veiligheids- en gezondheidsaspect waar roestvast staal zich wel onderscheid van andere materialen te weten: lasrook.

15.1 Blootstelling aan elektromagnetische velden en straling

Elektromagnetische straling ontstaat in de lasboog en heeft een breed spectrum aan verschillende soorten van straling. De verschillen worden bepaald door de verschillen in golflengte van de diverse soorten straling. Een deel van deze elektromagnetische straling is voor het blote oog zichtbaar. Zo heeft elke kleur zijn eigen typerende golflengte, waarbij violet een kortere golflengte heeft als rood. Boven het golflengtegebied van rood begint het gebied van de onzichtbare infrarode straling, terwijl aan de andere grens van het zichtbare spectrum onder het violet, het eveneens onzichtbare gebied van de ultraviolette straling begint. De vormen van straling bij het lassen, waartegen we ons moeten beschermen zijn:

- ▶ Zichtbare (licht)straling - vermoeidheid - bescherming ogen met lasglas;
- ▶ ultraviolette straling - verbranding huid en ogen - bescherming ogen met lasglas en onbeschermdde huid afdekken;
- ▶ infrarode straling - verbranding huid en staar aan de ogen - bescherming ogen met lasglas en onbeschermdde huid afdekken en voorkomen van uitdrogen dus afschermen en voldoende vocht drinken;
- ▶ overige elektromagnetische straling, zie hierna.

Overige elektromagnetische velden en straling

Naast de eerder genoemde straling met een hoge frequentie zoals de lichtstralen, treden bij het lassen ook nog laagfrequente elektromagnetische velden en straling op. Een laagfrequent elektromagnetisch veld is een combinatie van een elektrisch en een magnetisch veld. Een elektrisch veld wordt veroorzaakt door een elektrische stroom. Zo'n veld treedt bijvoorbeeld op tussen stroomvoerende kabels. Een geaarde kabelafscherming kan dit elektrische veld voldoende afschermen.

Magnetische velden ontstaan rond geleiders waar een stroom door vloeit. De dichtheid ervan, de zogenaamde magnetische flux, wordt uitgedrukt in tesla (T); in lucht en andere niet magnetische stoffen is de fluxdichtheid laag. Lassers behoren tot de groep mensen die worden blootgesteld aan hoge veldsterkten, doordat het booglassen over het algemeen hoge lasstroomsterkten vraagt. Veelal staat de lasstroombron bovendien dicht bij de lasser en zijn de laskabels vaak in contact met het lichaam. Over de invloed van de inwerking van elektromagnetische

velden en straling op het menselijk lichaam is nog niet alles bekend. Verdere onderzoeken moeten ons meer kennis en inzicht opleveren. Zo schijnt "zuivere" gelijkstroom geen gezondheidsrisico's met zich mee te brengen als het gaat om elektromagnetische velden. Echter, een normale lasstroom vertoont toch wat fluctuaties. Het lassen met beklede elektroden wordt in Nederland echter nog veel met wisselstroom uitgevoerd. De hierbij ontstane elektromagnetische velden worden meer schadelijk voor de gezondheid geacht dan die bij gelijkstroom. Waarschijnlijk worden de krachtigste elektromagnetische velden opgewekt bij het weerstandlassen zoals het puntlassen. Mensen met een pacemaker moeten extra opletten niet in de buurt van dit proces te komen als er gelast wordt. Ook andere processen waarbij hoge lasstroomsterkten worden gebruikt - zoals het onder poeder lassen - kunnen in dit opzicht verdacht zijn. Raadpleeg bij twijfel altijd een arts die op dit gebied gespecialiseerd is. Uit het bovenstaande blijkt dat een extra hoeveelheid aan elektromagnetisch veld en straling beter kan worden vermeden. Zo is het dus niet raadzaam bij het lassen de stroomvoerende kabels over de schouder te hangen.

15.2 Stroomdoorgang door het lichaam

De mens is buitengewoon gevoelig voor een elektrische stroom die door het lichaam vloeit. Zo kan een stroom van 20 tot 30 mA al ernstig letsel veroorzaken. Daarnaast kan een stroomdoorgang een schrik-effect tot gevolg hebben, zodat door onverwachte bewegingen gevaarlijke situaties kunnen ontstaan.

De keuze van toepassing van gelijkstroom of wisselstroom bij het lassen is belangrijk, temeer daar de gevaren bij gebruik van wisselstroom viermaal hoger zijn dan gebruik van gelijkstroom.

Het effect van een elektrische schok op het menselijk lichaam hangt af van de volgende factoren:

- ▶ De sterkte van de stroom en de tijd dat deze vloeit;
- ▶ de weg die de stroom door het lichaam neemt;
- ▶ de frequentie van de stroom.

De grootte van de stroom en de tijd dat deze door het lichaam vloeit

Als iemand in aanraking komt met onder spanning staande componenten, dan hangt de sterkte van de stroom af van de elektrische weerstand in het stroomcircuit. Deze weerstand is de som van de weerstand in de huid, de rest van het lichaam en de beschermende kleding. De weerstand van de huid hangt onder meer af van het contactoppervlak en het vochtgehalte ervan. De weerstand van het menselijk lichaam is, afgezien van de huid, betrekkelijk laag (circa 500 Ohm in elke arm of been). Droge, leren handschoenen en werkschoenen met een rubberzool hebben een hoge elektrische weerstand.

De weg die de stroom door het lichaam neemt

Het gevaar van hartritmestoringen hangt - naast de tijd die de stroom door het lichaam vloeit - bovendien af van de weg die de stroom door het lichaam neemt.

Frequentie van de stroom

Zoals al eerder opgemerkt zijn de risico's bij het lassen met wisselstroom hoger dan bij het lassen met gelijkstroom. Het menselijk lichaam is het meest gevoelig voor frequenties in het bereik van 15 tot 100 Hz.

Lasapparatuur

De lasstroom wordt verkregen via transformatie van de netspanning tot de gewenste lasspanning en de daarmee gepaard gaande transformatie van de netstroom tot de lasstroom. Bij een lasstroombron noemt men de zijde die is aangesloten op het net de 'primaire zijde'. Aan deze zijde heerst over het algemeen bij industriële machines een spanning van 400 V. Aan de netkabel moet, om aanraking te voorkomen, aandacht worden geschonken. Zo mag hij niet beschadigd zijn of beschadigd kunnen worden door bijvoorbeeld erover heen rijdende vorkheftrucks.

De zijde waar de laskabel en de werkstukkabel zijn aangesloten heet de secundaire zijde. Als er niet wordt gelast, heerst er een spanning tussen de elektrode en het werkstuk, de zogenaamde open spanning.

In het geval van wisselstroom mag de open spanning 80 V effectief niet overschrijden. Er zijn op deze regel enige belangrijke uitzonderingen:

- De open spanning mag bij gebruik van wisselstroomapparaten in ruimten met een verhoogd risico, zoals vochtige en nauwe ruimten, 48 V effectief niet overschrijden. De installaties moeten zijn voorzien van een inrichting die de open spanning tot deze waarde beperkt. De Scheepvaartinspectie heeft besloten om na 2005 wisselstroomapparaten, als vaste inventaris, niet meer toe te laten op schepen.
- Kleine stroombronnen voor het lassen met beklede elektroden die veelvuldig voorkomen in de hobbysfeer, mogen volgens de norm NEN-EN 50060 een open spanning hebben van 55 V effectieve wisselspanning.
- Bij gemechaniseerde opstellingen, waarbij de lasser de lastoorts niet aanraakt, mag de open spanning 100 V bedragen. Bij het lassen op gelijkstroom mag de lasstroombron een open piekspanning hebben van 113 V. Bij gemechaniseerde opstelling mag deze spanning 141 V bedragen. Bij plasma-snijapparatuur mag de open spanning 500 V bedragen, daar de onder spanning staande delen in het normale geval niet bereikbaar zijn.

Stroombronnen moeten uitwendig worden beschermd tegen indringing van extreme elementen zoals contact met de vingers, stof, vuil en water. De bescherming van de stroombronnen, wordt conform de norm NEN-EN-IEC 60529, aangegeven in een zogenaamde IP-code (International Protection). Deze code bestaat uit twee cijfers, waarvan het eerste cijfer de bescherming van de behuizing weergeeft tegen externe binnendringen van voorwerpen, en het tweede cijfer de bescherming tegen binnendringen van water. Lasapparatuur alsmede de secundaire als de primaire kabels moeten dagelijks worden geïnspecteerd. NEN 3140 geeft aanwijzingen voor het regelmatige onderhoud van de apparatuur.

15.3 Blootstelling aan geluid

Geluid is een golfverschijnsel dat de lucht in de omgeving in trilling brengt. De sterkte (druk) van het geluid wordt uitgedrukt in decibel (dB) en de toonhoogte in Hertz (Hz). Gehoorschade ontstaat geleidelijk als de sterkte van het geluid boven de 80 dB(A) uitkomt. De gezondheidskundige norm voor schadelijk geluid ligt op een gemiddeld geluidsniveau van 80 dB(A) over een achturige werkdag. De werkgever moet passende gehoorbeschermingsmiddelen verstrekken vanaf een niveau van 80 dB(A). Het dragen van beschermingsmiddelen is wettelijk verplicht vanaf 85 dB(A), hoewel het ten eerste aan te bevelen is deze te dragen tussen 80 en 85 dB(A). Plaatsen waar sprake is van een geluidsniveau van 85 dB(A) moeten zijn afgebakend en gemarkeerd. Binnen deze gemarkeerde gebieden mogen zich alleen werknemers bevinden die daar uit hoofde van hun functie werkzaamheden verrichten. Het spreekt voor zich dat de lasser zich in vele gevallen moet beschermen tegen de geluidsniveaus die optreden. Hieronder worden een aantal gehoorbeschermingsmiddelen nader toegelicht. Overigens zijn de meeste beschermingsmiddelen te combineren met lashelmen.

Gehoorschermingsmiddelen

- a) Inwendige gehoorbescherming: oorpluggen, dopjes, propjes, deze middelen dempen het geluid met 10-15 dB(A).
- b) Individuele aangemeten inwendige gehoorbescherming: optoplastieken, deze middelen dempen het geluid met 10-35 dB(A).
- c) Uitwendige gehoorbescherming: oorkappen, deze dempen het geluid met 10-38 dB(A).

Aanvullende gegevens zijn te vinden in [37].

15.4 Lasrook

Hierna volgt een korte toelichting ten aanzien van deze aspecten, voor verdere informatie wordt verwezen naar de opleidingsboeken die door het NIL worden uitgegeven en naar de informatie die op de website www.lasrook-online.nl te vinden is. Aansluitend zal worden ingegaan op een ander veiligheids- en gezondheidsaspect waar roestvast staal zich wel onderscheid van andere materialen te weten: lasrook. Lasrook bevat schadelijke metaaloxiden.

Welke stoffen er precies vrijkomen bij het lassen is afhankelijk van het te lassen basismateriaal, en tevens van het gebruikte lasproces. In dit opzicht onderscheidt roestvast staal zich ongunstig ten opzichte van staal en aluminium.

15.4.1 Ontstaan van gassen en lasrook

Lasrook is een stof die vrijkomt tijdens het lassen uit het smeltbad en de toevoegmaterialen zoals elektroden, draad of poeder en deeltjes van gassen. Tijdens het lassen worden grove metaaldeeltjes veelal weggeslingerd als lasspatten, terwijl de fijne deeltjes in de lucht blijven zweven en de lasrook vormen.

Lasrook bestaat uit gassen en deeltjes. Bij beoordeling op toxiciteit moet ook rekening worden gehouden met de verdeling van de deeltjesgrootte en wordt onderscheid gemaakt tussen totaal stof en respirabele stof; dit laatste betreft kleine stofdeeltjes die bij inademing kunnen doordringen tot de longblaasjes. Verbindingen met metalen als chroom, nikkel, mangaan en vanadium worden als extra schadelijk beschouwd. Bij het lassen en snijden van roestvast staal zal door verdamping en verbranding vooral bij elektrodlassen relatief veel chroom en nikkel vrij komen. Bekende gassen die vrijkomen bij het lassen zijn onder andere:

- Ozon (O₃);
- Stikstofoxiden;
- Fosgeen.

Ozon (O₃)

UV-straling veroorzaakt ook de vorming van vrije zuurstofatomen, die zich met zuurstofmoleculen tot ozon binden. Dit treedt vooral dicht bij de boog op. Op grotere afstand is de concentratie veel lager. Bij aanwezigheid van stofdeeltjes valt de ozon weer snel uiteen. Ook reageert ozon met andere aanwezige gassen, zoals met stikstofoxiden; onderzoek is gaande om ozonontwikkeling te beperken door aanpassing van het beschermgas.

Bij het TIG-, plasma- en MIG/MAG-lassen kan de ozonconcentratie, indien geen maatregelen zijn genomen, irritatie van de ogen en van de bovenste luchtwegen veroorzaken. Bij microplasma- en TIG-lassen van dun materiaal kan de lasser, ondanks de lage intensiteit, nog hinder ondervinden, omdat hij zich dicht met zijn hoofd bij de boog bevindt. Het plaatsen van een doorzichtige afscherming kan dan afdoende bescherming bieden tegen te hoge ozonconcentratie in de ademzone.

Stikstofoxiden

Bij de hoge temperatuur in de omgevingslucht van de boog worden nitreuze dampen (NO_x) gevormd. Allereerst NO en door verdere oxidatie NO₂. Stikstofdioxide heeft al bij lage concentraties een sterk irriterende werking op de slijmvliezen. Bij lassen onder normale omstandigheden worden in de ademzone geen te hoge concentraties verwacht. Bij het plasmasnijden in de lucht zonder geschikte maatregelen kunnen wel ontoelaatbaar hoge concentraties voorkomen, vooral bij gebruik van perslucht of zuurstof.

Bij het TIG-lassen wordt de emissie van nitreuze dampen beperkt door toepassing van een niet te groot mondstuk en een niet te hoge gasstroom. Dit geldt eveneens voor de ozonconcentratie.

Fosgeen

Er wordt op gewezen dat open gebruik van gechloreerde koolwaterstoffen, bijvoorbeeld oplosmiddelen zoals tetra-, tri- en perchloorethyleen, niet is toegestaan. Onder in-

vloed van de boogwarmte of UV-straling ontleden ze onder vorming van fosgeen. Dit gas heeft bij inademing een sterk toxische werking.

Roestvast staal

Belangrijke legeringsbestanddelen in roestvast staal zijn chroom en nikkel. Dit zijn legeringselementen die, als ze zich bevinden in de lasrook, bij langdurige inademing schadelijk zijn voor de gezondheid van de mens. Chroom en chroomverbindingen worden door vele bedrijven toegepast. Via inademing en de huid, worden ze door het lichaam opgenomen en via het bloed getransporteerd. Chroom- en chroomverbindingen kunnen de volgende nadelige effecten veroorzaken: huidaandoeningen, afwijkingen aan het neusslijmvlies, aandoeningen aan de bovenste luchtwegen en gestoorde nierfunctie. Epidemiologisch onderzoek heeft aangetoond dat er sprake is van een verhoogd risico op longkanker. Dit is vastgesteld in de chroomverwerkende industrie; er zijn echter ook aanwijzingen voor een verhoogd risico bij het lassen van roestvast staal.

Roestvast staal bevat in vele gevallen zowel chroom als nikkel in aanzienlijke hoeveelheden.

Cr kan 3-waardig - Cr(III) - en 6-waardig - Cr(VI) - zijn. Alle zeswaardige chroomverbindingen, met name de matig/niet oplosbare, worden als verdacht beschouwd. Nikkel kan allergisch contacteczeem veroorzaken en inademing van Ni-houdende dampen kan aanleiding zijn voor (niet-kwaadaardige) aandoeningen van de luchtwegen.

Ni-verbindingen kunnen een carcinogene werking hebben. Aangenomen wordt dat ze in dit opzicht, in verhouding tot de chroomverbindingen, minder ongunstig zijn.

15.4.2 *Het meten van lasrookconcentraties*

Het meten van lasrookconcentraties

Het meten van de lasrookconcentratie in de ademzone ten behoeve van de beoordeling van de werksituatie, vereist speciale deskundigheid en kan alleen worden uitgevoerd door deskundigen. Voor een grove indicatie van de gasconcentraties is een meting met behulp van gasdetectiebuisjes geschikt. Wat het bepalen van de ozon-concentratie betreft, wordt er op gewezen dat dergelijke metingen afwijkingen tot ca. 50% kunnen vertonen ten opzichte van nauwkeurige meetmethoden. Ook voor het bemonsteren en analyseren van lasrook moet gebruik worden gemaakt van deskundige diensten.

15.4.3 *Blootstelling beperkende maatregelen*

Als uitgangspunt bij het nemen van blootstelling beperkende maatregelen geldt de Arbeids Hygienische Strategie, zoals de arbeidsinspectie deze voorstaat. Deze strategie luidt [29]:

1. Wegnemen, verkleinen of afschermen van de bron;
2. ventilatie/afzuiging toepassen;
3. scheiden van mens en bron;
4. persoonlijke beschermingsmiddelen gebruiken.

Hierbij geldt dat de maatregelen in oplopende volgorde moeten worden genomen. Ter toelichting op deze maatregelen worden enkele voorbeelden gegeven voor lassen en snijden van roestvast staal:

ad 1.

- ▶ lassen vervangen door een ander proces (lijmen, solderen, klinken, felsen, enz.);
- ▶ vervang smeltlassen door druklassen;
- ▶ vervang thermisch door mechanisch scheiden;
- ▶ bij lassen rutiel elektroden in plaats van basische elektroden toepassen;
- ▶ zo laag mogelijk stroomsterkte toepassen;
- ▶ met korte booglengte lassen.

ad 2.

- ▶ Lassen of snijden met plaatselijke afzuiging. Bijvoorbeeld bij het MIG/MAG-lassen een laspistool met ingebouwde afzuiging gebruiken;

- ▶ werkstukken lassen op een lastafel met boven-, zij- en achter afzuiging;
- ▶ onder-de-hand-lassen door gebruik te maken van een lasmanipulator, waarboven dan (flexibele) puntafzuiging is geplaatst.

ad 3.

- ▶ Bij het afschermen van mens en bron dienen we te denken aan het mechaniseren, automatiseren of robotiseren van het las- of snijproces;
- ▶ het rouleren van taken;
- ▶ het lassen of snijden in afgesloten of afgeschermd cabines of ruimten.

ad 4.

- ▶ Het gebruik van persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM's) waaronder laskap, beschermende kleding en ten aanzien van lasrook ademhalingsbeschermingsmiddelen als overdrukhelmen, bij voorkeur met externe luchttoevoer. Door de overdruk in de helm kan de lasrook de ademzone niet meer binnendringen.

De gegeven voorbeelden van te nemen maatregelen zijn niet uitputtend behandeld en laten nog vele mogelijkheden onbesproken. Naast deze maatregelen van meer technische aard is het ook aan te bevelen organisatorische maatregelen te nemen. Deze kunnen zijn:

- ▶ Kies een logische volgorde van werken;
- ▶ vermijd moeilijk bereikbare plaatsen;
- ▶ las bij voorkeur onder-de-hand;
- ▶ laat u goed instrueren over te nemen maatregelen, enz.

15.4.4 *Actueel* [30], [31]

De wetgeving op het gebied van de arbeidsomstandigheden is dus sinds 1 januari 2007 veranderd. Vooral de beheersing van blootstelling aan lasrook springt daarbij in het oog. De belangrijkste veranderingen hebben te maken met het stelsel van MAC-waarden. In de nieuwe Arbo-wet is het begrip MAC-waarde komen te vervallen.

In plaats daarvan is een systeem van grenswaarden ingesteld. In het Arbo-besluit is nu opgenomen dat de werkgever altijd moet beschikken over een grenswaarde voor de stoffen waaraan zijn werknemers kunnen worden blootgesteld.

Grenswaarde vastleggen

De MAC-waarden waren feitelijk wettelijke waarden waarboven blootstelling niet mocht plaatsvinden gedurende de tijd waarvoor de MAC-waarde gold. Voor lasrook van ongelegeerd staal geldt dat de grenswaarde sinds dit jaar slechts 1 milligram per m³ lucht mag bedragen (gemiddeld over een achturige werkdag). De lijst met wettelijke grenswaarden bevat de stoffen waarvoor een Europese grenswaarde is vastgesteld, stoffen die geen eigenaar hebben (zoals lasrook) en kankerverwekkende/mutagene stoffen. De waarde van 1 milligram per m³ is al lang geleden door de Gezondheidsraad als advies vastgesteld. Omdat vóór 1 januari 2003 een MAC-waarde gold van 5 mg/m³ lucht, was de stap naar 1 mg te groot en bereikte men per januari 2003 een compromis van 3,5 mg/m³. Wat houdt de nieuwe aanpassing van de Arbo-wet voor de lastechniek concreet in? De beleidsregel 4.9-2 is inhoudelijk niet aangepast, maar valt onder een ander wettelijk artikel: beleidsregel 4.1c-5. Hierin wordt verwezen naar de bekende praktijkrichtlijn 'Beschrijving doeltreffende maatregelen bij blootstelling aan rook en/of gassen afkomstig van lassen en/of verwante processen', versie 13 maart 2002. Deze richtlijn was geënt op de MAC-waarde van 3,5 milligram per m³.

Echter, van de praktijkrichtlijn 'Beheersing van blootstelling aan lasrook' is een nieuwe versie verschenen (augustus 2006), waarin ook wordt uitgegaan van 3,5 mg per m³. In de Staatscourant van 4 oktober 2007 heeft de Minister van Sociale Zaken en Werkgelegenheid aangekondigd dat de wettelijke grenswaarde voor lasrook van ongelegeerd staal tot 1 april 2010 3,5 mg/m³ blijft. Nieuw is dat beleidsregels worden vervangen door zoge-

naamde Arbo-catalogi, waarin werkgevers en werknemers afspraken maken welke concentratie wordt nagestreefd (wettelijk is 1 mg/m³ verplicht!) en op welke wijze men naar deze waarde toegaat via een plan van aanpak. Via de website www.5xbeter.nl is een instrument beschikbaar, waarmee kan worden gecontroleerd of lassen volgens de herziene praktijkrichtlijn lasrook (versie 2006) gebeurt. Deze applicatie is te vinden onder de noemer Verbeter-check Lasrook. Zowel de praktijkrichtlijn als de applicatie bieden de mogelijkheid om de situatie voor het lassen en aanverwante processen van meerdere metalen en dus ook voor roestvast staal toe te passen.

Controle met de Verbeter-check

De Verbeter-check Lasrook maakt de controle gemakkelijk. De situatie invullen en de computer geeft het verlossende antwoord. Groen? Doorgaan. Rood? Verbeteringen aanbrengen. Het systeem reikt mogelijke oplossingen aan. Aan het eind van de Verbeter-check rolt - bij alle lichten op groen - het bewijs van goed gedrag er uit. Bij onvolkomenheden levert de computer automatisch een plan van aanpak. Wel heeft de Verbeter-check een aantal beperkingen:

- ▶ Is de inschakelduur hoger dan 35 procent? Dat wil zeggen: brandt de toorts langer dan 2 uur en 45 minuten per dag? Volg dan de aanwijzingen voor adembescherming, maar win gericht advies in voor de ventilatiesituatie.
- ▶ Is de stroomsterkte groter dan 350 Ampère? Dan zijn er zwaardere maatregelen nodig dan de Verbeter-check aanbeveelt. Win gericht advies in.
- ▶ Vindt lassen in een besloten ruimte plaats? Dan moet de lasser zijn uitgerust met een lashelm met externe luchttoevoer, tenzij is aangetoond dat het zuurstofpercentage in de ruimte zich tussen de 20 en 21 volumepercent bevindt. In dat geval voldoen de maatregelen uit de check, hoewel de voorkeur dan toch nog uitgaat naar een helm met externe toevoer.
- ▶ Zijn de las- of snijprocessen gemechaniseerd, geautomatiseerd of gerobotiseerd? Zo goed mogelijke afscherming en uitvoering met bronafzuiging is dan aanbevolen. Ruimteventilatie moet altijd worden toegepast. Staan de lasprocessen niet in deze check, bijvoorbeeld omdat het nieuwe technieken betreft met nog onvoldoende meetgegevens, win dan gericht advies in.

Hoofdstuk 16

Normen m.b.t. roestvast staal

NEN-EN 10088-2:2005 nl	Roestvaste staalsoorten: Deel 1: Lijst van roestvaste staalsoorten. Deel 2: Technische leveringsvoorwaarden voor plaat en band voor algemeen gebruik. Deel 3: Technische leveringsvoorwaarden voor halfproducten, staven, draad en profielen voor algemeen gebruik.
NEN-bundel 3:2007 nl NEN-EN 10296-2:2005	Normen voor staal en staalproducten. Gelaste stalen buizen voor mechanische en algemene technische doeleinden - Technische leveringsvoorwaarden - Deel 2 - Corrosievast staal.
NEN-EN 10297-2:2005	Naadloze stalen buizen voor mechanische en algemene technische doeleinden - Technische leveringsvoorwaarden - Deel 2 - Corrosievast staal.
NEN-EN 12502-4:2005 en	Bescherming van metalen tegen corrosie - Richtlijnen voor de beoordeling van corrosiewaarschijnlijkheid in water en opslagsystemen - Deel 4: Invloed van factoren op corrosievast staal.
NEN-EN-ISO 3506-1:1997 en NEN-EN 10204:2004 nl NEN-EN 10095:1999 en NEN-EN 10302:2008 en NEN-EN 10028-7:2007 nl NEN-EN 10272:2007 en NEN-EN 1011-3:2000 en	Standaard voor bevestigingsartikelen van corrosievast staal. Producten van metaal, soorten keuringsdocumenten. Hittevaste staalsoorten en nikkellegeringen. Kruipvaste staalsoorten, nikkel- en kobaltlegeringen (2008). Platte producten van staalsoorten voor drukvaten - Deel 7: Roestvast staal. Staven van corrosievaste staalsoorten voor drukvaten. Aanbevelingen voor het lassen van metalen; Deel 3: Booglassen van corrosievaste staalsoorten.
NEN-EN 1600:1997 en	Lastoevoegmaterialen - Beklede elektroden voor booglassen met de hand van corrosievaste en hittevaste staalsoorten - Indeling.
ISO 3581:2003 en	Lastoevoegmaterialen - Beklede elektroden voor het booglassen met de hand van corrosievaste en hittebestendige staalsoorten - Indeling.
NEN-EN-ISO 14343:2007 en	Lastoevoegmaterialen - Draadelektroden, stripelektroden, draden en staven voor booglassen van corrosie- en hittevaste staalsoorten - Classificatie.
NEN-EN-ISO 17633:2006	Lastoevoegmaterialen - Gevulde draadelektroden en staaf voor booglassen met of zonder beschermgas van corrosie- en hittevaste staalsoorten - Indeling.
NEN-EN-ISO 4063:2000 en ASTM A 380-88	Lassen en verwante processen - Termen voor processen en referentienummers. Standard Practice for Cleaning and Descaling Stainless Steel Parts, Equipment and Systems.
NEN-EN-ISO 6947:1997.nl NEN-EN-IEC 60825-1:2007 NEN-EN-ISO 11553-1:2009 en	Fundamentele lasposities - Definities van hellings- en rotatiehoeken. Veiligheid van laserproducten - Deel 1: Apparatuurclassificatie en eisen. Veiligheid van machines - Machines die gebruik maken van lasers - Deel 1: Algemene veiligheidseisen.
NEN-EN 12254:1999 + A2:2008 en NEN-EN 1993-1-1:2006	Afschermingen voor werkplekken met lasers - Veiligheidseisen en beproeving. Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen.
NEN-EN 1993-1-2:2005	Eurocode 3: Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-2: Algemene regels - Ontwerp en berekening van constructies bij brand.
NEN-EN 1993-1-4:2006	Eurocode 3 - Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-4: Algemene regels - Aanvullende regels voor corrosievaste staalsoorten.

Documenten in een voornorm beschreven ("ENVisaged"):

ENV 1090-1	Execution of steel structures: General rules and rules for buildings.
ENV 1090-2	Execution of steel structures: Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting.
ENV 1090-6	Execution of steel structures: Supplementary rules for stainless steels.
ENV 1993-1-3	Design of steel structures: Supplementary rules for cold formed thin gauge members and sheeting.

Hoofdstuk 17

Internetverwijzingen en literatuur

Internetverwijzingen

www.5xbeter.nl
 www.bil-ibs.be
 www.dunneplaat-online.nl
 www.euro-inox.org
 www.ewf.be
 www.fdp.nl
 www.fme.nl
 www.iw-iis.org
 www.lac-online.nl
 www.lincolnelectric.nl

www.m2i.nl
 www.mcb.nl
 www.nen.nl
 www.nickelonline.org
 www.nidi.org
 www.nil.nl
 www.rofin.com
 www.stainless-steel-world.net
 www.syntens.nl
 www.thyssenkrupp.de

www.tno.nl
 www.trumpf-laser.com
 www.tudelft.nl
 www.ugine-alz.com
 www.utwente.nl
 www.verbinden-online.nl
 www.worldstainless.org
 www.lasrook-online.nl

Literatuur

- [1] The application of electrical resistance measurements to the study of the atmospheric corrosion of metals. John Christopher Hudson 1927 Proc. Phys. Soc. 40 107-131 doi:10.1088/0959-5309/40/1/317.
- [2] N.W. Buijs. Functie van legeringselementen in roestvast staal en nikkellegeringen. Roestvast staal 10/2005. Blz. 19 t/m 22.
- [3] The discovery of stainless steel. http://www.bssa.org.uk/about_stainless_steel.php?id=31
- [4] Roestvast staal lassen; Smitweld B.V., Nijmegen 1986.
- [5] Euro-inox The European Stainless steel Development Association. Stainless Steel: Table of Technical Properties. Materials and Applications Series, volume 5. 2007. ISBN 978-2-87997-242-8.
- [6] P.L.F. Rademakers. Tech-Info-Blad TI.04.19 - "Roestvast staal in dunne plaat en buis"; januari 2004, FME.
- [7] K. Bekkers. Ontwikkelingen van roestvast staal. Referaat NIL/BIL lassymposium. 29 november 2006.
- [8] Europese norm NEN EN-10088 "Roestvaste staalsoorten". De NEN EN-10088 1 t/m 3: 2005.
- [9] Pierre-Jean Cunat. Euro-inox The European Stainless steel Development Association. Lassen van roestvast staal. Materiaal en toepassingen reeks, volume 3. Eerste uitgave 2007. ISBN 978-2-87997-180-3.
- [10] K. Bekkers. Ontwikkeling van roestvast staal. Evolutie en trends. Lastechniek maart 1996. Blz. 15 t/m 17.
- [11] Contribution à l'étude de la stabilisation des aciers, austénitiques au chrome-nickel résistant à la corrosion; V. Cihal, Mém. Sc. Rév. Met., No 5, 1972, 327-339.
- [12] F.Vos. Roestvast staal in zwembaden na 15 jaar nog niets geleerd. Intech november 2002. Blz 50 t/m 61.
- [13] Metallerie Infofiches Rvs [3-3].
- [14] Einfluss von Legierungselementen auf das Auscheidungsverhalten austenitischer Chrom-Nickel Stähle; G. Lennartz; Microchimic Acta, Heft 3, 1965, 405-428.
- [15] Schmiedestücke aus nichtrostendem Stahl; H.J. Niederau; Stahl und Eisen, 107 (1987), 1239-1246.
- [16] Lastechniek jrg 57 oktober 1991 blz. 345-347 Ken Salmon - Gevulde draad voor het lassen van roestvast staal: een inzicht biedend overzicht.
- [17] FME praktijkbeveling LM.94.04 - Backing en nabehandeling bij het lassen van roestvast staal.
- [18] Product Informatie Bulletin PIB 32N-rev O. Lincoln-Smitweld. Februari 2006.
- [19] Voorlichtingspublicatie VM 127 - "Weerstandlassen"; november 2009, FME.
- [20] NIL website: www.nil.nl
- [21] Wetenswaardigheden over het warmtebehandelen van roestvast staal. N.W. Buijs. Van Leeuwen Stainless.
- [22] Heat treating of stainless steels; ASM Metals Handbook, Volume Heat Treating; 623-646.
- [23] Euro-inox "Beitsen en passiveren van roestvast staal". Materiaal en toepassingen reeks, Volume 4.
- [24] BIL katern "Een route doorheen de Europese lasnormen", Ing. Kurt Broecks EWE, Normanten lastechniek BIL.
- [25] Kwaliteitsborgingsaspecten bij de vervaardiging van gelaste constructies (VM 85); november 2009, FME.
- [26] The corrosion behaviour of welded nitrogen bearing austenitic stainless steels; T.G. Gooch, Metal construction and British Welding Journal, Dec. 1969, 569-574.
- [27] Praktijkrichtlijnen voor het uitvoeren van lasreparaties aan constructies uit ongelegeerd en laaggelegeerd staal; NIL-project "Reparatielassen" 1987.
- [28] Arbeidsomstandigheden en Veiligheid. Lastechniek april 2003, blz 28 t/m 31. Ing. W. Pors IWE.
- [29] Lastechniek november 1996, Lasrook een onderwerp dat veel stof doet opwaaien. Ir. H.H. van der Sluis. Blz. 5 t/m 8.
- [30] Lastechniek april 2007. Rene van der Berg. Wetgeving rond lasrook onder vertroebelende deken. Blz 11.
- [31] Lastechniek april 2007. Nieuwe Arboret, meer ruimte voor maatwerk. Rinus Brinks. Blz 12 t/m 14.
- [32] Lastechniek april 2007. Van MAC-waarden naar grenswaardenstelsel. Ing. W. Pors IWE. Blz 15 t/m 16.
- [33] Roestvaststaalgids 2007. Duplexroestvast staal wapen in de strijd tegen corrosie en nikkelprijs; blz 7 t/m 9.
- [34] Moderne verspaningstechnieken. Tech-Info blad nr. TI.06.31; april 2006, FME.
- [35] http://www.corrocean.nl/engineering/engineering_special_nl.htm
- [36] Lastechniek december 2005. Lijmverbindingen. Hans Poulis.
- [37] ARBO- en milieuzorg bij het lassen en snijden VM 122. Uitgave FME.
- [38] MCB assortimentsboek roestvaststaal. Uitgave maart 2001.
- [39] Voorlichtingspublicatie VM 126 - "Zacht- en hardsolderen"; december 2008, FME.
- [40] Lincoln Smitweld roestvaststaalcursus.
- [41] Schaeffler, Selection of austenitic electrodes for welding dissimilar metals. Welding Journal, oktober 1947.
- [42] Schaeffler, Welding dissimilar metals with stainless steel electrodes. Iron Age, juli 1948.
- [43] Schaeffler, Construction diagram for stainless steel weldmetal. Metal Progress, november 1949.
- [44] DeLong, Measurement and calculation of ferrite in stainless steel weld metal. Welding Journal, november 1956.
- [45] Siewert/McCowan/Olson, Welding Journal 12 (1988) p. 289s-298s.
- [46] Kotecki/Siewert, Welding Journal 5 (1992) p. 171 s-178s.
- [47] R.H. Espy, Weldability of nitrogen strengthened stainless steels. Welding Journal 5 (1982) p. 149 - 159.
- [48] IIW, doc. II 1196-92, Comparative Studies Of Ferrite Content Of Stainless Steel Weld Metals By Various Measuring Methods
- [49] Van Nassau, Stainless Steel Europe, vol 5, issue 3, april 1993
- [50] K. Bekkers en F. Neessen, Lastechniek, mei 1994, p.212-214
- [51] F. Neessen, Lassen van ongelijksoortige materialen. Lincoln PIB 44N, (januari 2008)



Vereniging FME-CWM
vereniging van ondernemers in de
technologisch-industriële sector

Boerhaavelaan 40

Postbus 190, 2700 AD Zoetermeer

T (079) 353 11 00

F (079) 353 13 65

E alg@fme.nl

I www.fme.nl